СПРАВОЧНИК ПРОЕКТИРОВЩИКА

Металлические конструкции

Том 1
Общая часть

1998

ББК 38.54
М 54
УДК 624.014 (035.5)

Печатается по решению Ученого совета института ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П.Мельникова

Рецензенты: специалисты кафедры «Металлические конструкции» Московского государственного строительного университета (зав.кафедрой д.т.н. профессор Ю.И.Кудишин).

Металлические конструкции. В 3 т. Т.1. Общая часть. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В.Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П.Мельникова) — М.: изд-во АСВ, 1998.— 576 стр. с илл.

ISBN 5-87829-057-X

Справочник проектировщика «Металлические конструкции» общим объемом 150 а.л. в трех томах подготовлен коллективом ведущих ученых и специалистов стран СНГ по строительным металлоконструкциям. В справочнике обобщен мировой опыт проектирования и строительства традиционных и уникальных зданий и сооружений из металла, нашли отражение отечественные и зарубежные исследования и разработки последнего двадцатилетия. Впервые публикуются материалы по разработке проектов, изготовлению и монтажу дымовых труб, транспортерных галерей, градирен, крановых эстакад и др. Переживаемое страной резкое сокращение инвестиций и связанное с этим ускоренное старение эксплуатируемого металлофонда придают особую актуальность новому разделу из трех глав, в котором изложены обоснованные практикой рекомендации по организации, оснащению и выполнению реконструктивных, обследовательских и диагностических работ, а также методам усиления конструкций, элементов и узлов, исчерпавшим ресурс безотказной работы.

Коллектив авторов уверен в том, что выход этого капитального труда обеспечит снижение риска разрушений и отказов, повысит эффективность инвестиционных затрат и конкурентоспособность российских строителей, избавит от непрофессионализма множество предприятий, организаций, АО, СП и частных предпринимателей.

Справочник предназначен для работников научных и проектных организаций, работников экспертных базовых центров, конструкторских бюро, руководителей служб заводов-изготовителей металлоконструкций, строительно-монтажных организаций, работников технического надзора за эксплуатацией, студентов, аспирантов и преподавателей Вузов и др.

$\text{М}\frac{3301000000 - 008}{009(03) - 98}$ – без объявл.

ISBN 5-87829-057-X

© Издательство АСВ, 1998
© Кузнецов В.В. и коллектив авторов, 1998

ПРЕДИСЛОВИЕ

Справочник содержит необходимые проектировщикам, конструкторам и научным работникам сведения, рекомендации и исчерпывающие данные для расчета, разработки проектов, изготовления и монтажа металлических конструкций практически любой конструктивной формы. Приведенные в справочнике материалы базируются на обобщении многолетнего передового опыта работы ведущих в России и странах СНГ коллективов ЦНИИпроектстальконструкции им.Мельникова, Укрниипроектстальконструкции, Днепрпроектстальконструкции, Ленпроектстальконструкции, ВНИКТИстальконструкции, ЦНИИпроектлегконструкции, ВНИПИпромстальконструкции, ЦНИИСК им. Кучеренко, кафедр металлических конструкций МГСУ (б. МИСИ), НГСА (б. НИСИ), ДИСИ и многих других проектных, научно-исследовательских и учебных институтов и организаций, занимающихся разработкой проектов, анализом и исследованием металлических конструкций. В справочнике рассмотрены основные критерии выбора рациональной конструктивной формы зданий и сооружений и даны наиболее совершенные методы их расчета. Кроме того, перед авторами справочника ставилась задача дать материал, позволяющий учитывать перспективу поступательного развития конструктивных форм и способов изготовления и монтажа металлических конструкций зданий и сооружений. В связи с этим обобщены основные тенденции развития конструктивных форм, особенности применения новых сталей, сплавов, профилей проката, типов соединений.

В настоящем издании впервые представлены материалы по специфике работ, связанных с реконструкцией, обследованием, усилением и определением остаточного ресурса, испытанием металлических конструкций зданий и сооружений. В справочнике также впервые обобщен опыт проектирования, изготовления и монтажа таких классов сооружений, как дымовые трубы, башенные градирни, галереи, копры, крановые эстакады и др.

В целях компактности расположения и удобства поиска необходимых материалов справочник выполнен в трех томах. В нем принята следующая рубрикация: раздел, глава, пункты. Названия всех пунктов указаны в оглавлении. Двойная нумерация рисунков, формул и таблиц ведется в пределах одной главы.

В первом томе, состоящем из шести разделов, сосредоточены общие сведения по рациональному выбору и применению сталей, профилей и соединений, статическому и динамическому расчету конструктивных элементов и систем, использованию эффекта предварительного напряжения, приведены рекомендации по выбору эффективных методов защиты от коррозии. Изложены требования к конструкциям, вытекающие из учета особенностей современной технологии изготовления, транспортирования, монтажа и требований экономики. Завершают том основные правила оформления рабочей документации, вспомогательные материалы для подбора сечений элементов конструкций, наиболее распространенные нормали конструкции, развертки сложных поверхностей и другие материалы и таблицы, облегчающие труд проектировщика и конструктора.

Второй том включает в себя два раздела, соответствующие двум основным классам сооружений: первый - конструкциям каркасов производственных зданий и второй - стальным сооружениям с преимущественным использованием листового проката. В первом разделе содержатся рекомендации по первичному упорядочению объемно-планировочных параметров зданий, приведены исчерпывающие све-

дения, необходимые при разработке проектов одноэтажных и многоэтажных зданий, в том числе с применением различных систем традиционных и крупнопролетных покрытий, а так же зданий из легких металлических конструкций комплектной поставки. Даны рекомендации по компоновке и выбору оптимальных схем каркаса, их расчету, а также методология и примеры решения отдельных элементов каркасов, площадок, фахверков и узловых соединений.

Во втором разделе листовых конструкций изложены рекомендации и необходимые справочные данные по выбору параметров, схем, компоновке сечений, выполнению расчетов конструкции кожухов доменных печей, воздухонагревателей, резервуаров, газгольдеров, бункеров, силосов, дымовых труб и надземных трубопроводов.

Третий том включает в себя три разнородных, но весьма актуальных раздела. Первый раздел содержит общие сведения о специфических нагрузках и воздействиях, особенностях выбора конструктивных и расчетных схем, компоновке сечений, используемых материалах, методах монтажа и их влияния на проектные решения решетчатых пространственных сооружений таких, как мачты и башни и системы из них, радиотелескопы, башенные градирни, открытые крановые эстакады, транспортерные галереи и надшахтные копры. Во втором разделе изложены основные положения и рекомендации по проектированию алюминиевых конструкций, рассмотрены области рационального их применения в строительстве, даны основания для выбора марок сплавов, типов профилей и методов соединений, изложены особенности расчета конструкций из этого материала. В третьем разделе приведены практические соображения, рекомендации и положения, регламентирующие надлежащее проведение реконструктивных и обследовательских работ, проектирование необходимого усиления существующих объектов, а также организацию и оснащение натурных и модельных экспериментальных испытаний и исследований металлических конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений.

ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемом справочнике рассмотрены основополагающие принципы выбора рациональной конструктивной формы зданий и сооружений из металла, приведены рекомендации и основные указания, необходимые для профессионально грамотного выполнения расчетов, разработки проектной документации и реализации проекта на заводе и строительной площадке. Материалы справочника в сжатом и систематизированном виде знакомят с передовым отечественным и зарубежным опытом проектирования металлических конструкций различного назначения, содержат последние сведения об особенностях применяемых материалов, профилей проката, видов соединений, дают представление о современных идеях, технических приемах и методах повышения эффективности использования металлических конструкций зданий и сооружений.

В развитии конструктивных форм металлических конструкций в нашей стране обычно отмечают три характерных этапа. Первый этап - дореволюционный, когда создание конструктивной формы было подчинено требованию экономии металла и основывалось на успехах практических достижений строительной механики конца XIX - начала XX веков, обеспечивающих возможность получения теоретически оптимальных схем.

На втором послереволюционном этапе конструктивная форма, принимаемая на основе минимума веса, стала испытывать постепенно усиливающееся влияние перехода от кустарных способов изготовления и монтажа к механизированным индустриальным методам выполнения этих видов работ. Одновременно с этим несоизмеримые по сравнению с предыдущим этапом масштабы строительства делали все более острой проблему существенного увеличения производства металлоконструкций и снижения трудоемкости их изготовления. Под влиянием изложенных объективных факторов к конструктивной форме стали предъявляться наряду с экономией металла требования снижения трудозатрат при производстве и возведении, а также обеспечение необходимой долговечности при существенно ужесточающихся условиях и режимах эксплуатации.

Заметным событием этого периода, оказавшим большое влияние на последующее развитие металлических конструкций, было внедрение электродуговой сварки. Переход на сварку вместо клепки привел к необходимости пересмотра не только принципов формообразования конструкции, но и способов их изготовления и монтажа.

На третьем послевоенном этапе, вплоть до начала 90-х годов, конструктивная форма металлических конструкций испытывала возрастающее влияние трех главных воздействий:

- постоянного неутоленного спроса народного хозяйства на строительные металлические конструкции;
- конкурирующего с металлом бурного развития индустрии сборных железобетонных конструкций;
- ужесточения требований к металлическим конструкциям как естественного следствия развития науки и техники, сопровождающегося значительных ростом мощности единичных технологических агрегатов и форсированием режимов их работы, а также возникновением многих новых производств и технологий, созданием ранее неизвестных и совершенствованием традиционных эффективных материалов.

За истекшие пять десятилетий отечественная наука о металлических конструкциях прошла огромный путь и заняла достойное место в мировой строительной технике. Крупнейшим достижением ученых, строителей и исследователей является переход от расчета по допускаемым напряжениям на расчет строительных конструкций по предельным состояниям. Метод расчета по предельным состояниям поставил обеспечение прочности и надежности конструкции на научную основу и впоследствии получил распространение в зарубежной практике.

Фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования были выполнены по уточнению расчета традиционных стержневых и оболочечных конструкций. Разработаны и внедрены в практику методы расчета конструкций на сопротивление хрупкому и усталостному разрушению. Проведены многочисленные исследования, обосновывающие возможность учета нелинейной работы материала в упругопластической стадии. Изучен механизм пространственного перераспределения усилий, использование работы некоторых элементов в закритической стадии.

Исследована рациональность применения стержней с весьма гибкими стенками при работе на поперечный изгиб, подтверждена рациональность использования вантовых, висячих и мембранных систем, разработана теория их расчета и принципы формообразования с учетом изменчивости всех параметров, их физической и геометрической нелинейности. Заметный эффект был достигнут благодаря повышению расчетных сопротивлений стали в результате разработки теоретической модели связи между количеством отказов конструкции и уровнем расчетного сопротивления материала.

На основании анализа зданий и сооружений по степени экономической и социальной ответственности ЦНИИСКом были разработаны предложения по дифференциации коэффициента надежности по назначению; включение в нормы этих коэффициентов, равных 0,95 и менее, для большинства рядовых зданий и сооружений позволило снизить расход стали не менее чем на 3 %.

Послевоенный период также ознаменовался широкой модернизацией технологии заводского изготовления металлических конструкций и интенсивным строительством новых предприятий по производству стальных и алюминиевых конструкций с использованием современного оборудования, поточных и автоматизированных технологических линий.

С позиций существенной экономии металла и расширения целесообразной области применения металлических конструкций особого акцента заслуживает широкомасштабная совместная работа строителей и металлургов страны по созданию, всестороннему исследований и промышленному внедрению сталей и сплавов с высокими прочностными характеристиками, а также по совершенствованию и разработке новых эффективных горячекатаных и холодноформованных профилей. Эта работа вооружила проектировщиков богатейшим арсеналом средств для решения насущных задач капитального строительства.

Разработаны и широко используются низколегированные стали повышенной и высокой прочности, термоупрочненные с прокатного нагрева углеродистые стали, атмосферостойкие стали, хладостойкие стали для северного исполнения, стали повышенной пластичности с гарантированным относительным сужением в направлении толщины проката, специальные стали для изотермических резервуаров и др. Для нужд строительства налажено производство широкополочных двутавров и тавров, а также швеллеров и двутавров с тонкими стенками, поставляются тонкостенные открытые и замкнутые гнутосварные профили, обладающие рациональным распределением материала по сечению. Среди видов прокатных изделий особого внимания заслуживает сортамент стальных оцинкованных профилированных листов для ограждающих конструкций стен и кровель.

Благодаря применению легких ограждающих конструкций снизился расход стали на несущие конструкции, и одновременно были созданы условия для организации принципиально нового конвейерного способа сборки и монтажа крупными блоками покрытий зданий. При такой организации работ на монтаже отпадает необходимость в трудоемких и опасных операциях на высоте, появляется возможность совмещенного во времени производства работ по прокладке надземных коммуникаций, устройству полов, фундаментов под оборудование и т.п., существенно растет эффективность использования монтажных кранов, благодаря специализации рабочих на конвейере возрастает производительность и качество труда, представляется возможность непрерывного, вне зависимости от погодных условий, ведения отделочных работ.

Кровли на основе оцинкованного стального профилированного листа и эффективного утеплителя положили начало целой серии новых складывающихся мобильных каркасов покрытий зданий. И, наконец, на базе этого нового типа ограждающих конструкций стен и кровель возникла целая отрасль так называемых легких металлических конструкций одноэтажных зданий, комплектно поставляемых на стройки со множеством специализированных заводов-изготовителей.

Целям повышения степени индустриальности, сокращению сроков проектирования и строительства, снижению их стоимости и повышению качества возводимых зданий и сооружений способствовала проведенная в послевоенный период масштабная работа по типизации проектных решений на базе унификации объемно-планировочных, конструктивных и технологических решений конструкций и изделий.

Теоретические положения и методология типизации в строительстве получили развитие благодаря трудам ученых Е.И. Белени, Н.С. Стрелецкого, К.К. Муханова, В.В. Захарова и многих других. Изыскание способов наиболее целесообразного с точки зрения всего народного хозяйства уменьшения количества различающихся элементов сопровождалось созданием методики технико-экономических исследований эффективности унификации схем и размеров, а также принципов типизации конструкций и содействовало успешному развитию типового проектирования и, в том числе, в металлостроительстве. На описанной выше основе была осуществлена разработка типовых стальных конструкций одноэтажных промышленных зданий, градирен, транспортерных галерей, кранов-перегружателей, мачт и башен объектов связи, опор ЛЭП и др. Массовое использование типовых конструкций и типовых проектов продемонстрировало большое значение этих работ для сокращения времени проектирования объектов, а также на подготовку к строительству и размещению заказов на изготовление.

В соответствии с традициями отечественной школы проектирования металлических конструкций, берущей свое начало от таких корифеев как В.Г.Шухов и Н .С. Стрелецкий, в проектах стальных конструкций последних перед перестройкой лет начинают широко применяться новые инженерные решения, существенно повышающие эффективность капитальных вложений, сберегающие металл и труд. Распространенным приемом является использование развитых пространственных систем в виде жесткого связевого диска в уровне покрытия или перекрытия, опертого на неподатливые связевые системы торцов здания, вертикальные диафрагмы, подкосы или встроенные жесткие этажерки.

Оптимальным сочетанием жестких и шарнирных узлов соединений ригелей с колоннами, а также некоторым усовершенствованием расчетных схем нередко удается исключить или сократить количество продольных и поперечных температурных швов в многопролетных протяженных зданиях и благодаря этому снизить расход металлопроката.

Среди других, успешно реализуемых инженерных идей, направленных на экономию стали, отметим:

- создание конструктивных схем, основанных на принципе концентрации материала в минимальном количестве основных несущих элементов каркаса;
- избирательное, комбинированное применение сталей разных классов прочности с использованием высокопрочного материала только в тех элементах и деталях, которые обеспечивают экономический эффект для конструкции или сооружения в целом;
- применение высокопрочной стали в крупнопролетных протяженных конструкциях и особенно в тех случаях, когда значительная часть несущей способности расходуется на поддержание собственного веса;
- весьма эффективен прием совмещения различных функций в одной конструктивной форме, например несущих и ограждающих; такая идея была успешно реализована на практике в подкраново-подстропильных фермах, тонкостенных мембранных покрытиях и т.п.;
- применение предварительно напряженных конструкций, благодаря которым проектировщик получает уникальную возможность регулировать распределение усилий в выгодном для работы отдельных элементов или системы в целом направлении. Это позволяет создавать вантовые и висячие системы с использованием высокопрочных тросов, пучков проволоки или растянутых мембран, способных в результате предварительного напряжения воспринимать не только растягивающие, но и сжимающие усилия.

В настоящее время основательно исследованы различные способы предварительного напряжения, проверена их эффективность, разработана теория расчета, апробирована конструкция узлов и деталей, что создает предпосылки для широкого их использования в строительстве.

Специфичность физических свойств алюминиевых сплавов и, в первую очередь, легкость, хладостойкость, защищенность от коррозионных повреждений в ряде сред делают их применение эффективным для замены ими сталей в ограждающих и некоторых видах несущих конструкций. Так, например, отечественные и зарубежные исследования подтвердили, что для подвижных конструкций кранов, пролетных строений сборно-разборных и разводных мостов, резервуаров, а также стационарных конструкций, возводимых в труднодоступных районах и районах Крайнего Севера, конструкции из алюминиевых сплавов могут оказаться экономичнее стальных. Кроме того, применение конструкций из алюминиевых сплавов в районах с высокой сейсмичностью, благодаря малому весу конструкции позволяет уменьшить затраты, связанные с обеспечением сейсмостойкости возводимых сооружений.

Наличие современных специализированных заводов по изготовлению строительных конструкций из легких сплавов, введенных в действие за последние десятилетия, создает все условия для широкого использования алюминия в капитальном строительстве .

Реконструкция и техническое перевооружение промышленных объектов, связанные с более или менее значительным вмешательством в существующие эксплуатируемые здания и сооружения, представляют собой специфическую народнохозяйственную проблему. Последняя связана с особенностями этого вида работ при разработке проектной документации, выборе конструктивных форм и методов усиления, определении способов производства строительных работ и оборудования и существенно отличается от обычных проектных работ, выполняемых при создании нового сооружения.

Наиболее трудоемкой частью реконструктивных работ является детальное обследование действительного состояния каждой конструкции, элемента и узлов соединения с фиксацией всех дефектов, повреждений и отклонений в геометрии путем внешнего осмотра, инструментальных измерений и геодезической съемки. Обследование проводится на действующем предприятии в труднодоступных местах, на высоте, в условиях повышенной опасности для жизни и поэтому требует специально подготовленного персонала, допущенного к верхолазным работам.

Химический состав и механические свойства металла основных несущих конструкций устанавливаются на основании лабораторных анализов образцов. Тщательному исследованию подвергается достоверность принятых в проекте нагрузок, правильность расчетных схем, усилий и сечений элементов с учетом фактических несовершенств, дефектов и повреждений. В материалах обследования фиксируются данные, характеризующие историю эксплуатации объекта, ранее выполненные реконструкции, усиления и ремонты, сроки службы крановых рельсов, колес и отдельных конструктивных элементов, возникающие затруднения при эксплуатации (недостаточная жесткость, колебания, вибрации, остаточные деформации и т.п.).

Ответственной частью технического освидетельствования является общий анализ состояния реконструируемого объекта, его конструктивных частей, элементов и узлов, имеющихся и вскрытых анализом запасов и резервов. На основании этого составляется заключение о пригодности объекта к дальнейшей эксплуатации, разрабатываются необходимые наименее металлоемкие проектные решения по усилению и замене вышедших из строя конструкций, выбираются оптимальные методы производства работ. Поскольку эффективность реконструкции того или иного объекта во многом определяется величиной затрат на переделку существующих зданий и сооружений, не дающих непосредственного прироста мощности, искусство проектировщиков-металлистов состоит в изыскании путей продления жизни стальных конструкций с минимальным расходом материальных и трудовых ресурсов и в кратчайшие сроки. В этой связи особую важность приобретает тщательный анализ расчетных предпосылок, использование пластической и закритической стадии работы материала, учет возможностей пространственного перераспределения усилий и др.

Материалы по обобщению практики обследования стальных конструкций зданий и сооружений, положения разработанных нормативных и инструктивных документов и рекомендации по реконструкции, созданные ЦНИИПСК им. Мельникова совместно о другими проектными, научно-исследовательскими и учебными институтами и изложенные в этом справочнике, дают возможность выбора современного надежного решения металлических конструкций как для нового строительства, так и в случае реконструируемых сооружений, имеющих признаки физического или морального износа. Благодаря тесной связи научных исследований с актуальными потребностями проектирования и строительства, а также созданию теоретической и материальной базы научно-технического прогресса отечественное металлостроительство обогатилось многими зданиями и сооружениями, превосходящими уровень мировых достижений строительной техники по оригинальности решений, величине строительных параметров и экономичности, часть из которых нашла отражение в справочнике.

Как свидетельствует история, накопление достаточного задела новизны в теории и практике металлостроительства, и соответственно этому, потребность в очередном издании справочника проектировщика «Металлические конструкции» появляется с периодичностью 15-20 лет. За столь длительный период существования справочника в нормативные документы (СНиП, ГОСТ, ОСТ, СН, ВСН и др.) вносятся разной степени значимости усовершенствования и изменения, что приводит

к устареванию ссылок на них в справочнике, но не освобождает владельца справочника от необходимости отслеживать официально опубликованные изменения норм и стандартов и руководствоваться ими.

В настоящей редакции справочника полностью исключена перепечатка положений СНиП, ГОСТов, а также предельно сокращено количество ссылок на нормативные документы. Однако, следует иметь в виду, что болезненный для страны переход к рыночной экономике, потребовал новых подходов к формированию системы нормативных документов в строительстве. Особенно существенные нововведения в ближайшие годы связаны с выходом СНиП 10.01-94 «Система нормативных документов в строительстве. Основные положения», введенных в действие с 1 января 1995 года.

Этим документом определены основные цели, организационные и методические принципы и общая структура системы нормативных документов в строительстве. Основными задачами нормативных документов системы должны быть: защита прав и охраняемых законом интересов потребителей строительной продукции, общества и государства в вопросах безопасности жизни и здоровья людей, защиты природы, обеспечения соответствия строительной продукции своему назначению. Предусматривается повышение самостоятельности и развитие инициативы предприятий, организаций, а также отдельных специалистов при сокращении числа обязательных требований и увеличении доли норм рекомендательного характера. Структура включает в себя строительные нормы и правила (СНиП), государственные стандарты (ГОСТ), а также своды правил по проектированию и строительству (СП). Кроме того, оговорена возможность разработки территориальных строительных норм (ТСН), разработка технические условий (ТУ) и стандартов предприятий (СТП).

При пересмотре норм по расчету строительных конструкций и испытанию материалов предусмотрены сближение и гармонизация отечественных нормативных документов с международными стандартами (и в первую очередь с Еврокодом) и строительным Законодательством развитых стран мира.

Повышение ответственности и самостоятельности всех участников проектирования и строительства, предписываемые новой системой документов, обязывают каждого пользователя справочником проектировщика «Металлические конструкции» своевременно знакомиться, анализировать и учитывать в своей повседневной деятельности особенности каждого из вводимых в действие новых нормативных документов.

РАЗДЕЛ I

СТАЛИ, ПРОФИЛИ, СОЕДИНЕНИЯ

ГЛАВА 1

СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Строительство – одна из самых металлоемких отраслей народного хозяйства, значительная часть стали расходуется на изготовление металлоконструкций, из которых монтируются автодорожные и железнодорожные мосты, каркасы промышленных и гражданских зданий, мачты и башни антенных устройств, опоры линий электропередачи, резервуары и газгольдеры для хранения нефти, нефтепродуктов и газов, трубопроводы и многое другое. Все эти конструкции изготовляются на заводах металлоконструкций индустриальным методом из стального проката массового применения с использованием для соединений наиболее производительных способов сварки.

Успех в создании конструкций – возможность их индустриального изготовления, надежность и долговечность в эксплуатации, технико-экономическая эффективность во многом зависят от правильного выбора материала. В последние годы, благодаря совместным усилиям металлургов, металловедов и специалистов-сварщиков, улучшены существующие и разработаны новые эффективные марки стали и виды проката, значительно расширившие возможности проектирования. При этом были сформулированы определенные требования к стальному прокату для металлоконструкций.

Размеры поперечных сечений многих элементов металлоконструкций а следовательно, и их масса, определяются расчетом, непосредственно учитывающим прочностные свойства материала – предел текучести и временное сопротивление разрыву [1]. Поэтому повышение прочности стали – наиболее действенное средство снижения металлоемкости и стоимости таких конструкций. Кроме того, при существующем сортаменте металлопроката повышение прочности стали позволяет увеличить максимальный пролет и высоту сооружений, повысить расчетные нагрузки, что создает благоприятные предпосылки для дальнейшего развития новых прогрессивных конструктивных и архитектурных форм.

Вместе с тем при изготовлении конструкций и на монтаже сталь подвергается действию технологических операций: сварке, резке огневым и механическим способами, механической обработке, правке, гибке, вальцовке. При этом она не должна разрушаться, сохраняя, по-возможности, стабильность микроструктуры и механических свойств. В сварных конструкциях, изобилующих концентраторами напряжений, сталь при эксплуатации длительное время должна выдерживать большие нагрузки статические, динамические и переменные, часто при низких климатических температурах. Наконец, сталь не должна иметь чрезмерную стоимость или значительную стоимость изготовления из нее конструкций, т.е. в условиях конкурентной возможности применения в конструкциях разных материалов сталь должна быть экономически эффективной.

Анализ этих положений и накопительный опыт позволяют выделить пять основных служебных свойств, которыми в той или иной мере должна обладать строительная сталь: прочность, свариваемость, сопротивление хрупкому разрушению, сопротивление вязкому разрушению, технико-экономическая эффективность.

1.1.1. Прочность. Эффективность повышения прочности стали в части снижения массы конструкции может быть иллюстрирована примерами элементов тяжелого пролетного строения моста, каркаса промышленного здания, растянутых элементов конструкций (рис.1.1) [2]. За основу для сравнения принята наименее прочная углеродистая сталь обыкновенного качества с пределом текучести 230 МПа и временным сопротивлением 380 МПа. Из графика следует, что особенно интенсивное снижение массы конструкции наблюдается при относительном повышении прочности – до двух-, трехкратного уровня. При этом максимальное снижение массы достигается в сооружениях, в которых значительная часть несущей способности конструкции расходуется на поддержание собственного веса, например в элементах тяжелого пролетного строения; хорошие результаты дает использование высокопрочной стали в элементах, испытывающих растяжение, несколько худшее в конструкциях, включающих сжато-изогнутые элементы. Не удается получить снижения массы при повышении прочности стали в элементах с малой жесткостью и большой деформативностью, рассчитываемых по второй группе предельных состояний, а также в сжато-изогнутых элементах с большой гибкостью. Не достигается оно и в элементах сварных конструкций, испытывающих интенсивные переменные силовые воздействия с большим числом циклов нагружения и малой асимметрией циклов.

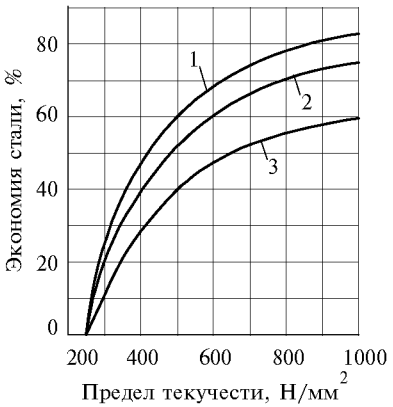


Рис.1.1. Снижение массы элементов металлоконструкций при замене углеродистой стали Ст3 сталью с более высоким пределом текучести

1 – тяжелое пролетное строение; *2* – растянутые элементы конструкций; *3* – каркас промышленного здания

Из этого следует, что наиболее эффективными в части снижения массы (и стоимости) могут оказаться комбинированные конструкции, включающие элементы из сталей разных уровней прочности, которые выбираются, исходя из условий нагружения и конструктивных особенностей элементов.

На основании приведенных представлений в государствах бывш. СССР для проката строительных сталей с учетом возможности упрочнения (при удовлетворении требований к другим служебным свойствам) были выбраны семь основных унифицированных уровней прочности, которым соответствует предел текучести не менее 225, 285, 325, 390, 440, 590 и 735 МПа и временное сопротивление разрыву не менее 375, 430, 450, 510, 590, 685 и 830 МПа соответственно.

1.1.2. Свариваемость. Традиционный способ повышения прочности стали состоит в увеличении содержания углерода и легирующих элементов. Установлено, однако, что при этом возрастает опасность появления в околошовной зоне закалочных микроструктур, хрупких холодных трещин и трещин задержанного хрупкого разрушения. Действие углерода в этом отношении особенно отрицательно. Влияние легирующих элементов и примеси выражают количественно сравнением с

влиянием углерода. Предложено несколько десятков формул углеродного эквивалента $C_э$. Наиболее признанными из них являются следующие четыре, в которых $C_э$ выражают содержанием углерода и соответствующих легирующих элементов, % по массе:

1) формула Международного института сварки (МИС) [3]

$$C_{э_1} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}; \quad (1.1)$$

2) формула стандарта WES 135 японского общества сварщиков [4]

$$C_{э_2} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13}; \quad (1.2)$$

3) формула Ито и Бессио [5]

$$C_{э_3} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B; \quad (1.3)$$

ее авторы полагают, что формула справедлива в диапазоне содержаний 0,07–0,22 % C, 0–0,6 % Si, 0,4–1,4 % Mn, 0–0,5 % Cu, 0–1,2 % Ni, 0–1,2 % Cr, 0–0,7 % Mo, 0–0,12 % V, 0–0,005 % B;

4) формула Юриоки, Оситы и Тамехиро [6]

$$C_{э_4} = C + A(C)\left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + V + Nb}{5} + 5B\right); \quad (1.4)$$

где сомножитель $A(C)$, отражающий влияние повышения содержания углерода на усиление совместного действия легирующих элементов, имеет величину $A(C) = 0{,}75 + 0{,}25\ \mathrm{th}[20(C - 0{,}12)]$.

Полагают, что при расчете по формулам (1.1), (1.2) и (1.4) при $C_э \le 0{,}35$ сварка стали не вызывает затруднений, при $0{,}35 \le C \le 0{,}6$ требуются возрастающие технологические меры предосторожности, при $C_э > 0{,}6$ вероятность появления трещин без осуществления специальных мер опасно увеличивается. При расчете по формуле (1.3) этим ситуациям соответствуют меньшие значения $C_э$.

Кроме того, образование закалочных микроструктур и связанных с ними трещин зависит от скорости охлаждения металла шва и околошовной зоны, на которую влияют тепловые параметры сварки (тепловложение, начальная температура) и конструктивные особенности соединения (форма, толщина). При сварке стали с одним и тем же углеродным эквивалентом с возрастанием скорости охлаждения вероятность образования закалочных микроструктур увеличивается, что находит отражение в монотонном росте максимальной твердости в околошовной зоне. Поэтому ограничение максимальной твердости некоторой критической величиной может служить хорошим критерием для выбора стали и условий ее применения. Так в японских стандартах на сталь для сварных конструкций, помимо ограничений по углеродному эквиваленту, с 70-х годов введено ограничение по максимальной твердости в околошовной зоне: не свыше 350 HV.

Следует также иметь в виду, что в прокате каждой промышленной марки стали содержание элементов может изменяться в определенном (часто весьма широком) интервале марочных составов. В соответствии с этим и углеродный эквивалент стали каждой марки также может варьироваться в весьма широких пределах. Это наглядно иллюстрирует табл.1.1, содержащая подсчеты $C_э$ для марочных составов сталей, применяемых в сварных конструкциях. В ней приведены средние значения и пределы изменения $C_э$ для ряда отечественных строительных сталей. Они рассчитаны по четырем формулам с учетом вариации содержания элементов в пределах марочных составов (включая допускаемые отклонения в готовом прокате).

Формулы (1.1) и (1.2) дают близкие значения $C_э$; по формуле (1.3) значения $C_э$ существенно ниже; по формуле (1.4) значения $C_э$ в большинстве случаев занимают промежуточное положение.

Таблица 1.1. Значения углеродного эквивалента, рассчитанные для разных строительных сталей по формулам (1.1)–(1.4)

Сталь марки	Углеродный эквивалент*, % по массе			
	$C_{Э_1}$	$C_{Э_2}$	$C_{Э_3}$	$C_{Э_4}$
ВСт3сп	$\frac{0,18-0,45}{0,31}$	$\frac{0,19-0,47}{0,33}$	$\frac{0,14-0,3}{0,22}$	$\frac{0,17-0,38}{0,28}$
09Г2	$\frac{0,29-0,57}{0,43}$	$\frac{0,29-0,6}{0,45}$	$\frac{0,14-0,29}{0,22}$	$\frac{0,19-0,52}{0,33}$
09Г2С	$\frac{0,27-0,56}{0,42}$	$\frac{0,29-0,6}{0,45}$	$\frac{0,14-0,3}{0,22}$	$\frac{0,19-0,51}{0,33}$
15ХСНД	$\frac{0,29-0,6}{0,44}$	$\frac{0,29-0,62}{0,46}$	$\frac{0,17-0,35}{0,26}$	$\frac{0,23-0,61}{0,42}$
10ХСНД	$\frac{0,3-0,6}{0,45}$	$\frac{0,32-0,62}{0,47}$	$\frac{0,17-0,32}{0,24}$	$\frac{0,21-0,54}{0,35}$
14Г2АФ	$\frac{0,3-0,63}{0,46}$	$\frac{0,3-0,66}{0,47}$	$\frac{0,17-0,37}{0,27}$	$\frac{0,23-0,66}{0,45}$
16Г2АФ	$\frac{0,33-0,69}{0,51}$	$\frac{0,33-0,69}{0,51}$	$\frac{0,19-0,39}{0,29}$	$\frac{0,29-0,7}{0,51}$
12Г2СМФ	$\frac{0,31-0,65}{0,48}$	$\frac{0,32-0,69}{0,50}$	$\frac{0,16-0,34}{0,25}$	$\frac{0,21-0,62}{0,38}$
12ГН2МФАЮ	$\frac{0,36-0,72}{0,54}$	$\frac{0,31-0,69}{0,50}$	$\frac{0,16-0,34}{0,25}$	$\frac{0,22-0,63}{0,39}$

* Над чертой— минимальное и максимальное значение, под чертой— среднее.

Для большинства сталей минимальные и средние значения $C_э$ по табл.1.1 соответствуют удовлетворительной свариваемости. Однако для верхних пределов марочных составов значения $C_э$ опасно увеличены. Это обусловлено существующими в металлургической практике весьма широкими допусками на марочный состав. Между тем за рубежом часто предлагаются стали такого же уровня прочности с жестко ограниченным углеродным эквивалентом, например, не более 0,40 %. Важно также знать фактическое распределение $C_э$ для каждой марки стали. Однако данные об этом, как правило, отсутствуют.

Помимо вероятности образования в околошовной зоне холодных трещин и трещин задержанного хрупкого разрушения от качества строительной стали зависят также вероятность образования при сварке горячих (кристаллизационных) трещин в металле шва и ламелярных (слоистых) трещин в окружающем шов металле. На образование кристаллизационных трещин во многом влияет состав основного металла и его количество, переходящее в металл шва. Считают, что кристаллизационные трещины в угловых швах при сварке под флюсом могут образовываться, если содержание элементов в металле шва превосходит следующие пределы: углерода – 0,14 %, кремния – 0,25 %, серы – 0,045 %, фосфора 0,05 %. Для проката с ликвационной неоднородностью как, например, из кипящей стали, появление кристаллизационных трещин наиболее вероятно.

В образовании слоистых трещин главную роль играет загрязненность основного металла вытянутыми и строчечными неметаллическими включениями. Наиболь-

шее значение имеют сернистые включения. Оказывают влияние также химический состав стали и содержание в металле шва водорода. Более подробно о слоистых трещинах см. в п.1.8.

Проблема свариваемости включает в себя также склонность стали к локальному ухудшению под влиянием сварки основных эксплуатационных характеристик. Это, в первую очередь, снижение хладостойкости, обусловленное образованием грубой неоднородной микроструктуры, динамическим деформационным старением, твердением вследствие выделения дисперсных карбонитридных частиц. Оно выражается в смещении температуры хрупкости в сторону положительных температур.

При сварке термически или термомеханически упрочненной стали возможно локальное разупрочнение [7–9]. Оно обусловлено совместно протекающими отпуском и фазовой перекристаллизацией. Локальное разупрочнение выявляется измерением твердости и обычно находится в пределах 10–30 % твердости исходного основного металла.

Предложено много способов экспериментальной оценки свариваемости, включая механизированные способы испытаний в условиях имитированных термодеформационных циклов сварки [10, 11]. Однако их применение необходимо только при разработке новых сталей или при использовании существующей стали в той области, в которой она ранее не применялась. Для проката традиционных свариваемых сталей при их обычном использовании достаточной гарантией свариваемости является соответствие химического состава и механических свойств нормам технических условий и стандартов.

1.1.3. Сопротивление хрупкому разрушению. Другим фактором, ограничивающим выбор стали для сварных металлоконструкций и, в частности, препятствующим дальнейшему повышению ее прочности обычным легированием (например, кремнием), является требование хладостойкости. Для строительной стали с ним ассоциируется сопротивление хрупкому разрушению микросколом. При этом виде разрушения зерна металла раскалываются по определенным кристаллографическим плоскостям с образованием в изломе характерных «кристаллических» фасеток и «ручьистого узора». Размер фасеток близок к размеру зерен в плоском сечении шлифа.

Разрушения этого вида особенно опасны, так как происходят внезапно, распространяясь с высокой скоростью без заметной макропластической деформации, часто даже при весьма низких напряжениях от рабочей нагрузки. Сварные конструкции подвержены хрупкому разрушению микросколом более других. Этому способствует концентрация напряжений, структурная и механическая неоднородность, неразъемность и наличие высоких сварочных напряжений.

Хладостойкость элемента конструкции определяется температурой хрупкости, при которой возможен переход от предполагаемого вязкого разрушения к хрупкому разрушению микросколом. На эту температуру влияют как физические свойства стали (предел текучести, микроструктура), так и «внешние» условия нагружения (напряжение, жесткость напряженно-деформированного состояния, величина и скорость деформации). Чтобы разобраться в их взаимодействии целесообразно принять во внимание сильную зависимость предела текучести железа и его сплавов от температуры и скорости деформации. При постоянной скорости деформации температурную зависимость продела текучести можно выразить приближенным соотношением

$$\sigma_{\text{т}}(\text{T}) = \sigma_0 e^{-\beta T} + k_{\text{т}} d^{-1/2}, \qquad (1.5)$$

где d – средний диаметр зерна микроструктуры; $k_{\text{т}}$, β – коэффициенты не зависящие от температуры; σ_0 – предел текучести стали с бесконечно большим диаметром зерна при абсолютной температуре T, равной 0 °К.

Прогнозировать хладостойкость конструкции можно с помощью представлений о силовом критерии, развитом Л.А. Копельманом [12] на базе работ А.Ф. Иоффе, Н.Н. Давиденкова, Я.Б. Фридмана и Г.В. Ужика, предполагающем, что разрушение возникает при одновременном наступлении текучести в некоторой локальной области материала и достижении растягивающим напряжением σ_1 некоторой критической величины $S_{мс}$:

$$\sigma_i \geq \sigma_т \ , \ \sigma_1 \geq S_{мс} \ , \tag{1.6}$$

где σ_i – интенсивность напряжений; $S_{мс}$ – напряжение микроскола – важная характеристика сопротивления стали хрупкому разрушению, в отличие от предела текучести она мало зависит от температуры и других условий нагружения, но чувствительна к микроструктуре и может быть выражена простой функцией величины зерна [13].

$$S_{мс} = k_s d^{-1/2}, \tag{1.7}$$

где k_s – коэффициент.

Используя уравнения (1.5), (1.6), (1.7), можно получить уравнение температуры хрупкости – перехода в данной локальной области нагружаемого элемента от вязкого разрушения к разрушению микросколом [14]

$$T_к = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\sigma_0}{q k_s d^{-1/2} - k_т d^{-1/2}}, \ [°K], \tag{1.8}$$

где $q = \sigma_i / \sigma_1$ – фактор жесткости напряженно-деформированного состояния.

Уравнение в этом виде, хотя и не отражает прямо всех влияющих факторов (например величины и скорости пластической деформации), однако наглядно вскрывает взаимосвязь влияния как внешних условий нагружения, так и физических свойств стали, ее прочности и микроструктуры. В этом уравнении для «мягкой» стали с феррито-перлитной микроструктурой коэффициенты $\beta = (6...8)\ 10^{-3}$ град$^{-1}$; $k_т \cong 19{,}6$ Н/мм$^{3/2}$, $k_s \cong 177$ Н/мм$^{3/2}$; для углеродистой стали $\sigma_0 = 981$ Н/мм^2; фактор q при одноосном растяжении равен 1, при наличии предельно острого концентратора напряжений – 1/3, при испытании на изгиб образцов с треугольным надрезом типа Шарпи ~ 0,6.

Весьма велика роль особенностей внешнего нагружения. Согласно уравнению (1.8) переход от условий растяжения гладкого образца ($q = 1$) к растяжению элемента с острым концентратором напряжений ($q = 1/3$) повышает T_k строительной стали на 170–200 °С.

Из уравнения (1.8) также следует, что любой из факторов, упрочняющих сталь и вызывающих увеличение σ_0 (возрастание содержания элементов в твердом растворе, наклеп, старение, радиационное упрочнение и др.) повышает T_k , т.е. охрупчивает материал, а измельчение зерна микроструктуры d, напротив, снижает T_k т.е. повышает хладостойкость. Следовательно, непременным условием сохранения хладостойкости при повышении прочности является измельчение микроструктуры.

На основании исследований особенностей хрупкого разрушения микросколом предложено много способов экспериментальной оценки хладостойкости стали и металла сварных соединений. Почти все они предусматривают многократные (сериальные) испытания одинаковых (для данного способа) по размерам и форме образцов, но при разных температурах. Показателем качества служит температура, при которой контролируемый признак (поглощенная работа, доля волокна в изломе, сужение под надрезом, разрушающее напряжение и т.п.) по мере проявления хрупкости с понижением температуры достигает некоторой нормируемой величины.

Приведем некоторые основные методы, получившие наибольшее распространение:

- испытание на динамический изгиб стандартных (призматических) образцов по ГОСТ 9454-78* с полукруглым ($r = 1$ мм) или треугольным ($r = 0{,}25$ мм) надрезами, а также с концентратором в виде трещины усталости;
- испытание на растяжение или изгиб крупных плоских (листовых) образцов натурной толщины с глубокими надрезами или трещинами усталости на кромках;
- испытание падающим грузом на изгиб (в плоскости наименьшей жесткости) листовых образцов натурной толщины по Пеллини (DWT);
- испытание падающим грузом на изгиб (в плоскости наибольшей жесткости) листовых образцов натурной толщины по методике института Баттеля (DWTT);
- определение температуры остановки инициированной трещины (ТОТ) на крупных составных листовых образцах натурной толщины по Робертсону или испытаниями «на двойное растяжение».

Наряду с концепцией переходной (критической) температуры, широко используемой в механике хрупкого разрушения, разработаны и получили значительное развитие аналитические методы, основанные на рассмотрении поля упругих напряжений в вершине трещины. При этом для оценки сопротивления строительных сталей хрупкому разрушению применяются энергетические, силовые и деформационные критерии механики разрушения. С использованием указанных критериев представляется возможным установить связь между разрушающим (или допустимым) напряжением и размером трещины, которая гипотетически может присутствовать в конструкции. Вместе с тем механика разрушения призвана дать обоснованную методику лабораторных испытаний, результаты которых можно было бы переносить на элементы конструкции.

Основным критерием механики разрушения служит коэффициент интенсивности напряжений K, предложенный Ирвином (США), как параметр, определяющий поле упругих напряжений перед фронтом трещины, и является функцией приложенного напряжения и формы трещины. В упругой области для трещины в бесконечно широкой пластине, нагруженной нормальными напряжениями, направленными перпендикулярно трещине, выражение для коэффициента K имеет вид

$$k = \sigma\sqrt{\pi l}, \tag{1.9}$$

где σ – номинальное напряжение; l – половина длины центральной сквозной трещины.

При других формах тел и расположении трещин, а также при переходе к телам ограниченных размеров и изменении характера распределения номинальных напряжений в формулу (1.9) вводится соответствующая поправочная функция

$$k = \sigma\sqrt{\pi l}\, f_k,$$

Функция f_k может быть определена либо аналитически, либо из таблиц, составленных для наиболее распространенных типов образцов (по стандарту E-399-81 ASTM и ГОСТ 25.506-85 на методы испытания сталей на трещиностойкость). При достижении напряжениями критических значений $\sigma_{кр}$ (момент нестабильного разрушения) коэффициент интенсивности напряжений также достигает критического для данного материала значения: $k_c = \sigma_{кр}\sqrt{\pi l}$. При наиболее жестком напряженном состоянии, известном как «плоская деформация», критическое значение коэффициента интенсивности напряжений обозначается k_{1c} ; k_c, k_{1c} являются, таким образом, характеристиками материала, которые определяются его способностью

сопротивляться распространению трещины. Ниже представлены значения k_{1c}, МПа $\cdot$ М$^{1/2}$ для некоторых применяемых в строительстве марок сталей:

Сталь марок:

Ст3сп	60–80
09Г2С	65–90
10Г2С1	75–90
10ХСНД	100–120
16Г2АФ	110–130

Зная значение k_{1c} для выбранной марки стали, проектировщик может рассчитать значение напряжения, вызывающее нестабильное разрушение при наличии дефекта определенного размера и формы при наиболее жестком напряженном состоянии.

По Ирвину распространение хрупкой трещины происходит, когда расход энергии на ее распространение G (при плоском напряженном состоянии) достигает критического значения G_c, называемого вязкостью разрушения и характеризующего скорость освобождения энергии упругой деформации пластины при образовании новых поверхностей разрушения:

$$G_c = dA / dl, \tag{1.10}$$

где $A = P\Delta l / 2$ – работа внешних сил; Δl – удлинение пластины под действием силы P.

Установлено, что достижение критического состояния по энергии продвижения трещины G_c эквивалентно достижению критического состояния по коэффициенту интенсивности напряжений

$$k_{1c} = \sqrt{G_0 E}, \tag{1.11}$$

где E – модуль упругости.

Деформационный критерий хрупкого разрушения, предложенный Уэлсом, представляет собой критическое раскрытие трещины δ_c, которое при достижении напряжениями критического значения $\sigma_{кр}$ ($\sigma_{кр} < \sigma_{0,2}$) записывается в виде

$$\delta_c = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_т} \frac{\sigma_{кр} \pi l}{E}. \tag{1.12}$$

В области температур ниже второй критической (t_{k2}), где предельные нагрузки и деформации зависят слабо от температуры, но в значительной степени от уровня концентрации напряжений, размеров дефектов и характера нагружения при условии $\sigma_{кр} << \sigma_т$, значение критического раскрытия трещины связано с энергетическим и силовым критерием разрушения соотношением

$$\delta_c = \frac{k_{1c}}{\sigma_т E} = \frac{G_c}{\sigma_т}. \tag{1.13}$$

При разрушающих напряжениях, близких к пределу текучести, выражение для критического раскрытия трещины получается из решения соответствующей упругопластической задачи. Так, для пластины с клиновидной узкой пластической зоной на продолжении трещины (модель, предложенная Дагдейлом) выражение для δ_c имеет вид

$$\delta_c = \frac{8\sigma_т l}{\pi E} \ln \sec \frac{\pi \sigma_{кр}}{\sigma_т}. \tag{1.14}$$

В условиях, близких к плоской деформации, когда $\sigma_{кр} << \sigma_т$ формулы (1.12) и (1.14) дают одинаковое значение δ_c.

Для определения условий разрушения на участке, претерпевающем одновременно упругую и пластическую деформацию, в качестве критерия разрушения может быть использован энергетический интеграл Райса I_c. Для линейного и нелинейного упругих состояний I-интеграл представляет собой энергию в области вершины трещины, приходящуюся на единичное смещение трещины. Это означает, что I-интеграл эквивалентен движущей силе трещины

$$I = G = k^2 / E \tag{1.15}$$

а в предельном случае

$$I_{1c} = G_{1c} = k_{1c}^2 / E \tag{1.16}$$

В случае тонкой пластической зоны перед фронтом трещины предельное значение I-интеграла связано со значением критического раскрытия трещины соотношением

$$I_{1c} = \sigma_0 \delta_c , \tag{1.17}$$

где σ_0 – напряжение на границе пластической зоны.

При плоской деформации критерии разрушения имеют наименьшее значение, поскольку, благодаря механической стесненности, макроскопические деформации в вершине трещины практически отсутствуют. В металлоконструкциях указанное напряженное состояние реализуется в зонах с конструктивной концентрацией напряжений в элементах достаточно большой толщины при минимальных температурах эксплуатации.

При плоском напряженном состоянии нестабильности трещины предшествует заметная локальная пластическая деформация, которая учитывается введением поправки на пластичность в выражении для k_0.

Рассмотренные выше критерии механики разрушения k_{1c}, G_{1c}, δ_c, I_{1c} находятся для данного материала экспериментально при соответствующих условиях нагружения и служат характеристиками сопротивления этого материала разрушению при наличии трещины. Поскольку значения каждого из рассмотренных силовых и деформационных критериев существенно зависят от геометрии образцов и условий нагружения, важное значение имеет определение их в условиях, максимально приближенных к эксплуатации.

В последнее время в связи с развитием механики разрушения предложены методы и образцы с концентраторами напряжений в виде усталостных трещин для определения характеристик сопротивления разрушению (трещиностойкости) стали в терминах механики разрушения: критического коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины при плосконапряженном и плоскодеформированном напряженном состояниях k_c и k_{1c} , критического раскрытия трещины δ_c , I_{1c} – интеграла и др. Эти образцы по ГОСТ 25506-85 при оценке хладостойкости стали также испытываются сериями при разных температурах, причем вычисляют температурные зависимости типа k_c, $k_{1c}(T)$, $\delta_c(T)$, $I_{1c}(T)$ и др. Считают, что эти данные надежнее других позволяют прогнозировать поведение материала в конкретной конструкции, содержащей предполагаемый дефект в виде трещины.

Естественно, возникает вопрос о соотношении оценок, полученных разными методами. Кроме того, при испытании образцов в большинстве методов возможна оценка хладостойкости не по одной, а по нескольким характеристикам. Так, при стандартных испытаниях на динамический изгиб измеряемыми характеристиками могут служить поглощенная работа (ударная вязкость) KC, доля волокна в изломе B, относительное сужение под надрезом ψ.

В некоторых работах установлено, что между температурами хрупкости, полученными в стандартных и других испытаниях, имеется устойчивая корреляционная

связь. Не менее устойчивая связь наблюдается между температурами хрупкости, полученными с помощью разных критериев в одних и тех же стандартных испытаниях. Это наглядно иллюстрирует табл.1.2, в которой приведены данные французских исследователей (по результатам испытаний свариваемых углеродистых и низколегированных сталей 62 вариантов химического состава) [15]. Во всех случаях имеет место хорошее линейное соотношение между температурами хрупкости с высокими значениями коэффициента корреляции.

Таблица 1.2. Соотношение между температурами хрупкости, определенными на основании разных методов испытаний и критериев

Метод и критерии	Уравнение линии регрессии	Коэффициент корреляции	Число пар связанных переменных
Шарпи KCV=0,5KCV^{max} – Шарпи KCV=35 Дж/см^2	$T^{M}_{0,5KCV} = 10 + 0,9 \cdot T_{35}$	0,91	124
Шарпи B=50% – Шарпи KCV=35 Дж/см^2	$T_{50} = 26 + 0,99 \cdot T_{35}$	0,87	92
Шарпи KCV=0,5KCV^{max} – Шарпи B=50%	$T_{50} = 8 + 1,09 \cdot T^{max}_{0,5KCV}$	0,97	67
Робертсон – Шарпи KCV=35 Дж/см^2	$\text{ТОТ} = 17 + 0,64 \cdot T_{35}$	0,9	56
Пеллини – Шарпи KCV=35 Дж/см^2	$\text{ТНП} = 16 + 0,51 \cdot T_{35}$	0,8	67
Баттель – Шарпи KCV=35 Дж/см^2	$T^{DWTT}_{50} = 30 + 0,04 \cdot T_{35}$	0,86	36
Шнадт – Шарпи KCV=35 Дж/см^2	$T^{Ш}_{3} = 32 + 0,98 \cdot T_{35}$	0,94	55

Не являются исключением в этом отношении и методы испытаний для определения характеристик механики разрушения. Многими работами показано, что температурные зависимости критических значений коэффициента интенсивности напряжений k_c, $k_{1c}(T)$, кривые которых для сталей с разной хладостойкостью располагаются в разных участках температурной шкалы, закономерно сливаются в одну узкую полосу рассеяния, если в качестве абсциссы используют так называемую «избыточную температуру», т.е. разность между температурой испытания и температурой хрупкости, определенной с помощью стандартных испытаний на динамический изгиб [16, 17].

Таким образом стандартные испытания позволяют достаточно надежно расположить строительные стали в некоторый ряд по хладостойкости, не уступая в этом отношении другим методам. Значительно труднее решить вопрос о пригодности материала для конкретной конструкции. Одно только положение материала в вышеупомянутом ряду для этого недостаточно. Особенности воздействия на материал при испытании образцов отличаются от условий его работы в конструкциях. Хладостойкость конструкции зависит от совместного действия многих конструктивных, эксплуатационных, металлургических и технологических факторов.

На практике требования к материалу конструкции по хладостойкости обычно устанавливаются на базе накопленного опыта, а также сравнением результатов стандартных испытаний с результатами испытаний натурных образцов, по возможности полно имитирующих поведение конструкции. Так, к требованиям, обусловленным опытом, можно отнести действующие нормы ударной вязкости углеродистой стали для строительных металлоконструкций, эксплуатируемых в обычных условиях при расчетной температуре не ниже минус 40 °С KCU$^{-20^\circ} \geq 29$ Дж/см^2 и низколегированной стали KCU$^{-40^\circ} \geq 29$–49 Дж/см^2 соответственно, а также низколегированной стали для конструкций «северного исполнения»

$KCU^{-70^\circ} \geq 29$ Дж/см^2. Нормы ударной вязкости $KCV^t \geq 78$ Дж/см^2 и доли волокна в изломе $B^t \geq 80$ % (где t – температура эксплуатации) низколегированной стали для труб магистральных газопроводов, напротив, установлены сравнением результатов стандартных испытаний и испытаний натурных образцов труб.

1.1.4. Сопротивление вязкому разрушению. Выражается такими характеристиками, как предельная пластичность (ε_k, ψ, δ_k) ударная вязкость при вязком разрушении KC_{max}, анизотропия вязкости и пластичности, истинное сопротивление разрыву (S_k). Оно очень важно для обеспечения надежной эксплуатации ответственных сооружений типа оболочек, нагруженных пневматическим давлением (газопроводы большого диаметра и высокого давления, газгольдеры и резервуары большого объема, крупногабаритные сосуды давления в виде кожухов доменных печей, оболочек аэродинамических труб, корпусов воздухонагревателей), особенно при изготовлении их из сталей повышенной и высокой прочности. Кроме того, сопротивление вязкому разрушению во многом определяет возможность выполнения технологических операций холодной гибки, штамповки, вальцовки, правки и сварки.

Установлено, что вязкое разрушение зарождается и распространяется путем образования, роста и объединения микроскопических пустот (пор). В чистых металлах и сплавах поры образуются в заключительной стадии деформирования на «критических» дефектах решетки, подготовленных деформированием. В технических сплавах значительную роль в образовании пор играют также неметаллические включения и выделения избыточных фаз. Неметаллические включения из-за их слабого сцепления с матрицей или хрупкости приводят к возникновению несплошностей уже на ранних этапах деформирования. Они являются источниками наиболее крупных пор. Другие более мелкие поры, как и в чистых металлах, развиваются на заключительных стадиях деформирования, по-видимому, непосредственно перед вершиной формирующейся вязкой магистральной трещины. Считают, что заключительный акт роста и слияния пор аналогичен развитию внутренних шеек, причем окончательный разрыв фибр происходит после уменьшения их поперечного сечения до нуля.

В результате возникает характерная микроструктура поверхности вязкого разрушения, состоящая из округлых ямок или «чашек», разделенных острыми гребнями. Внутри наиболее крупных чашек наблюдаются неметаллические включения. Полагают, что размеры чашек, их однородность и, главное, глубина отражают энергоемкость вязкого разрушения: чем больше размеры чашек, однороднее их распределение и значительнее глубина, тем выше величина локальной пластической деформации и энергоемкость.

Как и при хрупком разрушении, измельчение зерна микроструктуры повышает сопротивление вязкому разрушению строительной стали. Однако определяющая роль принадлежит неметаллическим включениям. При этом разрозненные включения компактной или глобулярной формы, даже при высоком их содержании (до 0,5–1 % по объему) слабо изменяют механические свойства стали. Значительно сильнее отрицательное влияние вытянутых и строчечных включений [18].

Наибольшее значение для качества металлопроката строительной стали имеют образующиеся при раскислении и затвердевании сульфидные и кислородные неметаллические включения (эндогенные сульфиды и оксиды). В хорошо раскисленной стали они представлены в основном включениями сульфида марганца (II и III типов по классификации Симса) и глинозема. Горячая прокатка придает пластичным при высокой температуре включениям сульфида марганца сильно вытянутую в плоскости и направлении деформирования форму. Сегрегации мелких включений глинозема, представляющих, как полагают, обломки первичных выделений

развитой дендритной формы, преобразуются прокаткой в плоские или вытянутые скопления, часто весьма большой протяженности.

Эти вытянутые и строчечные включения являются главной причиной анизотропии вязкости и пластичности металлопроката, которая выражается в заметном снижении показателей этих свойств при переходе от испытаний в продольном направлении к испытанию в поперечном и в резком их падении при переходе к испытанию в направлении вдоль толщины изделия (рис.1.2).

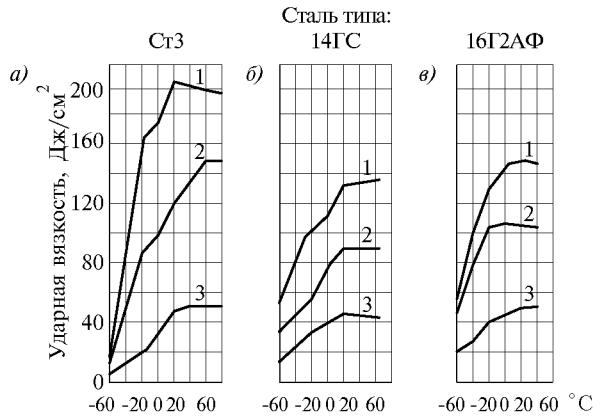


Рис.1.2. Температурная зависимость ударной вязкости для образцов, вырезанных в разных направлениях из толстых листов строительных сталей разный марок

а – сталь типа Ст3; *б* – 14ГС, *в* – 16Г2АФ; *1* – в продольном; *2* – в поперечном; *3* – в направлении толщины

Особенно сильно анизотропия пластичности проявляется в металлоизделиях, полученных контролируемой прокаткой и термо-механической обработкой. В этой новой технологии горячее деформирование при пониженных температурах сообщает сульфидам марганца максимальную вытянутость. При разрушении таких изделий образуются слоистые изломы, которые, хотя и понижают температуру хрупкости по виду излома (так называемый сульфидный парадокс), однако резко уменьшают энергоемкость вязкого разрушения. Это особенно нежелательно для упомянутых конструкций типа оболочек, нагруженных пневматическим давлением, от которых требуется высокое сопротивление распространению протяженных «быстрых» вязких разрушений.

Как уже отмечалось, анизотропия пластичности сильно ограничивает пригодность стали к операциям холодной гибки, штамповки, глубокой вытяжки, завальцовки, способствуя преждевременному образованию трещин. Но наиболее губительно она сказывается на образовании ламелярных (пластинчатых) или слоистых трещин при сварке. Они возникают в основном металле вблизи сварных швов под воздействием напряжений и термодеформационных циклов сварки и имеют характерное ступенчатое строение (рис.1.3). Эти трещины часто поражают участки конструкции большой протяженности вдоль сварных швов (например в полке мостовой балки), нередко приводя в негодность все изделие. Согласно статистике с ламелярными трещинами связан большой ежегодный материальный ущерб в мировом производстве металлоконструкций, обусловленный непроизводительными затратами на устранение их последствий.

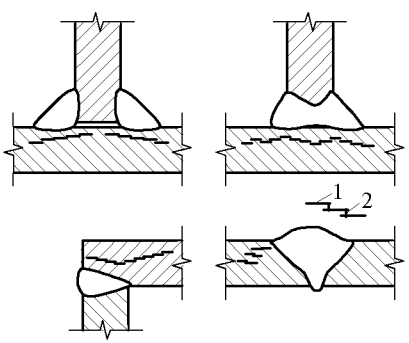


Рис.1.3. Расположение ламелярных (слоистых) трещин в сварных соединениях разной формы

1 – «террасы»; *2* – «разрывы»

Установлено, что для уменьшения анизотропии вязкости и пластичности следует добиваться по-возможности более низкого содержания в стали серы (например, не выше 0,010 %) и кислорода. Когда этого недостаточно (особенно для проката толщиной менее 20 мм с большой вытяжкой в одном направлении, в частности, для широкополосной стали) прибегают к направленному воздействию на химический состав, форму, размеры и распределение неметаллических включений – модифицированию [19]. Равномерно распределенные сульфидные включения компактной формы, слабо деформируемые при прокатке, образуются при введении в сталь небольших добавок металлов-модификаторов: циркония, титана, редкоземельных элементов (РЗМ) или кальция, а также модификаторов металлоидов: теллура или селена. Наиболее благоприятные результаты получают при модифицировании кальцием и его соединениями, а также кальцием в сочетании с РЗМ, так как в этом случае одновременно с модифицированием сульфидных включений достигается наиболее полное удаление включений глинозема.

Для оценки сопротивления стали вязкому разрушению пригодны характеристики предельной пластичности (ε_k, σ, ψ) и истинное сопротивление разрыву (S_k), получаемые при испытании на растяжение, в том числе на образцах, вырезанных из проката в направлении толщины, полные диаграммы деформирования в координатах истинные напряжения – истинные деформации, а также уровень ударной вязкости при вязком разрушении («верхнее плато» на температурной зависимости ударной вязкости).

1.1.5. Технико-экономическая эффективность применения того или иного варианта строительной стали в металлоконструкциях определяется в основном показателями двух категорий, отражающими изменение массы конструкций и изменение их стоимости. Возможность снижения массы конструкции при повышении прочности стали уже рассматривалась ранее. Однако одно только снижение массы конструкции в большинстве случаев еще не является достаточным стимулом для применения более прочной стали. Другое непременное условие – получение экономического эффекта.

Стоимость стали повышенной и высокой прочности, как правило, выше стоимости традиционной углеродистой стали, поэтому замена будет рентабельной только в том случае, если возможное удорожание металла перекроется экономией в результате снижения массы конструкции. При этом, вопреки распространенному мнению, достигаемое здесь удешевление обусловлено не только тем, что с уменьшением массы конструкции снижается стоимость израсходованного материала, а в значительной мере также и тем, что с уменьшением массы почти пропорционально[1] снижаются затраты на изготовление, транспортировку, окраску и монтаж конструкции.

Экономический эффект применения нового материала в конструкциях обычно подсчитывают методом приведенных затрат, включая три следующих этапа [20, 21]:

- определение удельного (и общего) изменения массы металла, обусловленного применением более эффективной стали вместо традиционной;
- расчет удельной стоимости металлоконструкций «в деле» при изготовлении их из традиционной и новой стали;
- определение изменения стоимости металлоконструкций «в деле» для эквивалентного количества традиционного и нового материала (собственно экономический эффект).

[1] Пропорциональность нарушается некоторым повышением трудоемкости изготовления и монтажа конструкции.

Правильно оценить технико-экономическую эффективность, как характеристику данного материала (мало зависящую от его относительного количества), можно путем отнесения полученной экономии к массе элемента, в котором эта сталь применена. Причем методически удобно производить сравнение с массой элемента, получаемой при изготовлении его из нового более эффективного материала (стали повышенной или высокой прочности). При этом снижение массы конструкции определяется коэффициентом приведения $k_н$ или коэффициентом экономии массы $q_н$, зависящими от расчетных сопротивлений традиционного (т) и нового (н) материалов:

$$k_н = G_т / G_н \tag{1.18}$$

$$q = (G_т - G_н) / G_н = k_н - 1 \tag{1.19}$$

Применительно к конструкциям, в которых можно пренебречь влиянием изменения массы элементов на расчетную нагрузку, для расчетных элементов, испытывающих растяжение или сжатие, коэффициент $k_н$ может быть записан в виде:

$$k_н = R_н / R_т; \tag{1.20}$$

для поперечно-изогнутых элементов компактного квадратного или круглого сечений

$$k_н = \sqrt[3]{(R_н / R_т)^2}\ ; \tag{1.21}$$

то же, но для элементов прямоугольного сечения с одинаковой шириной

$$k_н = \sqrt{R_н / R_т}\ ; \tag{1.22}$$

для сжато-изогнутых (продольно-изогнутых) элементов

$$k_н = \frac{\varphi_н R_н}{\varphi_т R_т} \tag{1.23}$$

В этих формулах G – масса элемента; R – основное расчетное сопротивление материала; φ – коэффициент продольного изгиба.

В ЦНИИпроектстальконструкции были установлены значения коэффициентов $k_н$ и $q_н$ для различных элементов конструкций из стали разных уровней прочности с учетом вида нагрузок в сравнении с аналогичными элементами из углеродистой стали марки ВСт3сп по ГОСТ 380-71**. Например, для элементов конструкций промышленных зданий из высокопрочной стали марки 16Г2АФ с пределом текучести 440 МПа при различных видах нагружения: растяжении, сжатии с продольным изгибом, поперечном изгибе коэффициент приведения имеет значения 1,87, 1,25 и 1,42 соответственно. Далее, с учетом доли растянутых, сжатых и изогнутых элементов в металлоконструкциях были подсчитаны средневзвешенные значения коэффициентов $k_н$ и $q_н$ для стали каждого уровня прочности. Некоторые из этих значений приведены в табл.1.3.

Общая экономия металла, т, может быть подсчитана умножением массы примененной новой стали на соответствующее значение $q_н$

$$\Delta G = q_н G_н. \tag{1.24}$$

В частном случае, когда одна, более прочная сталь «1» заменяется другой, еще более прочной сталью «2», коэффициент приведения выразится соотношением

$$k_{н2\text{-}1} = k_{н2} / k_{н1}, \tag{1.25}$$

а общая экономия металла формулой

$$\Delta G = \left(\frac{k_{н\,2}}{k_{н\,1}} - 1 \right) G_{н2}, \tag{1.26}$$

где $k_{н1}$, $k_{н2}$ – соответствующие коэффициенты приведения для сталей «1» и «2» по табл.1.3.

Таблица 1.3. Технико-экономическая эффективность применения в строительных металлоконструкциях стали разных уровней прочности [21]

Сталь марки	ТУ или ГОСТ	Предел текучести и основное расчетное сопротивление[1], МПа по СНиП II–23–81*	Средневзвешенные значения		Относительная стоимость металлоконструкции «в деле»[2]	Экономический эффект, % от базовой стоимости
			$k_н$	$q_н$		
ВСт3сп5 (база)	ГОСТ 380-71**	235/225	1	0	1	–
ВСт3сп5-1	ТУ 14-1-3023-80	235/230	0,02	0,02	1,01	0,7
ВСт3сп5-2	То же	265/260	1,12	0,12	1,03	8,9
09Г2С-6-1	То же	325/315	1,24	0,24	1,12	11,6
09Г2С-6-2	То же	345/335	1,37	0,37	1,14	22,8
14Г2АФ	ГОСТ 19282-73*	390/370	1,46	0,46	1,23	23,4
16Г2АФ	То же	440/400	1,55	0,55	1,27	28,4
12Г2СМФ	ТУ-14-1-1308-75	590/515	1,92	0,92	1,56	35,8

[1] Для листовой стали толщиной 11–20 мм: перед чертой – предел текучести, за чертой – расчетное сопротивление.

[2] При одинаковом коэффициенте трудоемкости изготовления (сложности конструкции) Т.И=1,3.

Удельная стоимость металлоконструкций «в деле» $C_д$ представляет совокупность затрат на основные материалы $C_{ом}$, изготовление $C_и$, перевозку $C_т$ и монтаж конструкций $C_м$:

$$C_д = 1{,}32(C_{ом} + C_и) + 1{,}15C_т + 1{,}14C_м, \text{ руб/т}, \qquad (1.27)$$

где 1,32; 1,15 и 1,14 – коэффициенты, учитывающие заготовительно-складские расходы и нормативную рентабельность при изготовлении, а также накладные расходы и плановые накопления при монтаже конструкции. Они взяты для условий конкретных отечественных предприятий промышленного строительства определенного периода и зависят от структуры производства. Каждую из указанных затрат можно подсчитать по формулам:

$$\left.\begin{aligned} C_{ом} &= 1{,}035k_{отх}(Ц_м k_{доп} + m);\\ C_и &= k_{у.и}(k_2 k_{т.и} T + C_{вн});\\ C_м &= k_{у.м} C'_м \end{aligned}\right\} \qquad (1.28)$$

где $Ц_м$ – оптовая цена прокатной стали, руб/т; $k_{отх}$ – расходный коэффициент металла (в среднем по отрасли составляет 1,04–1,05); $k_{доп}$ – коэффициент приплат за дополнительные требования к прокатной стали; m – средняя стоимость доставки металлопроката от станции назначения до завода металлоконструкций, руб/т; 1,035 – коэффициент стоимости прочих основных материалов; $k_{у.и}$, $k_{у.м}$ – коэффициенты удорожания изготовления и монтажа, которые в зависимости от прочности стали изменяются в пределах 1–1,6 и 1–1,3 соответственно; k_2 – коэффициент, учитывающий основную зарплату производственных рабочих и долю накладных расходов при изготовлении ($k_2 \cong 4{,}11$); $k_{т.и}$ – коэффициент трудоемкости изготовления, обусловленный сложностью конструкции; T – время на изготовление 1 т конструкции с единичной трудоемкостью ($k_{т.и} = 1$) чел.-ч; $C_{вн}$ – стоимость внепроизводственных расходов, руб/т; $C'_м$ – удельная стоимость монтажа конструкции из традиционной стали, руб/т.

Значения $k_{т.и}$, $C_т$, $C'_м$ принимаются по действующим прейскурантам оптовых цен на строительные металлоконструкции и по единым районным единичным расценкам на их монтаж, значения $Ц_м$ и $k_{доп}$ – по прейскурантам оптовых цен на стальной прокат.

Экономический эффект от применения новой стали вместо традиционной определяется сопоставлением приведенных затрат по известной формуле, учитывающей капитальные вложения в производственные фонды и их эффективность. Однако в связи с тем, что при получении и использовании новой и традиционной стали капитальные вложения в производственные фонды практически одинаковы, нахождение удельного экономического эффекта $Э_{уд}$ сводится к сравнению стоимости металлоконструкции в «деле» для эквивалентных количеств традиционного и нового материалов

$$Э_{уд} = C_{д.т}k_н - C_{д.н}. \qquad (1.29)$$

Общий экономический эффект получают умножением удельного экономического эффекта на массу примененной новой стали

$$Э = Э_{уд}G_н. \qquad (1.30)$$

Эти формулы показывают, что экономический эффект определяется, во-первых, снижением металлоемкости ($q_н$, $k_н$), т.е. прочностными характеристиками нового материала, и, во-вторых, стоимостью «в деле» изготовленных из него конструкций ($C_{д.н}$). При этом решающая роль принадлежит стоимости проката новой стали (оптовой цене и приплатам $Ц_м$, $k_{доп}$, достигающей 60 % и более стоимости металлоконструкций «в деле».

Экономическая эффективность для ряда строительных сталей разной прочности приведена в табл.1.3. Видно, что возможный экономический эффект использования стали заметно возрастает по мере повышения ее прочности. Приведенные данные указывают на большие резервы экономии металла и снижения стоимости конструкции, заложенные в упрочнении строительной стали.

1.2. Классификация сталей

Стали, используемые в сварных строительных металлоконструкциях, различаются по ряду признаков, отражающих их изготовление, служебные свойства и область применения. Важнейшими из этих признаков являются способ выплавки и разливки, степень раскисленности, химический состав, состояние поставки, уровень (класс) прочности и категория (группа) качества по хладостойкости.

По способу выплавки применяемую в сварных металлоконструкциях сталь можно разделить на *мартеновскую*, *кислородно-конвертерную* и *электросталь*. Кроме того для особо ответственных конструкций перспективна сталь из железа прямого восстановления и после рафинирующего, преимущественно электрошлакового переплава.

До 1960 г. для строительных металлоконструкций использовали почти исключительно сталь, выплавленную в мартеновских печах. В последующий период во всем мире получил большое распространение наиболее производительный способ выплавки в кислородных конвертерах. Качество кислородно-конвертерной стали не уступает качеству мартеновской и с 1971 г. сталь, выплавленную в мартеновских печах и кислородных конвертерах, в нормах на поставку и применение стального проката не разделяют. Необходимым условием для этого является высокая чистота используемого для продувки конвертерной плавки кислорода – не менее 99,5 % O_2; при меньшей чистоте в сталь попадает азот воздуха, способствующий повышению склонности к механическому старению и снижению хладостойкости.

С пуском крупных элоктродуговых печей, имеющих массу плавки 100–250 т и более, увеличилась выплавка строительной стали в электропечах. Эта сталь отличается повышенной чистотой по содержанию вредных примесей – серы и фосфора. Еще более низкое содержание этих нежелательных элементов, а также примесей металлов: олова, сурьмы, висмута, способствующих отпускной хрупкости, удается получить в стали из железа прямого восстановления. Для этого материала исходным продуктом служит не передельный чугун, выплавленный в доменных печах, а губчатое железо, получаемое обработкой рудного концентрата в специальных восстановительных печах. Окончательный продукт выплавляют в электродуговых печах и (или) кислородных конвертерах.

В процессе электрошлакового переплава исходные плоские заготовки (слябы) из стали мартеновской, кислородно-конвертерной или электропечной выплавок последовательно переплавляются в ванне из жидкой шлаковой смеси специального химического состава, нагреваемой электрическим током [22]. При этом содержание серы и кислорода в металле уменьшается в 2–3 раза. Неметаллические включения, еще остающиеся в слитке, имеют малые размеры и равномерно распределены. В настоящее время этим способом получают слитки массой по 15–25 т, подвергаемые обычному переделу. Этой же цели – уменьшению содержания вредных примесей и более однородному их распределению служит получившая в последнее время применение *внепечная обработка* жидкой стали. Она производится после выпуска металла из сталеплавильного агрегата в ковш и может включать ряд операций: обработку в промежуточном ковше жидкими синтетическими шлаками, перемешивание металла струей газообразного аргона с одновременным вдуванием порошка энергичного раскислителя и десульфуратора (например, силикокальция), вакуумирование. Сталь после внепечной обработки по качеству в части содержания примесей и однородности их распределения часто не уступает металлу электрошлакового переплава, выгодно отличаясь от него меньшей стоимостью.

По степени раскисленности сталь делят на *кипящую*, *полуспокойную* и *спокойную*. При выплавке стали в печи или конвертере из передельного чугуна, содержащего 3–4 % углерода, окисление углерода (до содержания 0,06–0,25 % С в стали) связано с образованием газообразных продуктов CO и CO_2, вызывающих кипение металлической ванны. Если не проводить раскисления, то кипение продолжается после выпуска плавки в ковш и после разливки ее в изложницы до затвердевания слитка. Такая сталь называется *кипящей*.

Выделение газообразных продуктов при кристаллизации слитка кипящей стали приводит к резкому усилению его неоднородности по содержанию углерода, серы и фосфора, называемой ликвацией. Головная часть и сердцевина слитка обогащены примесями, а периферия и дно бедны ими. Наблюдаются также почти вертикальные полосы ликвации, называемые «усами». Зона максимального содержания ликвирующих элементов в слитке кипящей стали расположена на расстоянии 5–15 % высоты слитка от его верха, ликвация по углероду достигает 400 % и по сере – 900 % среднего содержания этих элементов в плавке.

Идущая в отход при прокатке головная часть слитка (обрезь) кипящей стали составляет 4–10 % его массы. При такой обрези из обычного слитка массой 8–25 т возможно получение проката, в котором имеются обширные зоны ликвации с содержанием углерода до 0,3–0,4 % и серы до 0,15 % при среднеплавочном содержании 0,12–0,22 % С и ≤ 0,05 % S. В результате разные листы или профили, входящие в одну партию (плавку) кипящей стали, но изготовленные из разных частей слитка (головной, средней или донной) неодинаковы по содержанию углерода, серы и фосфора.

По сечению готового проката углерод и примеси также распределены неравномерно: центральные слои обогащены ими, наружные бедны. Неоднородность химического состава проката сопровождается неоднородностью микроструктуры и механических свойств.

Другими особенностями кипящей стали являются высокое содержание кислорода, низкое содержание таких элементов, как кремний, марганец, алюминий и повышенная склонность к образованию крупнозернистой микроструктуры. Вследствие этого кипящая сталь характеризуется пониженными показателями прочности и сопротивления хрупкому разрушению, особенно в прокате значительной толщины (20 мм и более).

Спокойная сталь раскисляется в сталеплавильном агрегате, а также в ковше при выпуске из печи. При этом в жидкий металл вводятся энергичные раскислители: марганец, кремний, алюминий, иногда кальций или титан. Эти элементы обладают бóльшим сродством к кислороду, чем углерод, поэтому окисление углерода прекращается, и сталь перестает кипеть. Благодаря этому слитки спокойной стали гораздо однороднее по химическому составу, чем кипящей. Ликвация по углероду лишь на 60 %, а по сере на 110 % превышает среднеплавочное содержание этих элементов.

Содержание кислорода в спокойной стали менее высокое. Наличие в химическом составе элементов-раскислителей и, главное, остаточного алюминия делает спокойную сталь менее склонной к росту зерна. Поэтому прочностные свойства и сопротивление хрупкому разрушению в более однородном и мелкозернистом прокате спокойной стали выше, чем в прокате кипящей.

Вместе с тем затвердевание слитка спокойной стали связано с образованием большой усадочной раковины. Для получения здорового тела слитка сталь разливают в изложницы с теплоизолирующими прибыльными надставками. Усадочная раковина образуется в верхней утепленной части слитка, которую при прокатке удаляют. Обрезь составляет 12–16 % массы слитка. Поэтому выход годного проката из слитков спокойной стали меньше, чем из слитков кипящей. Вследствие этого, а также из-за большей продолжительности плавки за счет операции раскисления, дополнительного расхода ферросплавов и алюминия спокойная сталь дороже кипящей.

Низкое качество кипящей стали и небольшая технико-экономическая эффективность спокойной послужили стимулом к разработке варианта с промежуточной степенью раскисленности – *полуспокойной стали* [23]. Она выплавляется как кипящая, но в ковше или при разливке в изложницы обрабатывается небольшим количеством раскислителей, гораздо меньшим, чем при выплавке спокойной стали. Обычно применяют комплексное раскисление ферросилицием и алюминием. Быстрое прекращение кипения и затвердевание головной части слитка предотвращают развитие большой химической неоднородности. При этом для ликвации в слитках полуспокойной стали характерно превышение среднеплавочного содержания углерода на 80 % и серы на 150 %. Расстояние осевой ликвационной зоны от верха слитка составляет 15–30 % его высоты; головная обрезь – 3–5 % массы слитка.

Производство полуспокойных сталей характеризуется высокой технико-экономической эффективностью. В сравнении с производством спокойной стали выход годного проката из слитков выше на 8–10 %, расход ферросилиция на раскисление снижен в 2–5 раз, алюминия в 5 раз, существенно уменьшается количество изложниц и трудоемкость их подготовки. Себестоимость и цена проката из полуспокойной стали на 2–9 % ниже, чем из спокойной. Вместе с тем по качеству в части однородности химического состава, микроструктуры и механических свойств, сопротивлению хрупкому разрушению и показателям прочности прокат

полуспокойной стали уступает прокату спокойной стали, занимая между ним и прокатом кипящей стали промежуточное положение.

Способ разливки также влияет на качество готового проката. Имеются разные способы *разливки на слитки в изложницы*. Однако их различие (связанное с решением тех или иных технологических задач) не вносит принципиальных изменений в структуру и свойства готового проката.

Значительно бóльшие изменения возникают при переходе на новый прогрессивный способ получения *слитков на машинах непрерывного литья заготовок* [24]. Новый способ имеет большое народнохозяйственное значение, так как позволяет избежать прокатки слитков на обжимных, заготовительных станах; при этом резко увеличивается выход годного проката из слитков, уменьшаются энергетические и материальные затраты производства. Вместе с тем специфическая структура слитка, отражающая условия формирования непрерывнолитой заготовки в полом водоохлаждаемом кристаллизаторе при непрерывном вытягивании, является причиной возможного возникновения специфических дефектов. Главные из них – осевая рыхлость, осевая химическая неоднородность, осевые трещины. В поперечном сечении листовой заготовки (сляба) эти дефекты располагаются в зоне, имеющей вид прямолинейной полосы, проходящей по центру сечения параллельно большим граням слитка.

В готовом прокате осевая химическая неоднородность проявляется в виде сильно обогащенного углеродом, серой и фосфором (иногда и марганцем) центрального слоя толщиной 0,5–3 мм в срединной плоскости листа. Этот слой служит местом образования неблагоприятной микроструктуры, снижает пластичность и прочность при растяжении в направлении толщины; в нем концентрируются неметаллические включения и нарушения сплошности. Часто нарушения сплошности в виде трещин слоистого разрушения в зоне осевой ликвации листов из непрерывнолитых заготовок образуются у потребителя при сварке, огневой резке, рубке на ножницах, штамповке и гибке.

Согласно многочисленным (главным образом зарубежным) исследованиям исключить или уменьшить осевую химическую неоднородность и вероятность образования связанных с ней дефектов удается комплексом мероприятий, включающим повышение чистоты стали по неметаллическим включениям, например внепечной обработкой, снижением температуры литья, точным регулированием зазора между роликами, вытягивающими заготовку из кристаллизатора, применением устройств для электромагнитного перемешивания затвердевающего расплава в слитке и др. К сожалению, в нашей стране этой проблеме пока не уделяется необходимого внимания.

В настоящее время разливка на машинах непрерывного литья заготовок производится главным образом для спокойных сталей, реже – для полуспокойных. Разливка этим способом кипящих сталей затруднена образованием в слитках крупных газовых пор.

Химический состав стали – главная ее характеристика. Химический состав стали определяет ее марку. При этом содержание химических элементов для данной марки стали задается не дискретно, а некоторым интервалом, в пределах которого изменение химического состава не должно сопровождаться выведением свойств за границы гарантируемых уровней. Ширина интервала связана с возможностью сталеплавильного производства соблюдать заданную композицию.

Стали, в которых отсутствуют специальные добавки легирующих элементов или имеется лишь небольшое их количество, обусловленное технологией выплавки, называются *углеродистыми*. По содержанию углерода различают стали низкоуглеродистые (до 0,25 % С), среднеуглеродистые (0,3–0,6 % С) и высокоуглеродистые

(свыше 0,6 % С). Для сварных строительных металлоконструкции используют преимущественно стали с низким содержанием углерода. Они поставляются по ГОСТ 380-88*, ГОСТ 14637-89* и ГОСТ 27772-88*. В некоторых случаях используется углеродистая сталь по ГОСТ 1050-88*, главным образом, в виде труб.

Стали, в которые специально вводятся добавки легирующих элементов для обеспечения требуемых свойств, называются *легированными*. Они могут содержать один, два, три и более легирующих элемента. Так, различают марганцовистую, хромистую, кремнемарганцовистую, хромоникельмолибденовую и другие легированные стали.

Легированные стали с небольшим содержанием легирующих элементов, обычно в сумме не превышающим 2–3 % по массе, и с низким содержанием углерода, используемые в строительстве, машиностроении, судостроении для изготовления сварных металлоконструкций, выделены в особую группу, их называют *низколегированными*. Потребитель применяет эти стали, как правило, в состоянии поставки, т.е. без дополнительной термической обработки. Прокат низколегированных сталей для строительных металлоконструкций поставляется по ГОСТ 19281-89* (сортовой и фасонный), ГОСТ 19282-73* (листы и широкие полосы), ГОСТ 6713-91, ГОСТ 27772-88* и ряду технических условий.

Стали с общим содержанием легирующих элементов более 10 % по массе при содержании одного из элементов не менее 8 % называются *высоколегированными*. Они являются носителями особых свойств: коррозионной стойкости, жаростойкости, жаропрочности, хладостойкости при низких отрицательных (криогенных) температурах и др. Их используют в строительных металлоконструкциях только для специальных целей. Эти стали поставляются по ГОСТ 5632-72* и специальным техническим условиям.

Состояние поставки является важным показателем качества, так как обычно в строительных конструкциях металлопрокат используется в том виде, в котором он выпускается металлургическими заводами. В большинстве случаев металлопрокат поставляется непосредственно после обычной горячей прокатки. В этом состоянии он редко обладает оптимальным сочетанием свойств. Возможна также поставка стали в термически обработанном состоянии, причем различают два основных вида термической обработки проката: *нормализацию и термическое улучшение*.

Нормализация – нагрев, до 890-950 °С с последующим охлаждением на воздухе измельчает микроструктуру и делает ее более однородной, повышает вязкость и пластичность. Термическое улучшение включает закалку – резкое охлаждение проката в воде или водяным душем после нагрева до 890-950 °С и отпуск – нагрев и выдержка при 550–700 °С. Термическое улучшение существенно измельчает микроструктуру стали, повышает прочность и хладостойкость. Различают термическое улучшение с *закалкой после специального нагрева* (в камерной и методической печах) и с закалкой с *использованием тепла прокатного нагрева*.

В последнее время находит применение производство проката, при котором измельчение микроструктуры, повышение прочности и хладостойкости достигается непосредственно в процессе горячей деформации надлежащим выбором температурно-деформационных режимов, уменьшением температуры конца прокатки и увеличением обжатий при этих пониженных температурах. Такой процесс носит название *контролируемой прокатки* [25].

Еще более благоприятный комплекс свойств прочности и хладостойкости удается получить с помощью технологии, в которой контролируемая прокатка сочетается с ускоренным охлаждением, близким к охлаждению при закалке при термическом улучшении. Этот технологический процесс называют *термомеханической обработкой* или *высокотемпературной термомеханической обработкой*.

Классы прочности и категория качества по хладостойкости. Как уже указывалось, в целях унификации применяемые в строительных металлоконструкциях стали по гарантированным значениям предела текучести и временного сопротивления разрыву разделены на семь основных уровней (классов) прочности (табл.1.4) [2]. Сталь класса С 225 ($\sigma_т \geq 225$ МПа) условно принято называть сталью *нормальной прочности*, трех следующих классов ($\sigma_т \geq 285$, ≥ 325, ≥ 390 МПа) – сталью *повышенной прочности* и остальных трех классов ($\sigma_т \geq 440$, ≥ 590, ≥ 735 МПа) – сталью *высокой прочности*.

Таблица 1.4. Классы прочности и группы качества по хладостойкости проката строительных сталей [2]

Условный класс прочности	Прежнее обозначение	Механические свойства при растяжении			Температура, при которой гарантируется ударная вязкость KCU не менее 0,3 Мдж/м^2, для групп качества по хладостойкости		
		предел текучести, МПа	временное сопротивление, МПа	относительное удлинение, %			
		не менее			I	II	III
С225	С38/23	225	375	25	Не гарантируется	-20	–
С285	С44/29	285	430	21	–	-40	-70
С325	С46/33	325	450	21	–	-40	-70
С390	С52/40	390	510	19	–	-40	-70
С440	С60/45	440	590	16	–	-40	-70
С590	С70/60	590	685	12	–	-40	-70
С735	С85/75	735	830	10	–	-40	-70

Обычно первому классу прочности соответствует прокат углеродистой стали обыкновенного качества в горячекатаном состоянии, последующим классам прочности от второго до пятого – прокат низколегированной стали в горячекатаном или нормализованном состоянии, шестому и седьмому классам прочности – прокат экономно легированной стали, поставляемой, как правило, в термоулучшенном состоянии. Однако возможно также получение проката второго и третьего классов путем термического и термомеханического упрочнения или контролируемой прокатки.

Наряду с требованием гарантированной прочности к строительным сталям предъявляется требование гарантированного сопротивления хрупкому разрушению (хладостойкости). Оно регламентируется показателями ударной вязкости при отрицательной температуре и при температуре плюс 20 °С после механического старения. Все строительные стали по хладостойкости условно можно разделить на три группы:

I – без гарантированной хладостойкости;

II – с гарантированной хладостойкостью для металлоконструкций, эксплуатируемых в обычных температурных условиях (расчетная температура не ниже минус 40 °С);

III – с гарантированной хладостойкостью, но для конструкций, эксплуатируемых при расчетной температуре ниже минус 40 °С («северное исполнение»).

В табл.1.4 приведена температура испытаний, при которой должна быть гарантирована ударная вязкость стали каждой группы качества по хладостойкости. Ука-

занным группам соответствуют определенные марки стали и категории качества, предусмотренные стандартами на сталь. Так, по ГОСТ 27772-88* группе I соответствует сталь С235, группе II – стали С255 и С285, стали С345 и С375 категории 1 и 3, сталь С590, группе III – стали С345 и С375 категории 2 и 4, сталь С590К.

Все температуры испытаний в табл.1.4 (как и в ГОСТ 27772-88*) указаны для условий определения ударной вязкости KCU на стандартных образцах с полукруглым надрезом (радиус 1 мм) типа I по ГОСТ 9454-78*, вырезаемых из листов и широкой полосы в направлении поперек направления прокатки, а из фасонных профилей и сортовой стали – вдоль направления прокатки. Вместе с тем в последнее время остро ставится вопрос о переходе при аттестации стали к более жестким условиям определения ударной вязкости KCV на образцах с острым треугольным надрезом (радиус 0,25 мм) типа II по ГОСТ 9454-78*. Использование этих образцов соответствует международной практике.

Согласно имеющимся методическим исследованиям, единый переход от норм KCU к нормам KCV, общий для всех металлоизделий, отсутствует и необходимо учитывать индивидуальные особенности, включающие в себя как вид металлопроката, так и качество стали. Все же общим для такого перехода является необходимость повышения температуры испытания, которая для металлопроката строительной стали эквивалентной хладостойкости при прочих равных условиях (то же направление вырезки образцов, та же метрологически обоснованная величина ударной вязкости 0,3 мДж/м^2) составляет примерно 40 °С. Таким образом нормам KCU, при минус 40 °С и минус 70 °С будут близко соответствовать нормы KCV при 0 °С и минус 30 °С.

Под влиянием колебания содержания элементов в интервале марочного состава, неоднородности слитка и условий прокатки прочностные характеристики стали каждой марки варьируются в широких пределах. Стремление более полно использовать фактическую прочность проката в конструкциях привело к идее селективного разделения на металлургических заводах всей совокупности металлопродукции данной марки на отдельные *группы прочности*, отличающиеся гарантируемыми значениями предела текучести и временного сопротивления разрыву.

В нашей стране такое разделение на группы прочности осуществлено для строительных углеродистых и низколегированных марок стали первого, второго и третьего классов прочности [26] и нашло отражение в ТУ 14-1-3023-80 и ГОСТ 27772-88*. По этим нормам каждая марка углеродистой и низколегированной стали разделена на две группы прочности, причем для второй группы гарантируемые значения предела текучести и временного сопротивления на 10–40 МПа выше, чем для первой. Высокая надежность соблюдения норм прочности и пластичности (с вероятностью не ниже 95 %) обеспечивается специальными статистическими процедурами приемки и контроля. Металлопрокат, поставляемый по этим нормам, получил название *сталь с гарантированным уровнем механических свойств, дифференцированным по группам прочности*.

1.3. Сталь углеродистая обыкновенного качества

Прокат из углеродистой стали обыкновенного качества является материалом, наиболее широко применяемым в строительных металлоконструкциях. По имеющимся данным [27] относительное количество этого проката составляет около 80 % по массе всего проката, используемого в сварных конструкциях и в ближайшие 10–15 лет может уменьшиться лишь незначительно. Марки и общие технические требования к углеродистым сталям содержатся в ранее действовавшем ГОСТ 380-71**, новых действующих ГОСТ 380-88* и ГОСТ 27772-88* и ТУ 14-1-3023-80. Сталь изготовляется горячекатаной: сортовой, фасонной, толстолистовой, тонко-

листовой, широкополосной и холоднокатаной – тонколистовой. Из стали изготовляются также трубы, поковки и штамповки, лента, проволока и метизы. Сталь выплавляется, как правило, в мартеновских печах или кислородных конвертерах с различной степенью раскисления, в зависимости от которой она может быть кипящей, спокойной или полуспокойной.

По ГОСТ 380-71* в зависимости от назначения стали разделяются на три группы (А, Б, В), семь марок (Ст0 – Ст6) с возрастанием содержания углерода от 0,06–0,12 – в стали марки Ст1 до 0,38–0,49 % – в стали марки Ст6. Поставляются они шести категорий качества – в зависимости от количества гарантируемых характеристик химического состава и механических свойств, трех степеней раскисленности: кипящая, полуспокойная и спокойная (условные обозначения кп, пс и сп). Из них для строительных металлоконструкций согласно строительным нормам и правилам (СНиП II-23-81*) используются исключительно только стали, поставляемые по группе В марки Ст3: ВСт3кп, Вст3пс, ВСт3Гпс и ВСт3сп. При этом в целях унификации кипящая сталь используется только категории 2, полуспокойная – только категории 6, спокойная и полуспокойная с повышенным содержанием марганца – только категории 5; им соответствуют марочные обозначения ВСт3кп2, ВСт3пс6, ВСт3сп5, ВСт3Гпс5 и ВСт3Гсп5.

Для всех этих вариантов нормируемыми показателями являются химический состав, механические свойства при растяжении и изгибе в холодном состоянии. Кроме того, для стали марки ВСт3пс6 нормируется ударная вязкость при плюс 20 °С после механического старения, а для сталей ВСт3сп5, ВСт3Гпс5 и ВСт3Гсп5 еще и ударная вязкость при минус 20 °С. В табл.1.5 и 1.6 приведены нормы их химического состава при плавочном контроле и в готовом прокате, а в табл.1.7 и 1.8 – требования по механическим свойствам.

Таблица 1.5. Химический состав (плавочный анализ ковшовой пробы) углеродистых сталей по ГОСТ 380-71**, используемых в сварных строительных металлоконструкциях

Сталь марки	Массовая доля элемента, %								
	углерода	марганца	кремния	фосфора	серы	хрома	никеля	меди	мышьяка
				не более					
ВСт3кп	0,14–0,22	0,3–0,6	Не более 0,07	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
ВСт3пс	0,14–0,22	0,4–0,65	0,08–0,17	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
ВСт3сп	0,14–0,22	0,4–0,65	0,12–0,3	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
ВСт3Гпс	0,14–0,22	0,8–1,1	Не более 0,15	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
ВСт3Гсп	0,14–0,22	0,8–1,1	0,12–0,3	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08

Примечания: 1. В стали, выплавленной на базе керченских руд, допускается массовая доля мышьяка до 0,15%, фосфора – до 0,05%. 2. При раскислении полуспокойной стали алюминием, титаном или другими раскислителями, не содержащими кремний, а также несколькими раскислителями (ферросилицием и алюминием, ферросилицием и титаном и др.) массовая доля кремния в стали допускается менее 0,05%. Раскисление титаном, алюминием и другими раскислителями, не содержащими кремния, указывается в сертификате. 3. Для проката из стали всех степеней раскисления толщиной до 12 мм включительно допускается снижение массовой доли марганца до 0,10%. 4. Массовая доля азота в готовом прокате, а также в слитках, блюмсах, слябах, сутунках и заготовках, предназначенных для дальнейшей прокатки из кислородно-конвертерной и мартеновской стали должна быть не более 0,008%. 5. Для кипящей химически закупоренной стали в готовом прокате допускается массовая доля кремния до 0,15%, за исключением случаев, когда сталь предназначена для холодной высадки и вытяжки или штамповки, что должно быть оговорено в заказе.

Таблица 1.6. Допускаемые отклонения по химическому составу в готовом прокате углеродистых сталей группы В по ГОСТ 380-71**

Элемент	Допускаемые отклонения для стали, %	
	кипящей	полуспокойной и спокойной
Углерод	–	–
Марганец	+0,05 −0,04	+0,05 −0,03
Кремний	–	+0,05 −0,02
Фосфор	+0,005	+0,005
Сера	+0,005	+0,005

Примечания: 1. Отклонение от нижнего предела массовой доли углерода (см.табл.1.5) не является браковочным признаком. В готовом прокате плюсовые отклонения по углероду от норм, указанных в табл.1.5, для стали марки ВСт3 всех степеней раскисленности и для стали марки ВСт3Г (сп, пс) не допускаются. 2. В готовом прокате стали, выплавленной на базе керченских руд, массовая доля фосфора не должна превышать 0,045% для категории 4−6 и 0,055 − для категории 1−3; серы не более 0,055% для всех категорий.

Таблица 1.7. Механические свойства при растяжении и условия испытания на изгиб проката углеродистых сталей по ГОСТ 380-71**, используемых в сварных строительных металлоконструкциях

Сталь марки	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа для толщины, мм				Относительное удлинение δ_5 для толщины, мм			Изгиб до параллельности сторон (a - толщина образца, d - диаметр оправки для толщины, мм)	
		до 20	св.20 до 40	св.40 до 100	св.100	до 20	св.20 до 40	св.40		
		не менее							до 20	св. 20
ВСт3кп	360−460	235	225	215	195	27	26	24	$d=2a$	$d=2a$
ВСт3пс	370−480	245	235	225	205	26	25	23	$d=2a$	$d=2a$
ВСт3сп										
ВСт3Гпс	370−490	245	235	225	205	26	25	23	$d=2a$	$d=2a$
ВСт3Гсп	390−570	–	245	–	–	–	24	–	–	$d=2a$

Примечания: 1. Допускается превышение верхнего предела временного сопротивления на 50 МПа по сравнению с указанным при условии выполнения остальных норм, а при согласии заказчика − без ограничения верхнего предела. 2. Для листов универсальной стали всех толщин и фасонной св. 20 мм значение предела текучести допускается на 10 МПа ниже по сравнению с указанным. 3. Для листовой стали толщиной 8−4 мм допускается снижение относительного удлинения на 1% абс. на каждый миллиметр уменьшения толщины. Нормы относительного удлинения для листов толщиной менее 4 мм устанавливаются соответствующими стандартами. 4. Допускается снижение относительного удлинения для листовой, универсальной и фасонной стали всех толщин на 1% абс. 5. Сталь марки Ст3Гсп предназначена для листового проката толщиной 21−40 мм группы В категории 4−6.

По ТУ 14-1-3023-80 прокат с гарантированным уровнем механических свойств, дифференцированным по группам прочности, изготовляется из углеродистой стали марок ВСт3кп, ВСт3пс, ВСт3сп и ВСт3Гпс всех категорий в соответствии с ГОСТ 380-71**. При этом прокат из стали марок ВСт3пс, ВСт3сп и ВСт3Гпс поставляется двух групп прочности с дифференцированными по группам значениями предела

текучести и временного сопротивления (табл.1.9). Прочие требования – по ГОСТ 380-71** и в зависимости от категории стали. В марочном обозначении стали группа прочности указывается цифрой в конце: ВСт3кп2-1, ВСт3пс6-1, ВСт3пс6-2 и т.д.

Таблица 1.8. Ударная вязкость проката углеродистых сталей по ГОСТ 380-71**, используемых в сварных строительных металлоконструкциях

Сталь марки	Вид проката (сталь)	Толщина проката, мм	Расположение образца относительно оси прокатки	Тип образца по ГОСТ 9454-78*	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2, не менее		
					при температуре		после механического старения
					+20°С	-20°С	
ВСт3пс ВСт3сп	Листовая	5–9	Поперек	3	78	39	39
		10–25		1	69	29	29
		26–40		1	49	–	–
	Универсальная	5–9	Вдоль	3	98	49	49
		10–25		1	78	29	29
		26–40		1	69	–	–
	Сортовая и фасонная	5–9	То же	3	108	49	49
		10–25		1	98	29	29
		26–40		1	88	–	–
ВСт3Гпс	Листовая	5–9	Поперек	3	78	39	39
		10–30		1	69	29	29
		31–40		1	49	–	–
	Универсальная	5–9	Вдоль	3	98	49	49
		10–30		1	78	29	29
		31–40		1	69	–	–
	Сортовая и фасонная	5–9	То же	3	108	49	49
		10–30		1	98	29	29
		31–40		1	88	–	–
ВСт3Гсп	Листовая	21–40	Поперек	1	–	29	29

Примечание: 1. Знак "–" означает, что испытание не проводится. 2. Ударную вязкость листовой и универсальной стали толщиной 5; 7,5 и 10 мм, прокатанной с отклонением на минусовый допуск, определяют на образцах толщиной, равной толщине стали. 3. Определение ударной вязкости стали круглого сечения производится с диаметра 12 мм, квадратного – начиная со стороны квадрата 11 мм, фасонной стали – с толщин, из которых может быть вырезан образец для испытаний в соответствии с ГОСТ 9454-78*. 4. При испытании стали на ударную вязкость допускается снижение ударной вязкости на одном образце на 10 Дж/см^2 при плюс 20°С и на 5 Дж/см^2 при минус 20°С и после механического старения, при этом среднее значение не должно быть ниже норм, указанных в этой табл.

Таблица 1.9. Механические свойства проката углеродистой стали по ТУ 14-1-3023-80 (с изменениями №6)

Сталь марки	Группа прочности	Толщина листа или полки, мм	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ_5, %
1	2	3	4	5	6
Фасонный и полосовой прокат					
Ст3кп	1	До 10 вкл.	360	235	27
		Св. 10 до 20 вкл.	360	235	27
		Св.20 до 30 вкл.	360	225	28

Продолжение табл. 1.9

1	2	3	4	5	6
Ст3пс	1	До 10 вкл.	370	245	26
		Св. 10 до 20 вкл.	370	245	26
		Св.20 до 30 вкл.	370	235	25
	2	До 10 вкл.	390	275	24
		Св. 10 до 20 вкл.	380	275	23
Ст3сп Ст3Гпс	1	До 10 вкл.	380	255	26
		Св. 10 до 20 вкл.	370	245	26
		Св.20 до 30 вкл.	370	235	25
	2	До 10 вкл.	400	285	24
		Св. 10 до 20 вкл.	390	275	23
Листовой прокат и гнутые профили					
Ст3кп	1	До 10 вкл.	360	235	27
		Св. 10 до 20 вкл.	360	235	27
Ст3пс	1	До 10 вкл.	370	245	26
		Св. 10 до 20 вкл.	370	245	26
	2	До 10 вкл.	380	275	24
		Св. 10 до 20 вкл.	370	265	23
Ст3сп Ст3Гсп	1	До 10 вкл.	380	245	26
		Св. 10 до 20 вкл.	370	245	26
	2	До 10 вкл.	390	275	24
		Св. 10 до 20 вкл.	380	265	23

По ГОСТ 27772-88* требования к прокату углеродистых сталей для строительных металлоконструкций по-существу повторяют с некоторыми изменениями нормы химического состава и механических свойств, предусмотренными ГОСТ 380-71** и ТУ 14-1-3023-80. Введены новые обозначения марок стали (наименование стали), отражающие в соответствии с международной практикой уровень гарантируемого предела текучести: С235, С245, С255, С275 и С285. Устранены нормы нижнего предела содержания химических элементов. В табл.1.10–1.12 приведены требования к прокату углеродистой стали по новому стандарту. В табл.1.13 указывается, каким маркам стали по ТУ 14-1-3023-80 и ГОСТ 380-71** соответствуют стали по ГОСТ 27772-88*.

Таблица 1.10. Химический состав (плавочный анализ ковшовой пробы) углеродистой стали по ГОСТ 27772-88* для строительных стальных конструкций

Наименование стали	Массовая доля элементов, %							
	углерода, не более	марганца	кремния	серы, не более	фосфора, не более	хрома, не более	никеля, не более	меди, не более
С235	0,22	Не более 0,6	Не более 0,05	0,05	0,04	0,3	0,3	0,3
С245	0,22	Не более 0,65	0,05–0,15	0,05	0,04	0,3	0,3	0,3
С275	0,22	Не более 0,65	0,15–0,3	0,05	0,04	0,3	0,3	0,3
С255	0,22	0,8–1,1	0,05–0,15	0,05	0,04	0,3	0,3	0,3
С285	0,2	0,8–1,1	0,15–0,3	0,05	0,04	0,3	0,3	0,3

Примечание. В стали марок С245, С275, С255 и С285 допускается увеличение массовой доли марганца до 0,85 %.

Таблица 1.11. Механические свойства фасонного проката углеродистых сталей по ГОСТ 27772-88* для строительных стальных конструкций

Наименование стали	Толщина полки, мм	Механические характеристики			Изгиб до параллельности сторон (a – толщина образца, d – диаметр оправки)	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2	
		предел текучести $\sigma_т$, МПа	временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	относительное удлинение δ_5, %		при –20 °С	после механического старения
						не менее	
С235	От 4 до 20 вкл.	235	360	26		–	–
	Св.20 до 40 вкл.	225	360	25		–	–
С245	От 4 до 20 вкл.	245	370	25		–	29*
	Св.20 до 25 вкл.	235	370	24		–	29
	Св. 25 до 30 вкл.	235	370	24		–	–
С255	От 4 до 10 вкл.	255	380	25		29*	29*
	Св.10 до 20 вкл.	245	370	25		29	29
	Св. 20 до 40 вкл.	235	370	24		29	29
С275	От 4 до 10 вкл.	275	390	24		–	29*
	Св.10 до 20 вкл.	275	380	23		–	29
С285	От 4 до 10 вкл.	285	400	24		29*	29*
	Св.10 до 20 вкл.	275	390	23		29	29

* Для профиля толщиной 5 мм норма ударной вязкости 49 Дж/см^2

Таблица 1.12. Механические свойства листового и широкополосного универсального проката по ГОСТ 27772-88* для строительных стальных конструкций

Наименование стали	Толщина листа, мм	Механические характеристики			Изгиб до параллельности сторон (a – толщина образца, d – диаметр оправки)	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2	
		предел текучести $\sigma_т$, МПа	временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	относительное удлинение δ_5, %		при –20 °С	после механического старения
						не менее	
1	2	3	4	5	6	7	8
С235	От 2 до 3,9	235	360	20	$d=a$	–	–
	От 4 до 20 вкл.	235	360	26	$d=1{,}5a$	–	–
	Св. 20 до 40 вкл.	225	360	26	$d=2a$	–	–
	Св. 40 до 100 вкл.	215	360	24	$d=2a$	–	–
	Св. 100	195	360	24	$d=2a$	–	–

Продолжение табл.1.12

1	2	3	4	5	6	7	8
С245	От 2 до 3,9	245	370	20	$d=a$	–	–
	От 4 до 10 вкл.	245	370	25	$d=1,5a$	–	29*
	Св. 10 до 20 вкл.	245	370	25	$d=1,5a$	–	29
С255	От 2 до 3,9	255	380	20	$d=1,5a$	–	–
	От 4 до 10 вкл.	245	380	25	$d=1,5a$	29*	29*
	Св. 10 до 20 вкл.	245	370	25	$d=1,5a$	29	29
	Св. 20 до 40 вкл.	235	370	25	$d=2a$	29	29
С275	От 2 до 3,9	275	380	18	$d=1,5a$	–	–
	От 4 до 10 вкл.	275	380	24	$d=1,5a$	–	29*
	Св. 10 до 20 вкл.	265	370	23	$d=1,5a$	–	29
С285	От 2 до 3,9	285	390	17	$d=1,5a$	–	–
	От 4 до 10 вкл.	275	390	24	$d=1,5a$	29*	29*
	Св. 10 до 20 вкл.	265	380	23	$d=1,5a$	29	29

* Для листов и полосы толщиной 5 мм норма ударной вязкости 39 Дж/см^2

Примечания: 1. Для листового проката толщиной 4 – 8 мм норма относительного удлинения уменьшается на 2 % абс. 2. Нормы ударной вязкости приведены для проката толщиной 5 мм и более. 3. Допускается снижение ударной вязкости на одном образце на 30%. При этом среднее значение результатов испытаний должно быть не ниже норм, приведенных в табл. 1.12.

Таблица 1.13. Марки стали по ГОСТ 380-71** и ТУ 14-1-3023-80, которым соответствует прокат углеродистой стали по ГОСТ 27772-88*

Наименование стали по ГОСТ 27772-88*	Сталь марки по ГОСТ 380-71** или ТУ 14-1-3023-80	ГОСТ или ТУ
С235	ВСт3кп2	ГОСТ 380-71**
	ВСт3кп2-1	ТУ 14-1-3023-80
С245	ВСт3пс6 (листовой прокат толщиной до 20 мм, фасонный – до 30 мм)	ГОСТ 380-71**
	ВСт3пс6-1	ТУ 14-1-3023-80
С255	ВСт3Гпс5, ВСт3сп5, ВСт3пс6 (листовой прокат толщиной св. 20 до 40 мм, фасонный – св. 30 мм)	ГОСТ 380-71**
	ВСт3сп5-1, ВСт3Гпс5-1	ТУ 14-1-3023-80
	18Гпс, 18Гсп	ГОСТ 23570-79
С275	ВСт3пс6-2	ТУ 14-1-3023-80
С285	ВСт3сп5-2, ВСт3Гпс5-2	ТУ 14-1-3023-80

Сварка углеродистой стали с химическим составом по табл.1.5, 1.6 и 1.10, благодаря умеренному углеродному эквиваленту, обычно не вызывает затруднения и может производиться всеми общепринятыми способами. Однако необходимо учитывать степень раскисленности стали.

Выше отмечалось, что для кипящей углеродистой стали характерна существенная неоднородность в содержании углерода, серы и фосфора как от листа к листу и от профиля к профилю в партии проката, так и по сечению проката в пределах одного листа или профиля. Неоднородность химического состава сопровождается неоднородностью микроструктуры и механических свойств. Кроме того, кипящая сталь характеризуется пониженными показателями прочности и, главное, малым сопротивлением хрупкому разрушению. Вследствие этого кипящая сталь поставляется без гарантии хладостойкости, выражаемой значениями ударной вязкости при отрицательной температуре и после механического старения. Поэтому в сварных строительных металлоконструкциях кипящую сталь применяют только в наименее ответственных элементах (связях, прогонах, фахверках), а также в элементах, испытывающих при эксплуатации преимущественное сжатие, при котором хрупкое разрушение менее вероятно, например в колоннах промышленных и гражданских зданий. Другая возможная область применения кипящих сталей – элементы конструкции из проката малой толщины – менее 5 мм, так как с уменьшением толщины вероятность хрупкого разрушения резко снижается.

Отмечалось также, что важное преимущество спокойной стали заключается в ее однородности. Углерод и вредные примеси – сера и фосфор распределены в ней более равномерно. Прочностные свойства и, что особенно важно, сопротивление хрупкому разрушению в более однородном и мелкозернистом прокате спокойной стали выше, чем в прокате кипящей. Сталь поставляется с гарантированными значениями ударной вязкости при отрицательной температуре и после механического старения. Трещины при сварке в соединениях спокойной стали обычно не образуются, так как сера распределяется равномерно. Поэтому выбор электродов для сварки спокойных сталей значительно проще, чем для сварки кипящих сталей: пригодны электроды с рутиловым, руднокислым и фтористокальциевым покрытием. Менее привлекательной особенностью спокойной стали является ее более высокая цена, обусловленная дополнительными затратами в металлургическом производстве.

Спокойная сталь применяется в ответственных элементах сварных металлоконструкций, подвергающихся при эксплуатации динамическим и переменным силовым воздействиям (подкрановые балки, элементы мостов и эстакад, балки рабочих площадок металлургических цехов) или находящихся в сложном напряженном состоянии (узловые фасонки стропильных и подстропильных ферм).

Наиболее широко в сварных строительных металлоконструкциях применяется полуспокойная сталь. Выгодно отличаясь от спокойной стали более высокими технико-экономическими показателями, полуспокойная сталь лишь немного уступает ей в однородности химического состава и механических свойств. По сопротивлению хрупкому разрушению и показателям прочности полуспокойная сталь занимает промежуточное положение между спокойной и кипящей сталью. Вместе с том прокат полуспокойной стали поставляется с гарантией ударной вязкости при отрицательной температуре и после механического старения.

Уровень механических свойств углеродистых спокойной, полуспокойной и кипящей сталей в различных профилях проката в большой мере определяется толщиной проката: с уменьшением толщины и, следовательно, с увеличением степени

обжатия, снижением температуры конца прокатки и повышением скорости охлаждения измельчается зерно феррита горячекатаной стали всех трех степеней раскисления. Это существенно повышает предел текучести и особенно ударную вязкость при отрицательных температурах и после механического старения.

Действующими строительными нормами и правилами СНиП II-23-81* применение проката углеродистой полуспокойной стали регламентировано для широкой области элементов сварных строительных металлоконструкций (стропильные и подстропильные фермы покрытий, балки и ригели рамных конструкций и др.), эксплуатируемых в обычном диапазоне климатических температур (расчетная температура не ниже минус 40 °С.)

Еще более высокое качество проката углеродистой полуспокойной стали, не уступающей по основным показателям качеству проката спокойной стали, удается получить при дополнительном легировании полуспокойной стали марганцем. Производство этих сталей, так же как и углеродистых полуспокойных сталей с обычным содержанием марганца, обеспечивает более высокий (на 8–10 %) выход годного проката из слитков по сравнению с производством спокойных углеродистых сталей. Вместе с тем однородность химического состава, размер действительного зерна, полосчатость микроструктуры, загрязненность неметаллическими включениями в прокате аналогичных профилей полуспокойной стали марки Ст3Гпс и спокойной стали марки Ст3сп практически одинаковы. Характеристики прочности, пластичности и сопротивления хрупкому разрушению полуспокойной стали марки Ст3Гпс не ниже аналогичных характеристик спокойной стали марки Ст3сп и даже их превышают.

По показателям свариваемости сталь марки ВСт3Гпс мало отличается от спокойной стали ВСт3сп [23, 28], поэтому сварку полуспокойной стали марки ВСт3Гпс следует производить, применяя те же режимы и сварочные материалы, что и для сварки стали марки ВСт3сп.

Строительными нормами и правилами СНиП II-23-81* применение проката углеродистой полуспокойной стали с повышенным содержанием марганца марки ВСт3Гпс5 предусмотрено в тех же конструкциях и при тех же расчетных температурах, что и проката углеродистой спокойной стали марки ВСт3сп5 (соответствующее наименование стали по ГОСТ 27772-88*: С255 и С285).

Значительное повышение предела текучести и временного сопротивления разрыву проката углеродистых сталей, являющееся резервом снижения металлоемкости и стоимости конструкции, при сохранении и даже улучшении других служебных свойств, может быть достигнуто термическим (термомеханическим) упрочнением или контролируемой прокаткой. Более подробно эти возможности рассматриваются в п.1.6.

1.4. Низколегированные стали повышенной прочности

До сравнительно недавнего времени основным материалом для изготовления строительных металлоконструкций служила «мягкая» углеродистая сталь, которая за длительный период своего существования до настоящего времени почти не претерпела изменений (см.п.1.3) и по своим механическим характеристикам весьма близка к железу технической чистоты.

Стремление к повышению эффективности металлоконструкций привело к разработке свариваемых низколегированных сталей повышенной прочности. В нашей стране они появились в конце первой половины текущего столетия, первоначально

в виде многокомпонентных композиций типа марок ДС, НЛ-2, 15ХСНД, 10ХСНД, затем в виде более простых по составу и экономичных кремнемарганцовых сталей марок 14Г2, 09Г2С, 10Г2С1.

В этих обозначениях (кроме ДС и НЛ-2) цифры и буквы означают: двухзначные цифры слева – примерное среднее содержание углерода в сотых долях процента; буквы справа от цифры: Г – марганец, С – кремний, Х – хром: Н – никель, Д – медь; используют также буквы М – молибден, Ф – ванадий, Ю – алюминий, В – ниобий, А – азот, П – фосфор, Р – бор; цифры после букв – примерное содержание соответствующего элемента в целых единицах процентов.

Для получения стали этого вида используют легирующие элементы, упрочняющие в основном твердый раствор, α-железа и в меньшей степени образующие специальные карбиды или нитриды: кремний, марганец, медь, никель, хром, реже молибден. Прокат из стали поставляется как правило в состоянии непосредственно после горячей прокатки и имеет феррито-перлитную микроструктуру, хотя возможна поставка и в состоянии после термической обработки – нормализации или термического улучшения.

Предел текучести и временное сопротивление в прокате большинства марок низколегированной стали повышенной прочности обычно не превышает 350 и 500 МПа соответственно. Этот уровень обусловлен ограниченностью легирования, которое сдерживается, как указывалось, тремя факторами: ухудшением свариваемости, снижением сопротивления хрупкому разрушению и экономической эффективностью (см.п.1.1).

Ранее отмечалось, что при упрочнении строительной стали для сохранения или повышения сопротивления хрупкому разрушению необходимо одновременное существенное измельчение ее микроструктуры. Величина зерна феррита в прокате горячекатаной низколегированной стали зависит от его толщины. Она минимальна для тонкого проката, остывающего с наибольшей скоростью и возрастает с увеличением толщины. Все же в широком диапазоне употребляемых толщин зерно феррита в прокате низколегированной стали большинства марок остается более мелким, чем в прокате углеродистой стали. Именно этим обусловлена более значительная хладостойкость низколегированной стали, несмотря на ее повышенную прочность в сравнении с углеродистой.

Экономическая эффективность низколегированной стали зависит от ее оптовой цены, которая повышается с увеличением содержания легирующих элементов, особенно таких дорогих и дефицитных, как никель, медь, молибден.

В табл.1.14 и 1.16 приводится химический состав, а в табл.1.15 – механические свойства по ГОСТ 19282-73* отечественной низколегированной стали девяти марок. Механические свойства приводятся только для листового проката, так как для фасонного проката (ГОСТ 19281-89*) при соответствующей толщине они имеют близкие значения.

Стали, для которых обозначение марки условно дано с буквой Д в скобках, по требованию потребителей могут быть дополнительно легированы медью для повышения коррозионной стойкости. В этом случае буква Д, означающая медь, вводится в марочное обозначение. При отсутствии меди буква Д в марочное обозначение не вводится.

Приведенный в табл.1.14 химический состав относится к результатам плавочного контроля (ковшовая проба при разливке стали). Для химического состава в готовом прокате по ГОСТ 19282-73* допускаются отклонения, приведенные в табл.1.16.

Таблица 1.14. Химический состав низколегированных сталей повышенной прочности

Сталь марки	Содержание, % по массе								ГОСТ или ТУ
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	
				не более					
09Г2(Д)	Не более 0,12	0,17–0,37	1,4–1,8	0,04	0,03	Не более 0,3	Не более 0,3	(0,15–0,3)	ГОСТ 19282-73*
09Г2С(Д)	То же	0,5–0,7	1,3–1,7	0,04	0,035	То же 0,3	То же 0,3	(0,15–0,3)	ГОСТ 19282-73*
14Г2	0,12–0,18	0,17–0,37	1,2–1,6	0,04	0,035	То же 0,3	То же 0,3	Не более 0,3	ГОСТ 19282-73*
10Г2С1(Д)	Не более 0,12	0,8–1,1	1,3–1,65	0,04	0,035	То же 0,3	То же 0,3	(0,15–0,3	ГОСТ 19282-73*
15ХСНД	0,12–0,18	0,4–0,7	0,4–0,7	0,035	0,035	0,6–0,9	0,3–0,6	0,2–0,4	ГОСТ 6713-91
10ХСНД	Не более 0,12	0,8–1,1	0,5–0,8	0,035	0,035	0,6–0,9	0,5–0,8	0,4–0,6	ГОСТ 6713-91
17С	0,14–0,2	0,4–0,6	1–1,4	0,04	0,035	Не более 0,3	Не более 0,3	Не более 0,3	ГОСТ 19282-73*
17Г1С	0,15–0,2	0,4–0,6	1,15–1,6	0,04	0,035	То же 0,3	То же 0,3	То же 0,3	ГОСТ 19282-73*
17Г1С–У	0,15–0,2	0,4–0,6	1,15–1,55	0,02	0,025	То же 0,3	То же 0,3	То же 0,3	ТУ 14-1-1950-77

Примечания: 1. По требованию потребителя для стали по ГОСТ 19282-73* массовая доля фосфора должна быть не более 0,03%, серы – не более 0,035%, а для стали по ГОСТ 6713-91 – не более 0,025% и 0,03% соответственно. 2. Допускается добавка алюминия и титана из расчета получения массовой доли в прокате алюминия – не более 0,05%, титана – не более 0,03%. 3. Массовая доля остаточного азота в стали не должна превышать 0,008%.

Таблица 1.15. Механические свойства низколегированной стали повышенной прочности

Марка стали, ГОСТ или ТУ	Толщина проката, мм	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2 при температуре °С					Испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° при диаметре оправки
								После механического старения		
					-40	-60	-70	+20	-20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
09Г2(Д) ГОСТ 19282-73*	До 5	440	305	21	–	–	–	–	–	*d*=2*a*
	От 5 до 10	440	305	21	34	–	–	29	–	*d*=2*a*
	От 10 до 20 вкл.	440	305	21	29	–	–	29	–	*d*=2*a*
	Св.20 до 32 вкл.	440	295	21	29	–	–	29	–	*d*=2*a*

Продолжение табл.1.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	До 5	490	345	21	–	–	–	–	–	*d*=2*a*
	От 5 до 10	490	345	21	39		34	29	–	*d*=2*a*
09Г2С(Д)	От 10 до 20 вкл.	470	325	21	34	–	29	29	–	*d*=2*a*
ГОСТ 19282-73*	Св.20 до 32 вкл.	460	305	21	34	–	29	29	–	*d*=2*a*
	От 32 до 60 вкл.	450	285	21	34	–	29	29	–	*d*=2*a*
	От 60 до 80 вкл.	440	275	21	34	–	29	29	–	*d*=2*a*
	От 80 до 160 вкл.	430	265	21	34	–	29	29	–	*d*=2*a*
	Менее 5	460	335	21	–	–	–	–	–	*d*=2*a*
14Г2	От 5 до 10	460	335	21	34	–	–	29	–	*d*=2*a*
ГОСТ 19282-73*	От 10 до 20 вкл.	450	325	21	29	–	–	29	–	*d*=2*a*
	Св.20 до 32 вкл	450	325	21	29	–	–	29	–	*d*=2*a*
	До 5	490	355	21	–	–	–	–	–	*d*=2*a*
	От 5 до 10	490	345	21	39	–	29	29	–	*d*=2*a*
	От 10 до 20 вкл.	480	335	21	29	–	24	29	–	*d*=2*a*
10Г2С1(Д)	Св.20 до 32 вкл.	470	325	21	29	–	24	29	–	*d*=2*a*
	От 32 до 60 вкл.	450	325	21	29	–	24	29	–	*d*=2*a*
	От 60 до 80 вкл.	430	295	21	29	–	24	29	–	*d*=2*a*
	От 80 до 100 вкл.	430	295	21	29	–	24	29	–	*d*=2*a*
15ХСНД	От 8 до 32	490-687	345	21	29	29	29	29	29	*d* =2*a*
ГОСТ 6713-91	Св.32 до 50	470-667	335	19	–	29	29	29	29	*d* =2*a*
10ХСНД	От 8 до 15	530–687	392	19	39	29	29	29	29	*d*=2*a*
ГОСТ 6713-91	Св. 15 до 32 вкл.	530–667	392	19	–	29	29	29	29	*d*=2*a*
	От 32 до 40 вкл.	510–667	392	19	–	29	29	29	29	*d*=2*a*
17ГС	До 5	510	345	23	–	–	–	–	–	*d*=2*a*
ГОСТ 19282-73*	От 5 до 10	510	345	23	44	–	–	29	–	*d*=2*a*
	От 10 до 20 вкл.	490	335	23	34	–	–	29	–	*d*=2*a*
17Г1С	До 5	510	355	23	–	–	–	–	–	*d*=2*a*
ГОСТ 19282-73*	От 5 до 10	510	355	23	44	–	–	29	–	*d*=2*a*
	От 10 до 20 вкл.	510	345	23	39	–	–	29	–	*d*=2*a*
17Г1С–У* ТУ 14-1-1950-77	От 9,5 до 17 вкл.	510–628	362–461	23	49	–	–	–	–	–

* Для стали марки 17Г1С–У* гарантируется также ударная вязкость KCV при 0°С не менее 39 Дж/см^2 и доля волокна в изломе образцов ДВТТ при 0°С не менее 55%.

Таблица 1.16. Отклонения по химическому составу в готовом прокате низколегированных сталей по ГОСТ 19282-73*

Наименование элемента	Допускаемое отклонение	Наименование элемента	Допускаемое отклонение
Углерод	±0,02	Ванадий	+0,02
Кремний	±0,05		–0,01
Марганец	±0,10	Ниобий	+0,010
Хром	±0,05		–0,005
Никель	±0,05	Азот	+0,005
Медь	±0,05	Сера	+0,005
		Фосфор	+0,005

Собственно для сварных строительных конструкций при проектировании регламентировано использование только стали марок 09Г2(Д), 09Г2С(Д), 14Г2, 10Г2С1(Д), 15ХСНД и 10ХСНД. Сталь марок 17ГС и 17Г1С применяется для электросварных труб нефте- и газопроводного сортамента. Однако из-за большого количества производимого в стране штрипса (листовых заготовок для труб) прокат из этих сталей часто предлагается в качестве замены листового проката низколегированной стали других марок. Применение стали марок 17ГС и 17Г1С в наиболее ответственных конструкциях (подвергающихся динамическому или переменному нагружению, эксплуатируемых при низких расчетных температурах – «северное исполнение» и т.п.) вследствие повышенного содержания углерода и обусловленного этим пониженного сопротивления хрупкому разрушению сварных соединений, так же как и сталь марки 10Г2С1 из-за высокого содержания кремния, не рекомендуется.

Индустриализация капитального строительства требует всемерной унификации материалов и, в частности, сокращения количества применяемых марок низколегированной стали. Поэтому основным материалом данного класса прочности С345 в связи с оптимальным сочетанием характеристик свариваемости, хладостойкости и технико-экономической эффективности признана сталь марки 09Г2С. Ее применение рекомендовано для строительных металлоконструкций всех видов.

Недостаток этой стали состоит в существенном снижении показателей прочности – предела текучести и временного сопротивления разрыву с увеличением толщины проката. Эта особенность служит также причиной частого несоответствия указанных характеристик заданным нормам при сдаточных механических испытаниях на металлургических заводах. Для устранения этого недостатка рядом организаций поставщиков и потребителей исследуется возможность корректировки химического состава стали путем небольшого увеличения содержания углерода, которому соответствует марочное обозначение 12Г2С.

Это требование всемерной унификации марочного сортамента стали нашло отражение в новом стандарте на прокат для строительных стальных конструкций ГОСТ 27772-88*, в котором предусмотрены лишь два варианта низколегированной стали повышенной и высокой прочности с химическим составом, соответствующим маркам 09Г2С и 12Г2С. Нормы химического состава и механических свойств для этих сталей, включенных в стандарт с наименованием С345 и С375, приведены в табл.1.17 и 1.18.

Таблица 1.17. Химический состав (плавочный анализ ковшовой пробы) низколегированной стали повышенной прочности по ГОСТ 27772-88*

Наименование стали	Массовая доля элементов, %							
	углерода	марганца	кремния	серы	фосфора	хрома	никеля	меди
С345, С375	≤0,15	1,3–1,7	≤0,8	≤0,04	≤0,035	≤0,3	≤0,3	≤0,3

Примечания: 1. Допускается добавка алюминия и титана из расчета получения в прокате массовой доли титана 0,01–0,03%. 2. По требованию потребителя массовая доля фосфора должна быть не более 0,03%, серы – не более 0,035%.

Таблица 1.18. Механические свойства низколегированной стали повышенной прочности по ГОСТ 27772-88*

Наименование стали	Толщина проката, мм	Механические характеристики			Изгиб до параллельности сторон (a – толщина образца, d – диаметр оправки)	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2		
		предел текучести $\sigma_т$, Н/мм^2	временное сопротивление $\sigma_в$, Н/мм^2	относительное удлинение δ_5, %		при температуре °С		после механического старения
						-40	-70	
						не менее		
Фасонный прокат								
С345	От 4 до 10 вкл.	345	490	21	$d=2a$	39	34	29
	Св.10 до 20 вкл.	325	470	21	$d=2a$	34	29	29
	Св.20 до 40 вкл.	305	460	21	$d=2a$	34	–	29
С375	От 4 до 10 вкл.	375	510	20	$d=2a$	39	34	29
	Св.10 до 20 вкл.	355	490	20	$d=2a$	34	29	29
	Св.20 до 40 вкл.	335	480	20	$d=2a$	34	–	29
Листовой и широкополосный универсальный прокат								
С345	От 2 до 3,9	345	490	15	$d=2a$	–	–	–
	От 4 до 10 вкл.	345	490	21	$d=2a$	39	34	29
	Св.10 до 20 вкл.	325	470	21	$d=2a$	34	29	29
	Св.20 до 40 вкл.	305	460	21	$d=2a$	34	29	29
	Св.40 до 60 вкл.	285	450	21	$d=2a$	34	29	29
	Св.60 до 80 вкл.	275	440	21	$d=2a$	34	29	29
	Св.80 до 160 вкл.	265	430	21	$d=2a$	34	29	29
С375	От 2 до 3,9	375	510	14	$d=2a$	–	–	–
	От 4 до 10 вкл.	375	510	20	$d=2a$	39	34	29
	Св.10 до 20 вкл.	355	490	20	$d=2a$	34	29	29
	Св.20 до 40 вкл.	335	480	20	$d=2a$	34	29	29

Сталь изготовляют четырех категорий (1-4) в зависимости от требований по испытаниям на ударный изгиб. Нормируемые показатели ударной вязкости для проката разных категорий приведены в табл.1.19.

Таблица 1.19. Нормируемые показатели ударной вязкости для проката из стали марок С345 и С375 разных категорий по ГОСТ 27772-88*

Нормируемая характеристика	Категория			
	1	2	3	4
Ударная вязкость при:				
-40°С	+	–	+	–
-70°С	–	+	–	+
Ударная вязкость после механического старения	–	–	+	+

Примечание. Знак «+» означает, что показатель нормируется, знак «–» не нормируется.

Для элементов металлоконструкций автодорожных и железнодорожных мостов таким основным материалом является низколегированная сталь марки 10ХСНД по ГОСТ 6713-91. Ее применение обусловлено повышенным сопротивлением атмосферной коррозии, связанным с многокомпонентным легированием (подробнее об этом см. п.1.8).

В зависимости от требований по ударной вязкости низколегированные стали по ГОСТ 19282-73* поставляются 15-и категорий, причем для строительных металлоконструкций применяются стали четырех категорий: 6-й, 12-й, 9-й и 15-й. При этом для стали 6-й и 12-й категорий ударная вязкость KCU гарантируется при температуре минус 40 °С, а для стали 9-й и 15-й категорий – при температуре минус 70 °С. Кроме того, для стали 12-й и 15-й категорий гарантируется еще и ударная вязкость при плюс 20 °С после механического старения.

Низколегированные стали по ГОСТ 6713-91 для мостостроения поставляются трех категории: 1–3. При этом для стали 1-й категории гарантируется ударная вязкость KCU при минус 40 °С и при плюс 20 °С после механического старения, 2-й категории – при минус 60 °С и при плюс 20 °С после механического старения, 3-й категории – при минус 70 °С и при минус 20 °С после механического старения. Нормы ударной вязкости при отрицательных температурах и после механического старения приведены в табл.1.15.

Как уже указывалось, подавляющая масса металлопроката низколегированных сталей повышенной прочности поставляется в состоянии непосредственно после горячей прокатки. Однако возможна также поставка части листового проката в состоянии после термической обработки: нормализации (нагрев до 890–950 °С и остывание на воздухе) или термического улучшения (после нагрева закалка в воде с последующим высоким отпуском при 620–680 °С). Нормализация несколько измельчает микроструктуру и способствует ее большей однородности по сечению. Она применяется обычно для повышения ударной вязкости при низких отрицательных температурах. Радикальным средством для достижения этого является термическое улучшение. Листы из стали марок 09Г2(Д) и 10Г2С1(Д) толщиной более 20 мм поставляются в нормализованном или термоулучшенном состояниях, а сталь марки 10ХСНД толщиной более 15 мм – преимущественно в термоулучшенном состоянии.

1.5. Высокопрочные стали с карбонитридным упрочнением с феррито-перлитной микроструктурой

Возможность повышения прочности строительной стали, связанная с измельчением ее микроструктуры, появилась в связи с применением на металлургических заводах новых термодеформационных режимов горячей прокатки и освоением термической обработки готового проката. Разработаны три основных способа упрочнения с одновременным измельчением микроструктуры: горячая обработка давлением с большими обжатиями при пониженных температурах – контролируемая прокатка; термическая обработка с ускоренным охлаждением от высоких температур – закалка, часто с последующим отпуском; специальное микролегирование в сочетании с термической обработкой – карбонитридное упрочнение. Известны также комбинации этих основных способов.

В нашей стране для производства высокопрочной стали нашли применение все три способа. Однако наибольшее распространение получил способ карбонитридного упрочнения [29, 30]. В этом способе, основанном на введении в сталь небольших добавок сильных карбидо- и нитридообразующих элементов с обязательной термической обработкой, упрочнение за счет образования дисперсных выделений карбонитридов удачно совмещается с сильным измельчением зерна стали, что позволяет при значительном возрастании механической прочности сохранить и даже существенно повысить сопротивление хрупкому разрушению. Способ экономичен и не ухудшает свариваемости, так как повышение прочности и хладостойкости достигается при весьма ограниченных добавках карбидо- и нитридообразующих элементов, в сумме не превышающих 0,2 % по массе.

Согласно результатам некоторых работ для упрочнения низколегированной феррито-перлитной строительной стали могут быть использованы карбиды и нитриды ряда элементов: алюминия, ванадия, ниобия, тантала, берилия, лантана, молибдена и вольфрама. Однако из экономических и технологических соображений в России для этой цели были использованы карбонитриды ванадия и нитриды алюминия. При этом небольшие добавки карбидо- и нитридообразующих элементов: ванадия, алюминия и азота вводятся при выплавке в рядовую низколегированную сталь типа 14Г2, содержащую до 1,2–1,7 % марганца.

Готовый прокат подвергают термической обработке – нормализации, включающей нагрев до 890–950 °С, при котором в стали формируются дисперсные частицы карбонитридов диаметром 10^{-2}-10^{-1} мкм, сдерживающие рост зерна при нагреве и резко измельчающие микроструктуру. Карбонитридное упрочнение, обеспечивая особо мелкозернистую микроструктуру со средним диаметром зерна феррита 5–12 мкм (10–12 баллов) по шкале ГОСТ 5639-82*, мало зависящую от толщины проката (рис.1.4), позволяет получать сталь с высоким пределом текучести ≥ 400–450 МПа и низкой температурой хрупкости (рис. 1.5 и 1.6) [30].

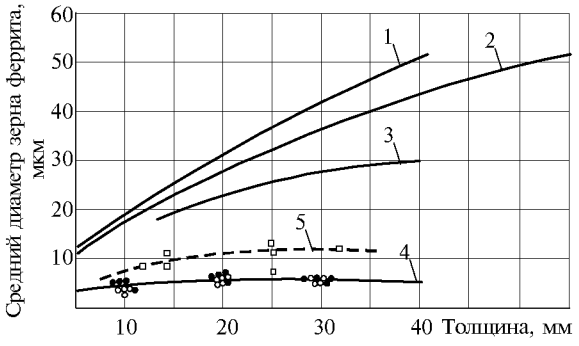


Рис.1.4. Зависимость величины зерна феррита от толщины листов строительной стали разных марок
1 – Ст3кп; *2* – Ст3сп; *3* – 09Г2С и 10Г2С1; *4* – 16Г2АФ завода "Азовсталь" из литых слябов НЛМЗ (светлые точки) и катанных слябов КМЗ (темные точки); *5* – 16Г2АФ производства ОХМК

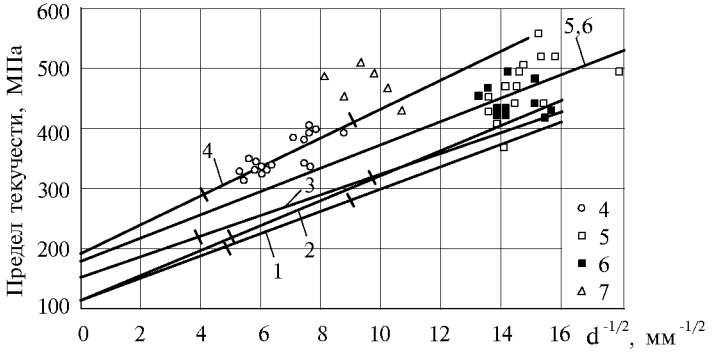


Рис.1.5. Зависимость предела текучести от величины зерна феррита толстолистовой стали разных марок

1 – Ст3кп; *2* – Ст3пс; *3* – Ст3сп; *4* – 09Г2С и 10Г2С1; *5* – 16Г2АФ из литых слябов НЛМЗ; *6* – 16Г2АФ из катанных слябов КМЗ; *7* – 16Г2АФ производства ОХМК

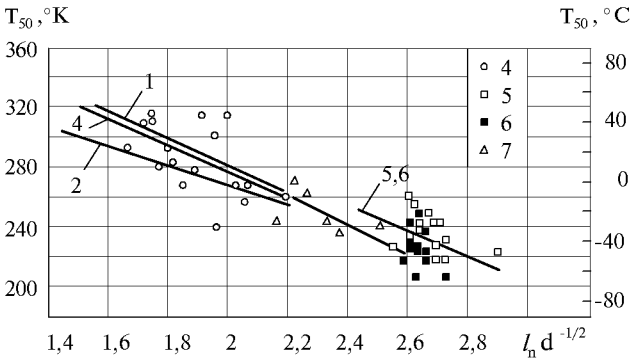


Рис.1.6. Зависимости температуры хрупкости T_{50} от величины зерна феррита толстолистовой стали разных марок (обозначения те же, что и на рис.1.5.)

В табл.1.20 приводится химический состав, а в табл.1.21 механические свойства по ГОСТ 19282-73* для трех марок отечественной листовой высокопрочной феррито-перлитной стали с карбонитридным упрочнением, используемой в металлоконструкциях.

Таблица 1.20. Химический состав[1] феррито-перлитных сталей с карбонитридным упрочнением

Сталь марки	Массовая доля элементов, % [3]							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu [2]	V	N
14Г2АФ(Д)	0,12–0,18	0,3–0,6	1,2–1,6	≤ 0,4	≤ 0,3	(0,15–0,3)	0,07–0,12	0,015–0,025
15Г2АФДпс	0,12–0,18	До 0,17	1,2–1,6	≤ 0,3	≤ 0,3	0,2–0,4	0,08–0,15	0,015–0,03
16Г2АФ(Д)	0,14–0,2	0,3–0,6	1,3–1,7	≤ 0,4	≤ 0,3	(0,15–0,3)	0,08–0,14	0,015–0,025

[1] Массовая доля фосфора в стали должна быть не более 0,035%, серы – не более 0,04%; по требованию потребителя массовая доля фосфора должна быть не более 0,03%, серы – не более 0,035%.

[2] Стали, для которых марка условно обозначена с буквой Д в скобках, по требованию потребителя дополнительно легируются медью; в этом случае буква Д вводится в марочное обозначение.

[3] В готовом прокате допускаются отклонения по химическому составу, указанные в табл.1.17

Таблица 1.21. Механические свойства феррито-перлитных сталей с карбонитридным упрочнением в листовом прокате

Марка стали	Толщина проката, мм	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2 при температуре °С			Испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° при диаметре оправки
					-40	-70	+20 после механического старения	
		Не менее						
14Г2АФ(Д)	До 5	540	390	20	–	–	–	$d=2a$
	От 5 до 10	540	390	20	44	34	29	$d=2a$
	От 10 до 32 вкл.	540	390	20	39	29	29	$d=2a$
	Св.32 до 50 вкл.	540	390	20	39	29	29	$d=2a$
15Г2АФДпс	До 5	540	390	19	–	–	–	$d=2a$
	От 5 до 10	540	390	19	44	34	29	$d=2a$
	От 10 до 20 вкл.	540	390	19	39	29	29	$d=2a$
	Св.20 до 32 вкл.	540	390	19	39	29	29	$d=2a$
16Г2АФ(Д)	До 5	590	440	20	–	–	–	$d=2a$
	От 5 до 10	590	440	20	44	34	29	$d=2a$
	От 10 до 32 вкл.	590	440	20	39	29	29	$d=2a$
	Св.32 до 50 вкл.	570	410	20	39	29	29	$d=2a$

Примечание. По требованию потребителя значения временного сопротивления разрыву не должны превышать 690 МПа для стали марок 14Г2АФ(Д) и 15Г2АФДпс и 780 МПа для стали марки 16Г2АФ(Д).

Высокопрочные стали с карбонитридным упрочнением по ГОСТ 19282-73* так же, как и низколегированные стали повышенной прочности, в зависимости от требований по ударной вязкости поставляются 15-и категорий, из которых для строительных металлоконструкций используются четыре: 6-я, 12-я, 9-я и 15-я. Для сталей 6-й и 12-й категорий ударная вязкость гарантируется при минус 40 °С, а для сталей 9-й и 15-й категорий – при минус 70 °С. Кроме того, для сталей 12-й и 15-й категорий гарантируется еще и ударная вязкость после механического старения.

По ГОСТ 27772-88* для строительных стальных конструкций также предусмотрена поставка стали трех вариантов с карбонитридным упрочнением с наименованием С390, С390К и С440. Сталь с наименованием С390 и С440 поставляется в листах толщиной 4–50 мм, с наименованием С390К – в листах толщиной 4–30 мм. Нормы химического состава и механических свойств сталей С390, С390К и С440 близко соответствуют нормам ГОСТ 19282-73* (см. табл.1.22 и 1.23) для аналогичных сталей марок 14Г2АФ, 15Г2АФДпс и 16Г2АФ категории 9.

Низколегированную сталь с карбонитридным упрочнением, как и другие варианты стали с феррито-перлитной микроструктурой, можно подвергать горячей вальцовке, штамповке и т.д. При этом температурный режим горячего деформирования (температура нагрева и скорость охлаждения) должен по-возможности соответствовать принятому режиму нормализации[1] . В этом случае удается совместить горячее деформирование с заключительной термической обработкой. Превышение температуры нагрева, принятой для нормализации, или увеличение скорости охлаждения повышает прочность, но снижает пластичность, вязкость и хладостойкость вследствие образования неблагоприятной микроструктуры.

При изготовлении конструкций или в процессе эксплуатации сталь может подвергаться длительным или кратковременным нагревам в субкритической температурной области. Дополнительный отпуск при 550–650 °С в течение 3–5 ч нормализованной стали типа 16Г2АФ практически не влияет ни на прочность, ни на ударную вязкость при комнатной и пониженной температурах. Выдержка до 1000 ч при 400–500 °С также мало влияет на ее механические свойства, что объясняется большой стабильностью феррито-перлитной микроструктуры.

При соответствующем подборе присадочных материалов, флюсов и электродных покрытий и соблюдении основных технологических требований сварку стали марок 14Г2АФ(Д), 16Г2АФ и 15Г2АФДпс можно производить любыми способами, принятыми при изготовлении и монтаже строительных металлоконструкций. При умеренном содержании углерода и легирующих элементов в стали твердость в околошовной зоне даже при значительных скоростях охлаждения (≥ 50 °С/с) не превышает 300 HV и ударная вязкость сохраняется высокой в широком диапазоне режимов (рис.1.7) [7]. Увеличение содержания углерода и марганца до уровня, близкого к верхнему пределу марочного состава, усиливает зависимость максимальной твердости и ударной вязкости в околошовной зоне от скорости охлаждения, однако и здесь максимальная твердость не превышает 350 HV. Оптимальные механические свойства достигаются при скорости охлаждения 10–20 град/с. Приемлемыми следует считать режимы, обеспечивающие мгновенную скорость охлаждения металла околошовной зоны при 600 °С не менее 3–5 град/с и не более 30 град/с.

Сталь марок 14Г2АФ(Д), 15Г2АФДпс и 16Г2АФ при соответствующем технико-экономическом обосновании пригодна для конструкций, эксплуатируемых как в обычных условиях, так и для наиболее ответственных конструкций, подвергающихся переменному и динамическому нагружению, в том числе при низкой кли-

[1] Все же количество таких нагревов должно быть ограниченным и не превышать двух-четырех во избежание появления локальных участков с крупнозернистой микроструктурой.

матической температуре (расчетная температура ниже -40 °С «северное исполнение»). В последнем случае к стали предъявляются требования по ударной вязкости не менее 30 Дж/см^2 при минус 70 °С.

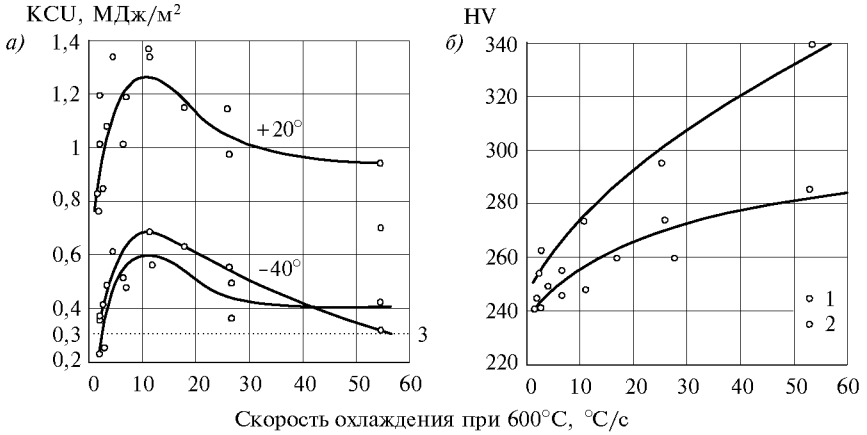


Рис.1.7. Влияние скорости охлаждения при сварке на ударную вязкость (*а*) и максимальную твердость (*б*) в околошовной зоне сталей 14Г2АФ и 16Г2АФ

1 – сталь содержит 0,14% С, 1,34% Mn, 0,47% Si, 0,14% V, 013% N;
2 – 0,19% С, 1,65% Mn, 0,57% Si, 0,11% V, 0,015% N

Стали указанных марок обычно поставляются металлургическими заводами преимущественно в виде листов толщиной 8–50 мм. Кроме того, освоено изготовление из стали марки 16Г2АФ электросварных труб диаметром 165–426 мм и с толщиной стенки 3–9 мм, а также горячекатаных бесшовных труб диаметром до 426 мм и толщиной 20–40 мм.

1.6. Закаленно-отпущенные экономно-легированные стали высокой прочности

Для нормализованной высокопрочной стали с феррито-перлитной микроструктурой гарантируемые значения предела текучести и временного сопротивления разрыву не превышают 500 и 650 МПа соответственно. Более высокую прочность при сохранении необходимого уровня свариваемости и хладостойкости удается получить, подвергая сталь закалке и отпуску [7]. При этом возможны разнообразные вариации химического состава. Однако наиболее эффективными и здесь оказываются стали с карбонитридным упрочнением [30]. Сущность карбонитридного упрочнения при этом не изменяется. Особенность состоит лишь в том, что измельчение зерна аустенита нерастворившимися при нагреве для закалки дисперсными карбонитридами способствует измельчению микроструктуры продуктов закалки («пакетов» мартенсита и нижнего бейнита), а растворившиеся карбонитриды обеспечивают упрочнение, обусловленное дисперсионным твердением и торможением процессов возврата и рекристаллизации при отпуске.

Следует указать, что путем одной лишь закалки рядовой низколегированной стали типов 14Г2, 16ГС, 14ХГС и других употребляемых в прокате толщин (до 20 мм включительно) достигается весьма высокое упрочение с пределом текучести $\sigma_{0,2} \geq 750$ и временным сопротивлением разрыву $\sigma_в \geq 850$ МПа при сохранении достаточной пластичности $\delta_5 \geq 12$ % и $\psi \geq 45$ %. Однако под действием тепла сварочной дуги такая закаленная сталь разупрочняется на 15–30 %. Разупрочнение, обусловленное высоким отпуском и перекристаллизацией, достигает максимума на участке неполной перекристаллизации вблизи его внешней границы (рис.1.8). От-

носительная величина разупрочнения и ширина охватываемого им участка тем больше, чем значительнее тепловложение сварки и чем выше упрочнилась сталь при закалке.

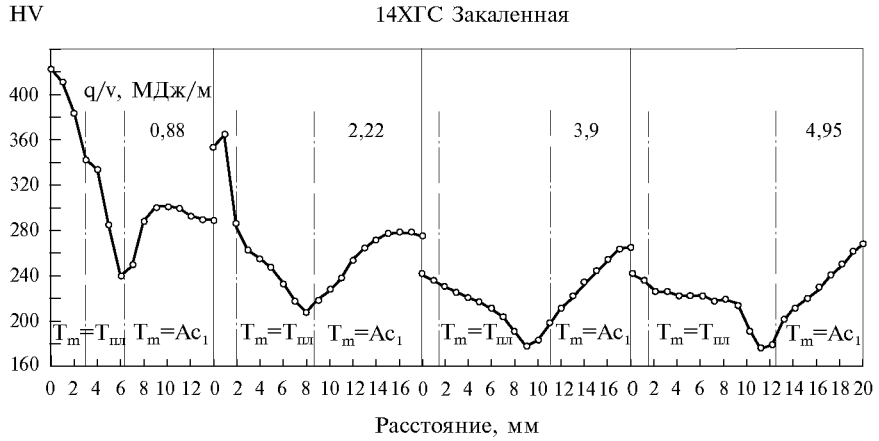


Рис.1.8. Распределение твердости в околошовной зоне сварных соединений толщиной 20 мм, закаленной душем низколегированной стали марки 14ХГС при сварке с разным тепловложением

Легирование молибденом, ванадием, а также некоторыми другими элементами, способствуя сохранению высокой прочности в состоянии после закалки и отпуска, позволяет существенно уменьшить степень разупрочнения и ширину разупрочненной зоны (рис.1.9). Из числа предложенных в России высокопрочных закаленно-

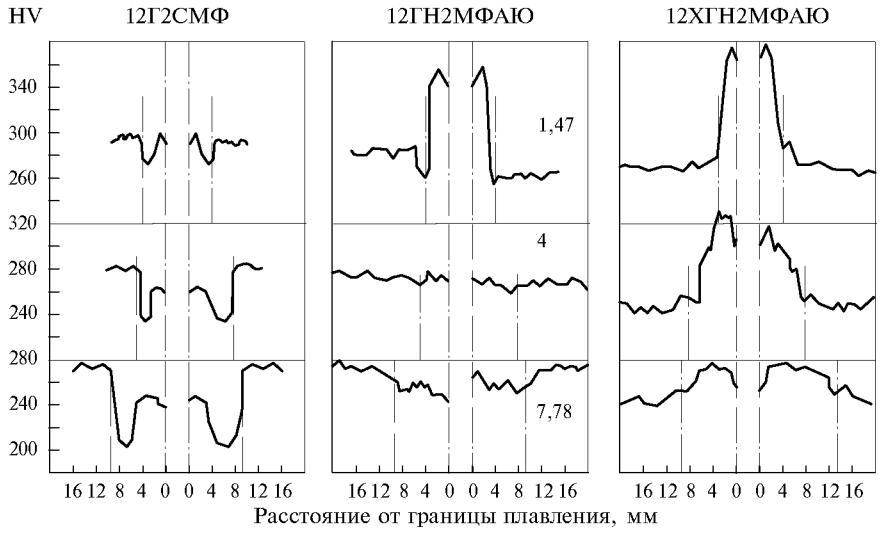


Рис.1.9. Распределение твердости в околошовной зоне сварных соединений толщиной 20 мм термоулучшенных высокопрочных сталей марок 12Г2СМФ, 12ГН2МФАЮ и 12ХГН2МФБАЮ при автоматической сварке с разным тепловложением

отпущенных сталей для различных сварных строительных конструкций может быть рекомендована сталь марок 12Г2СМФ, 12ГН2МФАЮ, 14Х2ГМР и 12ХГН2МФБАЮ. Химический состав сталей и их гарантируемые механические свойства приведены в табл.1.22 и 1.23.

Таблица 1.22. Химический состав высокопрочных закаленно-отпущенных сталей

Сталь марки	Содержание, % по массе													ТУ
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Al	N	S	P	
12Г2СМФ*	0,09 – 0,15	1,3 – 1,7	0,4 – 0,7	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	0,15 – 0,25	0,07 – 0,15	–	–	–	≤ 0,035	≤ 0,035	ТУ 14-1-1308-75
12ГН2МФАЮ	0,09 – 0,14	0,9 – 1,4	0,2 – 0,5	0,2 – 0,5	1,4 – 1,75	≤ 0,3	0,15 – 0,25	0,05 – 0,1	–	0,05 – 0,1	0,02 – 0,03	≤0,035	≤0,035	ТУ 14-1-1772-76
14Х2ГМР**	0,1 – 0,17	0,9 – 1,2	0,17 – 0,37	1,4 – 1,7	≤ 0,3	≤ 0,3	0,45 – 0,55	0,03	–	–	–	≤0,035	≤0,035	ТУ 14-101-156-7
12ХГН2МФБАЮ	0,09 – 0,16	0,9 – 1,3	0,3 – 0,5	0,5 – 0,9	1,4 – 1,7	≤ 0,3	0,3 – 0,4	0,05 – 0,1	0,02 – 0,06	0,05 – 0,1	0,02 – 0,03	≤0,035	≤0,035	ТУ 14-104-13-7

* Допускается для повышения вязкости введение в сталь марки 12 Г2СМФ 0,05 – 0,10% алюминия и 0,015 – 0,03% азота, при этом сталь обозначается 12Г2СМФАЮ.

** В сталь марки 14Х2ГМР вводится 0,002 – 0,006% бора.

Таблица 1.23. Механические свойства листовых высокопрочных закаленно-отпущенных сталей

Сталь марки	Толщина листов, мм	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2 при температуре °С		Количество волокна в изломе крупной судостроительной пробы при +20°С, %	Испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° при диаметре оправки, равном
					-40	-70		
		Не менее						
12Г2СМФ	10–36	685	590	14	34	–	–	3*a*
12ГН2МФАЮ	16–40	685	590	14	–	29	80	3*a*
		880	785					
14Х2ГМР	4–50	685	590	14	39	–	–	3*a*
12ХГН2МФБАЮ	16–40	835	735	2	–	29	50	3*a*

Сталь марок 12Г2СМФ, 12ГН2МФАЮ и 12ХГН2МФБАЮ принадлежат к группе сталей с карбонитридным упрочнением, сталь марки 14Х2ГМФ относится к бейнитным сталям (при охлаждении на воздухе после аустенитизации в прокате значительной толщины образуется микроструктура бейнит). Тепловое воздействие сварки несколько уменьшает исходную твердость в околошовной зоне стали марки 12Г2СМФ, однако разупрочненный участок узок (2–10 мм) и не вызывает снижения временного сопротивления разрыву образцов сварных соединений с поперечными сварными швами при растяжении. Разупрочнение при сварке других рекомендуемых сталей мало и его практически не следует принимать во внимание.

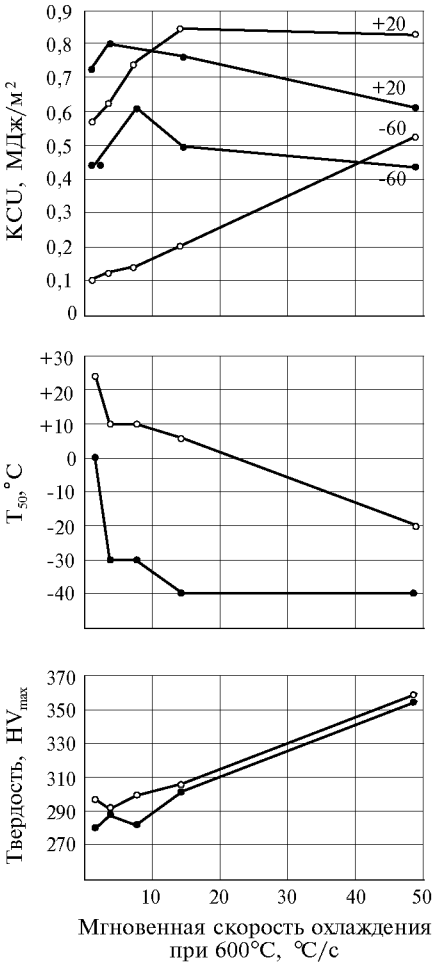


Рис.1.10. Зависимость ударной вязкости при плюс 20 и минус 60°, а также температуры хрупкости T_{50} и максимальной твердости металла околошовной зоны сварных соединений стали 12Г2СМФ (светлые точки) и 12ГН2МФАЮ (темные точки) от скорости охлаждения при автоматической сварке

Два варианта проката высокопрочной закаленно-отпущенной стали предусматривает ГОСТ 27772-88*. Эти стали имеют наименование С590 и С590К. При этом сталь С590 поставляется в виде листов толщиной 10–36 мм и по химическому составу аналогична стали марки 12Г2СМФ по табл.1.22; сталь С590К поставляется в листах толщиной 10–40 мм и ее химический состав соответствует составу стали марки 12ГН2МФАЮ по той же таблице. Нормы механических свойств для листов сталей С590 и С590К те же, что и в табл.1.23 для соответствующих сталей.

Сталь марки 12Г2СМФ рекомендуется для конструкций, эксплуатируемых в обычных условиях при расчетной температуре не ниже минус 40 °С. Сталь марок 12ГН2МФАЮ и 12ХГН2МФБАЮ благодаря повышенной хладостойкости может быть использована для наиболее ответственных металлоконструкций, в том числе эксплуатируемых при динамическом нагружении и расчетной температуре минус 40 °С («северное исполнение»). Свои преимущества в хладостойкости эти стали сохраняют и в околошовной зоне сварных соединений (рис.1.10). Оптимальные свойства в околошовной зоне достигаются при сварке на тепловых режимах, которым соответствует мгновенная скорость охлаждения при 600 °С в пределах 7–30 град/с. Заметное снижение ударной вязкости и повышение температуры хрупкости наблюдается при уменьшении скорости охлаждения ниже 5 град/с.

Все перечисленные стали имеют значительный запас пластичности, что позволяет применять при изготовлении конструкций все виды механической обработки, а также холодную обработку давлением: гибку, вальцовку, штамповку и т.д.

В настоящее время закаленно-отпущенные высокопрочные стали поставляются только в виде листов толщиной 10–50 мм, причем для стали марок 12Г2СМФ и 12ГН2МФАЮ максимальная толщина ограничена величиной 40 мм по условию прокаливаемости. Сравнительно узкий диапазон толщин обусловлен параметрами действующего в термических отделениях металлургических заводов нагревательного и охлаждающего оборудования. Вместе с тем прокаливаемость наиболее легированной бейнитной стали марки 14Х2ГМР так значительна, что может обеспечить достижение требуемых механических характеристик в прокате толщиной 150–200 мм.

1.7. Стали после контролируемой прокатки и термического упрочнения

1.7.1. Стали после контролируемой прокатки. В п.1.5 рассматривался способ получения высокопрочной стали с сильным измельчением феррито-перлитной микроструктуры в результате микролегирования, создающего дисперсные карбонитриды – карбонитридное упрочнение. В этом способе мелкозернистая структура формируется при термической обработке проката – нормализации.

Однако существует и другая технология получения мелкозернистой феррито-перлитной стали, часто с микролегирующими добавками карбонитридов, но непосредственно после горячей пластической деформации, осуществляемой по специальным термомеханическим режимам, получившая название контролируемой прокатки [25]. Ее спецификой является пластическая деформация при пониженных температурах, при которых рекристаллизация и рост зерен деформированного аустенита существенно замедляются, особенно в присутствии дисперсных выделений карбонитридов. Температура окончания прокатки лежит в пределах 850–700 °С, причем используются две технологические возможности: образование конечной микроструктуры из деформированного аустенита до его рекристаллизации; получение мелкозернистой исходной микроструктуры вследствие рекристаллизации обработки аустенита, предшествующей полиморфному $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению.

Образование мелких зерен феррита обусловлено в первом случае высокой плотностью дефектов кристаллического строения в решетке аустенита – его наклепом при прокатке, во втором случае – наследованием малой величиной зерна феррита и малой величины зерна аустенита. В обоих случаях образованию мелкозернистой конечной феррито-перлитной микроструктуры способствует возникновение в исходной аустенитной микроструктуре большого количества центров кристаллизации.

Характерной особенностью микроструктуры стали после контролируемой прокатки является значительно более заметная разница в величине соседних ферритных зерен, чем при карбонитридном упрочнении (разнозеренность), а также, часто, наличие внутри зерен еще более однородных областей – субзерен, разделенных дислокационными малоугловыми границами. При этом часто расположение более крупных зерен феррита в микроструктуре повторяет расположение границ бывших аустенитных зерен, особенно после контролируемой прокатки по первому технологическому варианту.

В качестве микролегирующих добавок при контролируемой прокатке могут использоваться карбиды и нитриды ряда элементов, например, ванадия, титана, алюминия. Однако наиболее эффективными являются добавки дефицитного (пока) в нашей стране ниобия. Обычно он вводится в сталь в количестве 0,02–0,06 %.

Другой необходимой предпосылкой контролируемой прокатки является наличие особо мощных прокатных станов, способных быстро деформировать металл при пониженных температурах без заметного снижения производительности при достаточной надежности и долговечности оборудования. Значительную роль играет

также скорость охлаждения, подавляющего развитие рекристаллизационных процессов, вследствие чего возможность получения эффекта контролируемой прокатки с увеличением толщины уменьшается. В настоящее время контролируемая прокатка осуществляется в основном при получении металлоизделий толщиной до 20 мм: горячекатаной широкой полосы и штрипса (листовых заготовок для электросварных труб магистральных газопроводов).

Хорошие результаты дает контролируемая прокатка широкой рулонной полосы толщиной 2,5–8 мм из углеродистой стали (типа Ст3сп) с микродобавками алюминия, титана и ванадия. Производство такой полосы освоено на непрерывном широкополосном стане 2000 Череповецкого металлургического комбината. Полоса четырех уровней прочности с марочными обозначениями: Ч-33, Ч-37, Ч-40 и Ч-44 (Ч – череповецкая) поставляется для нужд строительства и сельскохозяйственного машиностроения с гарантированными пределами текучести (не менее) 325, 365, 390 и 430 Н/мм^2 и временным сопротивлением разрыву 450, 480, 510 и 545 Н/мм^2 соответственно.

Полоса первых трех уровней прочности используется в качестве материала гнутых и гнутосварных профилей для легких строительных металлоконструкций комплектной поставки вместо более дорогой и дефицитной стали марки 09Г2С. Химический состав и механические свойства полосы приводятся в табл.1.24 и 1.25. Величина зерна феррита полосы колеблется в пределах, оцениваемых нормами 9–11 шкалы ГОСТ 5639-82* (средний диаметр зерна 7–12 мкм). В исходной полосе сталь характеризуется достаточной хладостойкостью: температура хрупкости T_{50} при испытании на динамический изгиб образцов типа 1 по ГОСТ 9454-78* расположена при минус 70 – минус 40 °С. Заметного разупрочнения при сварке стали не обнаруживается.

Таблица 1.24. Химический состав широкополосной стали серии "Ч" для гнутосварных профилей строительных металлоконструкций (по ТУ 14-105-509-87)

Сталь марки	Содержание, % по массе											
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	V	Ca
				не более								
Ч–33	0,14–0,22	0,12–0,3	0,4–0,65	0,03	0,03	0,3	0,3	0,3	0,02–0,07	0,01–0,04	–	0,001–0,03
Ч–37	0,16–0,22	0,25–0,45	0,5–0,75	0,03	0,03	0,3	0,3	0,3	0,02–0,07	0,01–0,04	0,02–0,07	0,001–0,03
Ч–40	0,16–0,22	0,25–0,45	0,7–0,9	0,03	0,03	0,3	0,3	0,3	0,02–0,07	0,01–0,04	0,02–0,07	0,001–0,03

Таблица 1.25. Механические свойства[1] широкополосной стали серии "Ч" (по ТУ 14-105-509-87)

Сталь марки	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Ударная вязкость KCU при -40°С, Дж/см^2	Испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° при диаметре оправки, равном
	не менее				
Ч–33	450	325	26	29	*a**
Ч–37	480	365	24	29	*a*
Ч–40	510	390	23	29	2*a*

[1] Определяются на продольных образцах.
a – толщина проката.

Более толстые листы, поставляемые металлургической промышленностью строительству в состоянии после контролируемой прокатки, изготовляются из низколегированной стали. Обычно это отсортировка штрипсов (листовых заготовок) для производства газопроводных труб большого диаметра и высокого давления, предназначенных для районов с низкой климатической температурой. Наряду с высокими показателями прочности $\sigma_т$ и $\sigma_в$ сталь марок 09Г2ФБ и 10Г2ФБ характеризуется весьма благоприятными свойствами хладостойкости. Причем помимо ударной вязкости на образцах с полукруглым надрезом при минус 60 °С гарантируется также ударная вязкость на остронадрезанных образцах при минус 15 °С и доля волокна в изломе крупноразмерных образцов ДВТТ при испытании падающим грузом.

Высокие вязкость и пластичность обусловлены не только мелкозернистой микроструктурой, но также пониженным содержанием неметаллических включений и изменением их формы специальной модифицирующей обработкой. Содержание серы в стали не превышает 0,006 – 0,01 %. Требования к химическому составу и механическим свойствам этих сталей приведены в табл.1.26 и 1.27. Сталь поставляется с обязательной гарантией углеродного эквивалента по формуле (1.1) – не более 0,43 % и после дефектоскопического ультразвукового контроля, гарантирующего отсутствие нарушений сплошности с требованиями для 2 – 3 классов по ГОСТ 22727-73.

Таблица 1.26. Химический состав низколегированных сталей, поставляемых в состоянии после контролируемой прокатки (по ТУ 14-1-4083-86)

Сталь марки	Содержание, % по массе						
	C	Mn	Si	V	Nb	S	P
						не более	
09Г2ФБ	0,08–0,13	1,5–1,7	0,15–0,35	0,05–0,09	0,02–0,05	0,01	0,02
10Г2ФБ	0,09–0,12	1,55–1,75	0,15–0,35	0,09–0,12	0,02–0,04	0,006	0,02

Примечание. Сталь обрабатывается продувкой аргоном, ферросплавами, содержащими кальций и редкоземельные элементы (церий и др.) в количестве 2 кг/т; содержание алюминия должно составлять не более 0,05%, титана – не более 0,035%; допускается содержание хрома, никеля и меди не более 0,3% каждого и азота не более 0,010%

Таблица 1.27. Механические свойства низколегированных сталей, поставляемых в состоянии после контролируемой прокатки (по ТУ 14-1-4083-86)

Сталь марки	Толщина проката, мм	Временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Ударная вязкость KCU при температуре, Дж/см^2		Доля вязкой составляющей в изломе образцов ДВТТ при -15°С
					-15°С	-60°С	
		не менее					
09Г2ФБ, 10Г2ФБ	4–9	558	450	22	–	59	–
	10–28	519	431	17	59	39	80

Заметим, что значительным показателям ударной вязкости при отрицательной температуре и низкой температуре хрупкости сталей после контролируемой прокатки часто способствует появление расслоений, наблюдаемых в вязких изломах продольных и поперечных образцов в температурном интервале, несколько выше температур визуального обнаружения хрупкого разрушения сколом. Установлено, что расслоения не связаны с какими-либо нарушениями сплошности в исходном

металле, но возникают (путем разрушения сколом) под влиянием больших растягивающих напряжений в направлении толщины в момент достижения максимума усилия непосредственно перед распространением магистральной трещины. Расслоения уменьшают жесткость напряженного состояния в очаге деформирования и смещают появление хрупкого разрушения сколом к более низким температурам. Благодаря высокой хладостойкости указанные стали вполне применимы для ответственных конструкций «северного исполнения».

1.7.2. Стали, термически упрочненные, с использованием специального нагрева. Установлено, что, подвергая строительную углеродистую и низколегированную сталь закалке, часто с последующим отпуском, можно существенно увеличить ее прочность без ухудшения свариваемости, так как химический состав и эквивалентное содержание углерода при этом не изменяются [7, 31]. Резкое измельчение микроструктуры при закалке и соответствующий выбор режима отпуска, устраняющего излишнюю прочность, позволяют получить высокое сопротивление вязкому и хрупкому разрушению.

Простейшая технология этого вида обработки включает в себя нагрев листов в камерных печах с выдвижным подом, их закалку в баке с водой после переноса грузоподъемным краном и отпуск листов в камерной печи того же типа. Недостатками этой технологии, наряду с низкой производительностью, являются невозможность регулировать скорость охлаждения и предотвращать коробление листов, опасность чрезмерного подстуживания из-за длительной транспортировки к закалочному баку, ухудшающего микроструктуру и конечные механические свойства.

Более совершенная технология предусматривает нагрев листов по заданному режиму в секционных проходных печах (обычно имеющих длину свыше 60 м) с транспортирующим подом из роликов.

Сразу на выходе из печи устанавливается охлаждающее устройство, которое бывает двух типов – закалочный пресс и ролико-закалочная машина. В обоих нагретый лист охлаждается сверху и снизу водяными струями. Интенсивность охлаждения регулируется давлением подаваемой воды и продолжительностью ее поступления.

В закалочном прессе, имеющем периодическое действие, охлаждаемый лист зажимается усилием до 10000 кН, которое передается через многочисленные прижимы с размерами в плане ~50825 мм. Несмотря на ускоренное перемещение листа от печи к прессу, продолжительность транспортировки и зажатия перед пуском воды не исключает опасности подстуживания, а само зажатие не исключает возможности коробления, которое с трудом поддается устранению при правке. Эти нежелательные явления тем значительнее, чем тоньше лист. Поэтому минимальная толщина проката, обрабатываемого на линиях с закалочными прессами, ограничена 12 – 16 мм.

В отличие от закалочных прессов, в которых листы во время охлаждения неподвижны, в роликозакалочных машинах охлаждаемые водой листы непрерывно перемещаются между двумя рядами роликов. В этом устройстве опасность подстуживания минимальна, так как охлаждение начинается сразу после попадания передней кромки листа в машину. Охлаждение более равномерно по поверхности и отсутствует «пятнистая закалка», которая в прессах обусловлена ограничением прижимами доступа охлаждающей воды к поверхности. В роликозакалочных машинах на отечественных металлургических заводах могут обрабатываться листы с минимальной толщиной 9 – 10 мм.

Отпуск закаленных листов производится в таких же проходных печах с роликовым подом, что и нагрев для закалки, причем температура отпуска в зависимости

от химического состава стали и уровня получаемых свойств выбирается в пределах 600 – 680 °С; суммарная продолжительность пребывания листов в печи обычно не превышает 1,5 – 3 ч.

Как видно из табл.1.28, в отечественной практике при термическом упрочнении с использованием специального нагрева для углеродистой и низколегированной сталей реализуются весьма умеренные уровни прочности, что, по-видимому, можно объяснить стремлением к получению достаточно хладостойкого металлопроката с малой склонностью к разупрочнению при сварке. Тем не менее снижением температуры отпуска для тех же сталей могут быть достигнуты значительно более высокие уровни прочности.

Таблица 1.28. Механические свойства листовой строительной стали после закалки и отпуска

Марка упрочняемой стали	Толщина проката, мм	Временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Ударная вязкость KCU при температуре, Дж/см^2		ГОСТ
					-40°С	-70°С	
		не менее					
ВСт3сп*	От 10 до 25 вкл.	430	290	16	29	–	14637-79
ВСт3пс	От 25 до 40 вкл.	430	290	16	–	–	
14Г2	От 10 до 32 вкл.	530	390	18	39	29	19282-88
10Г2С1(Д)	От 10 до 40 вкл.	530	390	19	49	29	19282-88
09Г2С(Д)	От 10 до 32 вкл.	490	365	19	49	29	19282-88
	От 32 до 60 вкл.	450	315	21	49	29	
15Г2СФ(Д)	От 10 до 32 вкл.	590	140	17	39	29	19282-88

* После термоупрочнения углеродистая сталь обозначается марками ВСтТсп, ВСтТпс, ВСтТкп в зависимости от степени раскисления.

Примечание. По требованию потребителя значение верхнего предела временного сопротивления разрыву не должно превышать 690 МПа для стали марок 14Г2, 10Г2С1(Д) и 780 МПа для стали марок 15Г2СФ(Д).

1.7.3. Сталь, термически упрочненная в потоке стана, с использованием тепла прокатного нагрева. Закалка о использованием тепла прокатного нагрева давно привлекает внимание как экономичный и перспективный способ повышения прочности и хладостойкости проката конструкционных сталей. Считают, что этот способ дешевле в 4 – 5 раз, чем термическая обработка с применением специального (печного) нагрева. Однако при его реализации возникает ряд трудностей, связанных с выбором, и размещением устройств для закалки, отпуском и правкой изделий без снижения скорости закалки и уменьшения производительности станов.

Проблема существенно упрощается при использовании приема «прерванной закалки». Кратковременное, но интенсивное охлаждение водой с высоким коэффициентом теплоотдачи обеспечивает быстрое снижение температуры поверхностных слоев профиля, в которых образуются продукты низкотемпературных превращений аустенита: мартенсит и нижний бейнит. Последующий нагрев закаленных участков теплом центральных слоев приводит к их «самоотпуску», необходимому для улучшения вязкости и пластичности. Достигаемое одновременно ускоренное охлаждение центральных слоев способствует получению в них благоприятной для прочности и хладостойкости мелкозернистой феррито-перлитной микроструктуры. Схематически этот процесс поясняют данные рис.1.11.

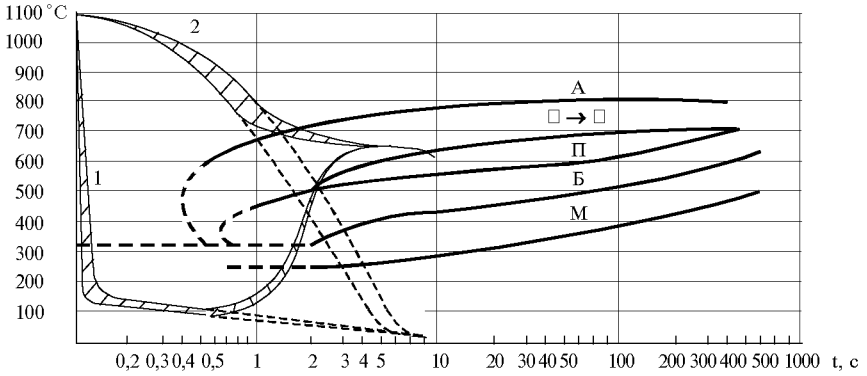


Рис.1.11. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита стали марки Ст3пс с наложенными кривыми прерванного охлаждения

1 – центральных слоев проката; *2* – поверхностных; штриховые линии – кривые непрерывного охлаждения (А – аустенит, Ф – феррит, П – перлит, Б – бейнит, М – мартенсит)

До недавнего времени прерванная закалка широко применялась только для повышения технологических и служебных свойств мелких прокатных профилей простой геометрической формы: стальной катанки и стержневой арматуры. В настоящее время на непрерывном среднесортном прокатном стане 450 Западносибирского металлургического комбината освоено производство с использованием прерванной закалки термоупрочненного фасонного проката угловых равнополочных профилей от № 7,5 до № 12,5 с толщиной полок 6 – 12 мм, а также близких по размерам профилей швеллеров и двутавров [32]. Термическому упрочнению подвергаются профили из углеродистой стали марок Ст3пс и Ст3сп, а также низколегированной стали марок 09Г2С, 14Г2. Предусмотрено получение металлопроката трех уровней прочности с пределом текучести не менее 390, 440 и 490 МПа. Его гарантируемые механические характеристики приведены в табл.1.29.

Таблица 1.29. Механические свойства фасонных профилей, термически упрочненных в потоке стана 450 Западно-Сибирского металлургического комбината (ТУ 14-15-146-85)

Уровень предела текучести[1]	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2 при температуре °С			Испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° при диаметре оправки, равном
				-70		+20 после механического старения	
				углеродистой стали	низколегированной стали		
	не менее						
390	490	390	20	29	–	29	2*a*
440	540	440	18	29	34,5	29	2*a*
490	590	490	16	29	34,5	29	2*a*

[1] Прокат с уровнем предела текучести 390 изготовляется из стали марок Ст3пс и Ст3сп; 440 и 490 –из стали марок Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гсп, Ст3Гпс, 14Г2 и 09Г2С.

Термически упрочненный с использованием прерванной закалки прокат имеет некоторые характерные особенности, которые здесь рассматриваются на примере равнополочных уголков из углеродистой стали марки Ст3пс. Одна из особенностей – неравномерность распределения микроструктуры и твердости по толщине. Травление поперечных шлифов выявляет закаленный слой у поверхности толщиной

1,5–3 мм с твердостью 190-220 HV (рис.1.12). Твердость центральных слоев (130 – 150 HV) близка к твердости стали в горячекатаном состоянии.

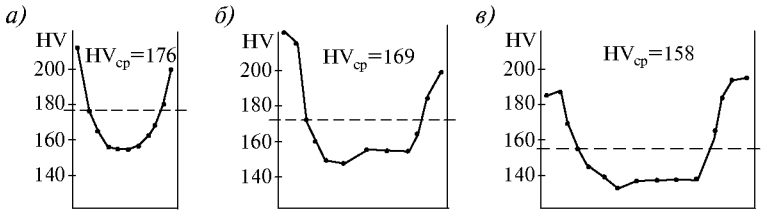


Рис.1.12. Типичное распределение твердости по толщине термоупрочненного проката разных угловых профилей из стали марки Ст3пс
а – 75×75×6 мм; *б* – 100×100×10 мм; *в* – 100×100×12 мм;
штриховая линия – средний уровень твердости

В связи с неоднородностью по толщине полное представление об «агрегатной» прочности материала может быть получено только при испытании образцов натурной толщины. При этом для стали характерна диаграмма растяжения с развитой площадкой текучести (рис.1.13). Причем чувствительные экстензометры выявляют небольшую пластическую деформацию еще до достижения верхнего предела текучести при напряжении около 0,8 его величины (см.рис.1.13).

Испытания на динамический изгиб выявляют весьма высокий уровень вязкости и хладостойкости термоупрочненного проката. Профили с более тонкой полкой имеют соответственно более высокую хладостойкость, о чем можно судить по следующим данным о положении температуры хрупкости T_{50} по критерию 50 % волокна в изломе (слева и справа от косой черты – данные для образцов с полукруглым надрезом типа 1 и для остронадрезанных образцов типа II по ГОСТ 9454-78* соответственно):

Толщина, мм	T_{50}, °С
6	-73 / -28
10 – 12	-35 / -10.

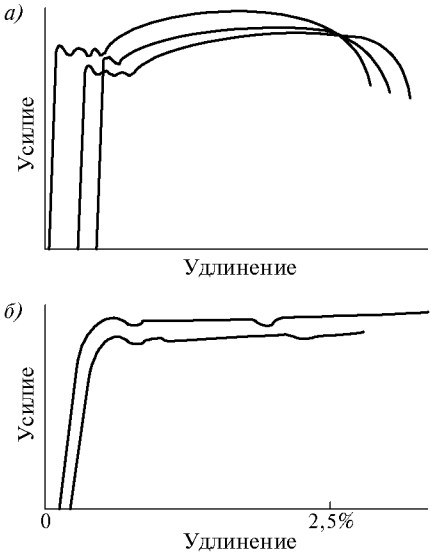


Рис.1.13. Характерные диаграммы растяжения плоских (полнотолщинных) образцов термоупрочненного фасонного проката из стали марки Ст3пс (*а*) и их начальные участки в увеличенном масштабе деформаций (*б*)

Под влиянием термических циклов ручной и автоматической электродуговой сварки в закаленных наружных слоях проката наблюдается локальное разупрочнение (рис.1.14). Оно вызвано одновременно протекающими процессами высокого отпуска и фазовой перекристаллизации. Повышение тепловложения сварки сопровождается расширением разупрочненных зон и некоторым уменьшением минимальной твердости. Все же протяженность разупрочненных участков невелика и находится в пределах 2 – 4 мм. Локальное разупрочнение не снижает агрегатной прочности сварных соединений, которая находится на уровне прочности основного металла. Это справедливо как для соединений с поперечными стыковыми швами, так и для нахлесточных соединений с продольными фланговыми швами. В

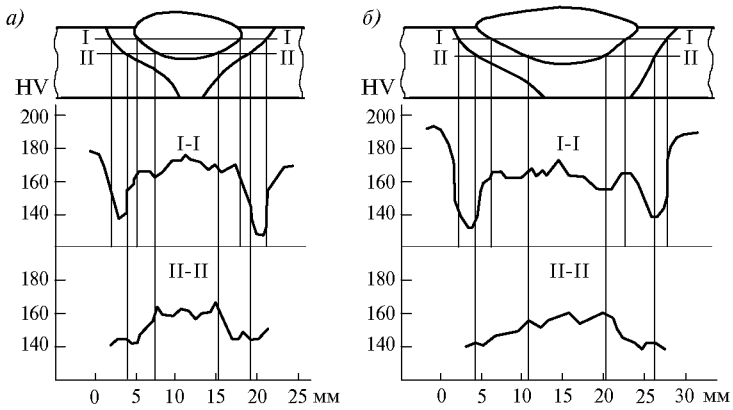


Рис.1.14. Распределение твердости в поперечном сечении полки термоупрочненного углового профиля толщиной 10 мм из стали марки Ст3пс с наплавленными валиками. Наплавка автоматической сваркой проволокой Св-08ГА под флюсом АН 348А при тепловложении 1,23 (*а*) и 2,05 МДж/м (*б*)

первом случае малая протяженность разупрочненных зон, по-видимому, обусловливает высокий уровень контактного упрочнения мягких прослоек [8, 9]. Во втором случае малое влияние разупрочненных зон объясняется тем, что они расположены на некотором удалении от границы сплавления, вследствие чего возможное уменьшение сопротивления срезу компенсируется увеличением потенциальной поверхности разрушения.

Приведенные в табл.1.30 данные статистической обработки результатов заводских приемосдаточных испытаний партии термоупрочненного проката угловых профилей №№ 7, 5; 9 и 10 стали марки Ст3пс (95 тыс.т) свидетельствуют о высоком уровне прочности и вязкости и о его стабильности.

Таблица 1.30. Данные приемо-сдаточных испытаний углового проката стали Ст3пс, упрочненного в потоке стана 450*

Профиль №	Число испытаний	Предел текучести $\sigma_т$, МПа		Временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа		Ударная вязкость, KCU, Дж/см^2 при -70°С		Ударная вязкость при +20°С после механического старения, Дж/см^2	
		$\overline{X}$	S	$\overline{X}$	S	$\overline{X}$	S	$\overline{X}$	S
7,5	278	484	53	573	50	172	34	185	32
9	142	452	35	544	32	175	41	175	32
10	28	–	–	–	–	156	32	174	22
По марке	506	473	49	563	45	173	38	182	32

* $\overline{X}$ – среднее значение; S – среднеквадратическое отклонение.

Была определена циклическая прочность сварных соединений при пульсирующем растяжении на базе $2 \cdot 10^6$ циклов при коэффициентах асимметрии 0,2 и 0,6. Установлено, что в диапазоне числа циклов $10^5 - 2 \cdot 10^6$ ограниченные пределы выносливости сварных соединений профилей из низколегированной стали марки 09Г2С и из термоупрочненной углеродистой марки Ст3пс практически одинаковы.

Термоупрочненный фасонный прокат сортамента стана 450 Западносибирского металлургического комбината из углеродистой стали марок Ст3пс и Ст3сп уровня прочности 390 рекомендован для применения в сварных строительных металлоконструкциях, в том числе ответственного назначения, эксплуатируемых при динамических и переменных нагрузках и при низких климатических температурах

(«северное исполнение»), вместо аналогичного проката горячекатаных низколегированных сталей марок 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 14Г2 и 15ХСНД без пересчета сечений. Такая замена уменьшает расход дефицитных легирующих ферросплавов и дает снижение стоимости конструкции.

Предпринята обнадеживающая попытка получить с использованием технологии прерванной закалки и «самоотпуска» термоупрочненный листовой прокат углеродистой стали в потоке стана 3600 металлургического комбината «Азовсталь». Ускоренному охлаждению водой в устройстве с противотоком и кратковременному дополнительному отпуску (при 600 – 620 °С) в проходной печи подвергали листы толщиной 12 – 30 мм. Достигнутый комплекс механических свойств в целом соответствовал уровню показателей для низколегированной стали марки 09Г2С-6 по ГОСТ 19282-73 (табл.1.31). Однако в связи с частыми выпадами по прочностным характеристикам и ударной вязкости при отрицательных температурах, обусловленных, по-видимому, недостаточной интенсивностью охлаждения при закалке, эта технология нуждается в доработке.

Таблица 1.31. Типичные механические свойства листовой углеродистой стали марки Ст3сп, термически упрочненной в потоке стана 3600 (поперечные образцы)

Толщина листа, мм	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Относительное сужение ψ, %	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2, при температуре, °С*		Температура хрупкости T_{50}, °С
					-40	-70	
12	327	472	32	51	56/57	22/27	-40
16	340	508	27	52	48/52	48/49	+10
16	311	473	30	49	46/47	23/28	-20
20	331	512	24	49	43/48	27/31	-10
30	347	545	23	55	100/124	81/87	-10
По ТУ 14-1-3521-83	325	470	16	–	≥49	≥29	–

* слева от косой черты – минимальные, справа – средние значения трех испытаний.

Направленное изменение микроструктуры, основанное на различном сочетании горячей пластической деформации и регулируемого охлаждения (термомеханической обработки), позволяет существенно расширить рамки получаемой прочности, пластичности и хладостойкости конструкционной стали. Так, японская металлургическая фирма «Сумитомо» разработала и реализовала на практике режимы, получившие обозначение DAC и HST (рис.1.15).

По первому из них сталь подвергается прокатке при пониженных температурах в аустенитной области до начала полиморфного превращения (выше точки Ar_3), после чего следует ускоренное регулируемое охлаждение водой. По второму режиму - контролируемая прокатка сопровождается охлаждением до температуры ниже завершения полиморфного превращения (ниже точки Ar_1). Затем производится нагрев лис-

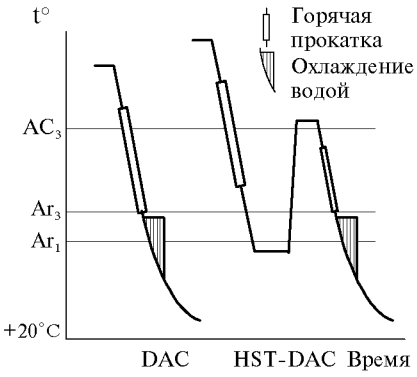


Рис.1.15. Два режима термомеханического упрочнения низколегированной стали японской фирмы «Сумитомо»

тов до температуры несколько выше критической точки Ac_1, после чего осуществляется прокатка в нижнем интервале аустенитной области и заключительное ускоренное охлаждение водой. Обработанная, в частности, такими способами 0,6-Ni-сталь (0,05 % C, 0,12 % Si, 1,3 % Mn, 0,015 % P, 0,001 % S, 0,63 % Ni и 0,017 % Nb, углеродный эквивалент 0,3 %) в листах толщиной 20 – 50 мм имеет предел текучести 400 МПа, временное сопротивление разрыву 580 МПа, относительное удлинение 34 %, ударную вязкость на остронадрезанных образцах при минус 80 °C 200 Дж/см^2 и температуру хрупкости T_{50} ниже минус 100 °C. Сталь рекомендуется для металлоконструкции глубоководных морских оснований, сооружаемых в ледовых (арктических) условиях.

Отечественными металлургическими заводами металлопрокат в состоянии после подобной термомеханической обработки пока не поставляется.

1.8. Стали специального назначения

1.8.1. Сталь с гарантированными механическими свойствами в направлении толщины проката. Как уже указывалось в п.1.1, проблема стали с гарантированными свойствами в направлении толщины проката (z – направление) тесно связана с сопротивлением вязкому разрушению. Оно выражается характеристиками предельной пластичности и вязкости, а также их анизотропией в прокате. При этом определяющая роль принадлежит загрязненности стали неметаллическими включениями. При пластическом деформировании включения инициируют образование в металле внутренних пустот, рост и слияние которых составляют сущность процесса вязкого разрушения. Наибольшее отрицательное влияние оказывают включения вытянутой формы и групповые включения, расположенные в строчки. В горячекатаных изделиях из хорошо раскисленной строительной стали они представлены в основном вытянутыми включениями сульфида марганца (MnS) и строчечными включениями глинозема (Al_2O_3), образующимися при раскислении и затвердевании стали.

Как отмечалось, анизотропия пластичности сильно ограничивает пригодность стали к любым операциям холодной формовки с большой вытяжкой (гибке, штамповке, глубокой вытяжке, завальцовке). Но особенно отрицательно она проявляется в образовании ламелярных (пластинчатых или слоистых) трещин при сварке. Они возникают в основном металле вблизи сварных швов под воздействием напряжений и термодеформационных циклов сварки. Наблюдение трещин на шлифах в поперечном сечении соединений выявляет их специфическое ступенчатое строение (см.рис.1.3). Преобладают прямые участки, параллельные плоскости прокатки-террасы, которые чередуются с более короткими участками, перпендикулярными этой плоскости – сбросами или разрывами. При наблюдении в оптический микроскоп обнаруживается, что террасы совпадают с расположением вытянутых и строчечных неметаллических включений. Поверхность разрушения, вызванного ламелярными трещинами, визуально напоминает излом дерева, расщепленного вдоль волокна.

Установлено, что ламелярные трещины появляются в процессе сварки или непосредственно после ее окончания, когда температура металла опускается ниже 200 °C. Наблюдались также случаи образования ламелярных трещин при термообработке сварных соединений для снятия напряжений. Особенно часто отмечаются случаи появления ламелярных трещин при сварке металлопроката низколегированной марганцовистой стали значительной толщины – 25 мм и более. Однако здесь нет строгой закономерности, так как известны случаи появления ламелярных трещин при сварке мягкой углеродистой стали и при сварке проката толщиной 3 – 5 мм. Ламелярные трещины наблюдались при сварке стали, поставляемой в

горячекатаном, нормализованном и термоулучшенном состояниях. Все же полагают, что вероятность их появления тем выше, чем прочнее сталь, что, по-видимому, обусловлено пониженной пластичностью высокопрочной стали.

Режим сварки мало влияет на возникновение указанных дефектов, однако частота их образования возрастает с увеличением числа слоев в шве.

Ламелярные трещины чаще обнаруживаются в соединениях с угловыми швами, реже – в соединениях с прямыми стыковыми швами. Образованию указанных дефектов способствует большая жесткость свариваемого элемента, а также высокая прочность металла шва. Имеются прямые указания на то, что повышенное содержание водорода в металле сварного соединения способствует образованию ламелярных трещин. В связи с этим рекомендуется для предупреждения трещин производить сварку «мягкими» электродами, делающую металл шва менее прочным и более склонным к пластическому деформированию, чем основной металл. Рекомендуется также прибегать к предварительному подогреву, к предварительной наплавке (облицовке) кромок, а иногда – к специальному изменению конструктивной формы соединений (см.далее).

Особенно опасно образование слоистого разрушения в листовых элементах ответственных металлоконструкций, испытывающих большие нагрузки в направлении толщины: сварные узлы примыкания ригелей к колоннам в рамных конструкциях, сварные соединения трубчатых стержней стационарных морских платформ, фланцы монтажных соединений растянутых поясов ферм и др.

Предложено много способов испытания стали на склонность к образованию ламелярных трещин. Одни из них предусматривают применение сварки с характерным воздействием на материал ее термодеформационных циклов, другие являются чисто механическими испытаниями. К числу последних принадлежит простой, надежный и наиболее распространенный способ испытания на одноосное растяжение образцов, вырезанных из металлопроката в направлении толщины. Критерием стойкости против образования ламелярных трещин служит относительное сужение ψ_z минимальная и средняя величина которого нормируется.

Международный стандарт ISO 7778-1983 (E) предусматривает определение ψ_z испытанием на растяжение цилиндрических образцов диаметром 6 и 10 мм в зависимости от толщины проката:

Толщина листа, мм	Диаметр образца d, мм
$e < 25$	$d_0 = 6$
$25 < e < 50$	$d_0 = 10$
$e < 50$	$d_0 = 10$

с отношением рабочей длины к диаметру не менее или более 1,5 (рис.1.16). Из каждого проверяемого листа вырезается заготовка для шести образцов, причем первичным испытаниям подвергаются три образца; три других предназначены для повторных испытаний, если обнаруживаются выпады.

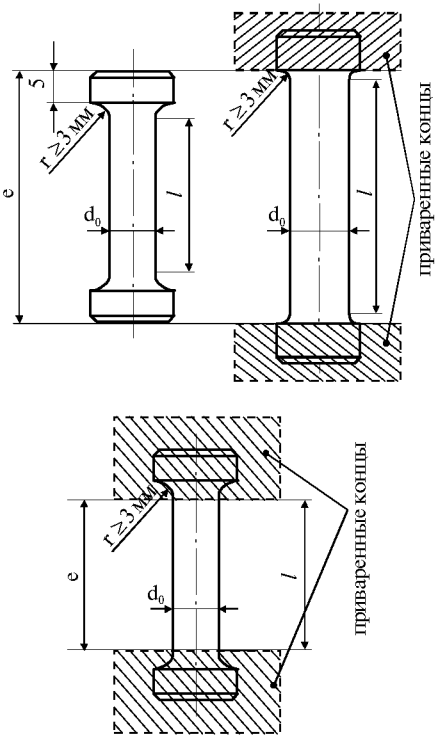


Рис.1.16. Варианты вырезки образцов для испытания на растяжение из листового проката по стандарту JSO 7778-1983 (E)

При достаточной толщине листов образец целиком изготовляется из одного материала. При испытании проката ограниченной толщины получение заготовок необходимых размеров обеспечивается приваркой (см.рис.1.16); образцы из заготовок вырезают таким образом, чтобы захватные части были выполнены из приваренного материала, тогда как испытываемый материал попадает в рабочую часть.

В зависимости от рассчитываемого (по специальной методике) фактора риска для сварного соединения выбирается один из трех следующих уровней гарантируемых (по результатам трех испытаний) средних и минимальных значений (классов):

Класс	Среднее значение ψ_z, %	Минимальное значение ψ_z, %
	не менее	
15	15	10
25	25	15
35	35	25

Предусматривается также, что одновременно с гарантией механических свойств в направлении толщины при поставке листового металлопроката должен гарантироваться определенный уровень отсутствия нарушений сплошности (расслоений), выявляемых ультразвуковым контролем.

Фактор риска появления в сварном соединении слоистого разрушения определяют по эмпирическим формулам с учетом размера сечения сварного шва, формы сварного соединения, толщины листа, жесткости соединения, предварительного подогрева, порядка наложения слоев шва [33]. В нашей стране такие стандарты и нормы пока отсутствуют.

В ЦНИИпроектстальконструкции обследовали значения ψ_z для партии листов стали марок 10Г2С1, 10ХСНД и 14Г2АФ рядовой поставки по 41 – 93 листов толщиной 25 – 60 мм в каждой. Результаты в комулятивных кривых распределения ψ_z приведены в левой части рис.1.17. Они показывают, что в листовом прокате, изготовленном по обычной технологии, заданные механические свойства в направлении толщины ($\psi_z \geq 15...30$ %) с обычно принимаемой вероятностью 95 % не могут быть обеспечены.

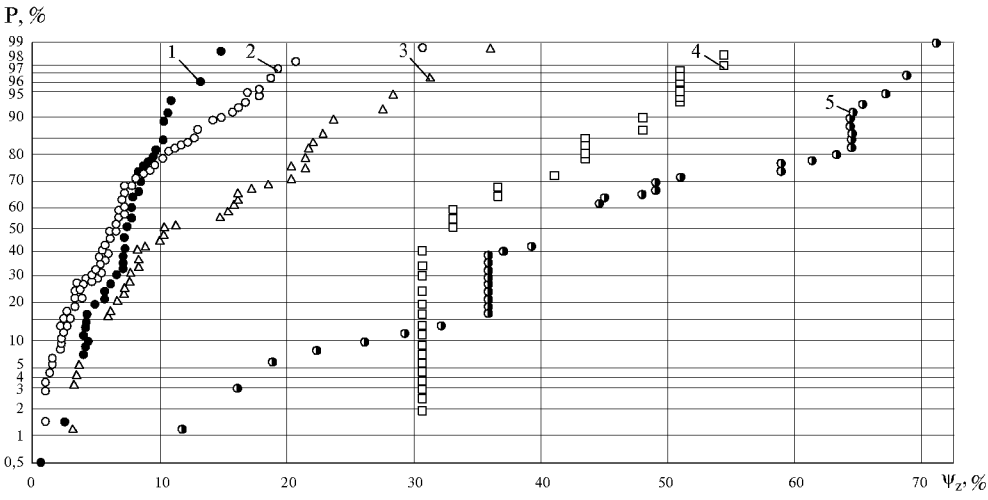


Рис.1.17. Комулятивные кривые распределения значений ψ_z для листов низколегированных сталей разных марок

1 – 10ХСНД; *2* –14Г2АФ; *3* – 10Г2С1; *4* – 12ХГДАФ модифицированная; *5* – 14Г2АФ модифицированная

Зарубежными и отечественными исследованиями установлено, что для уменьшения анизотропии вязкости и пластичности, обусловленной вытянутыми и строчечными неметаллическими включениями, содержание серы в стали следует уменьшать до весьма низкого уровня. Однако, если в листах толщиной 20 – 60 мм оказывается достаточным снижение содержания серы до 0,008 – 0,010 % (рис.1.18), то для листов и полос меньшей толщины (8 – 16 мм), вследствие большей вытяжки и пониженной температуры прокатки требуемые высокие значения ψ_z удается получить только при снижении содержания серы ниже 0,005 %. Поэтому целесообразно прибегать также к направленному воздействию на химический состав, форму, размеры и распределение неметаллических включений, получившему название «модифицирование» [19].

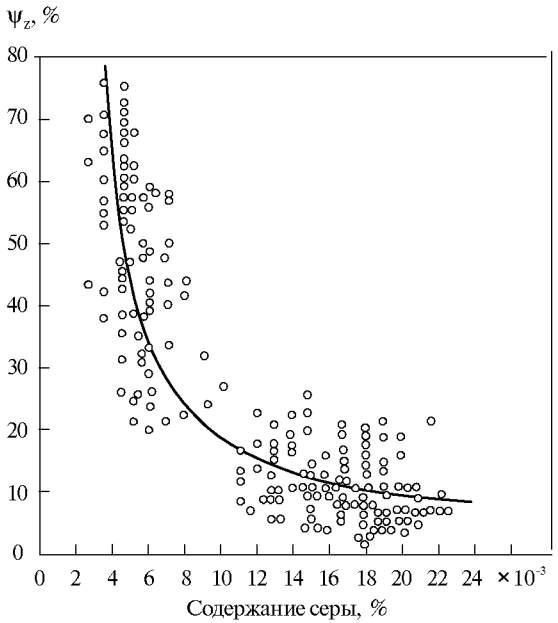


Рис.1.18. Влияние содержания серы на снижение ψ_z толстолистовой низколегированной стали

Модифицирующая обработка, приводящая к получению компактных неметаллических включений (глобулярных или имеющих огранку), равномерно распределенных в матрице и слабо деформируемых при прокатке, может осуществляться в зависимости от принятой металлургической технологии введением в жидкую сталь (перед разливкой или во время ее) небольших добавок некоторых металлов (циркония, титана, РЗЭ или кальция) или металлоидов (теллура или селена).

Наиболее благоприятные результаты получают при модифицировании кальцием и его соединениями или кальцием в сочетании с РЗЭ. Именно такой подход использован при получении листовой стали марки 14Г2АФ для фланцев растянутых поясов стропильных ферм, поставляемой Череповецким металлургическим комбинатом по Ту 14-105-465-89 с гарантированным $\psi_z \geq 20$ % и при получении листовой стали марки 12ХГДАФ для металлоконструкций морских стационарных платформ, поставляемой металлургическим комбинатом «Азовсталь» по ТУ 14-1-4329-87 с гарантированным $\psi_z \geq 30$ %. Соответствующие комулятивные кривые ψ_z приведены в правой части рис.1.17.

Другим радикальным способом повышения вязкости и пластичности, особенно в направлении толщины (но вместе с тем более дорогим и дефицитным), является электрошлаковый переплав. Он, в частности, используется при получении листовой стали марки 16Г2АФ-Ш для сварных крупногабаритных сосудов давления, в том числе кожухов доменных печей большого объема. Для стали этой марки в листах толщиной до 70 мм гарантируется ψ_z не менее 45 % [34].

В табл.1.32 приведены механические свойства листовой стали марок 09Г2СД и 12ХГДАФ для металлоконструкций морских стационарных платформ, а в табл.1.33 – меры, предусматривающие отсутствие в ней нарушений сплошности.

Таблица 1.32. Механические свойства толстолистовой стали для элементов узловых конструкций морских стационарных платформ[1] (по ТУ 14-1-4329-87)

Сталь марки	Толщина листов, мм	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Относительное сужение в направлении толщины, ψ_Z, %	Ударная вязкость KCV, Дж/см^2 при температуре °С		Ударная вязкость KCU, Дж/см^2 при температуре °С		Испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° при диаметре оправки, равном
						-10	-20	-50	-70	
		не менее								
09Г2СД	От 10 до 20	470	325	21	–	–	–	30	–	2*a*
	Св.20 до 32	460	305	21	30*	80*	–	30	–	2*a*
	Св.32 до 60	450	285	21	30	80	–	30	–	2*a*
	Св.60 до 82	440	275	21	30	80	–	30	–	2*a*
	Св.80 до 100	430	265	21	30	80	–	30	–	2*a*
12ХГДАФ	От 10 до 30	500	350	21	30*	–	80*	–	60	2*a*
	Св.30 до 60	480	330	21	30	–	80	–	60	2*a*
	Св.60 до 100	460	310	21	30	–	80	–	60	2*a*

[1] Ударную вязкость KCV определяют на продольных образцах.
* При толщине листа 25 мм и более.

Таблица 1.33. Нормы сплошности при УЗК толстолистовой стали для элементов узловых конструкций морских стационарных платформ (по ТУ 14-1-4329-87)

Наименование нарушения сплошности	Площадь листа
Условная площадь минимального учитываемого нарушения сплошности S_1, см^2	0,5
Условная площадь минимального допускаемого нарушения сплошности S_2, см^2	1
Относительная условная площадь всех учитываемых при контроле нарушений сплошности на всей площади листа S, %	0,15

1.8.2. Атмосферостойкие стали. Стальные строительные конструкции защищают от коррозии лакокрасочными покрытиями, которые приходится периодически возобновлять. На грунтовку и окраску расходуется значительная доля стоимости и трудозатрат по изготовлению, монтажу и эксплуатации конструкций. С увеличением объема капитального строительства эти расходы непрерывно возрастают. Поэтому важное народнохозяйственное значение имеют материалы, не требующие защитных покрытий, или те из них, на которые срок службы покрытий существенно увеличивается. Таким материалом являются атмосферостойкие стали [35]; они не представляют собой нержавеющий материал, такой, например, как высоколегированная хромоникелевая сталь типа Х18Н10. Легирующие добавки в атмосферостойкой стали недостаточны для полного пассивирования ее поверхности.

В первый период взаимодействия с атмосферой поведение атмосферостойкой стали с незащищенной поверхностью мало чем отличается от поведения углеродистых строительных сталей. Отличие состоит лишь в том, что после одинакового времени действия коррозии атмосферостойкая сталь, благодаря небольшим добавкам некоторых легирующих элементов, обнаруживает значительно меньшую потерю массы, причем эта разница с течением времени увеличивается, так как коррозия атмосферостойкой стали практически прекращается.

Влага на поверхности металла является непременным условием протекания коррозии. Контактирующая с металлом влага почти всегда содержит растворенные газы, соли, кислоты, что делает ее электролитом, необходимым для развития электрохимической коррозии. На скорость этих процессов влияет величина оммического сопротивления пленки влаги. При малом содержании в ней солей или газов (например в сельской атмосфере) оммическое сопротивление велико и скорость коррозии низкая. В загрязненной промышленной атмосфере, а также в морской атмосфере скорость коррозии заметно выше. Еще значительнее она в морской воде из-за высокой концентрации растворенных солей.

В промышленной атмосфере содержится сернистый газ (SO_2), который окисляется кислородом в электролите до серной кислоты и, как полагают, оказывает на атмосферную коррозию сильное ускоряющее (каталитическое) действие.

Образующийся на поверхности стали гидрат закиси железа $Fe(OH)_2$ с течением времени окисляется в гидрат окиси железа FeOOH, являющийся (наряду с магнитным оксидом железа Fe_3O_4) основным компонентом ржавчины. Физико-механические свойства слоя продуктов коррозии: плотность, твердость, растворимость, прочность сцепления с металлической поверхностью при прочих равных условиях зависят от ряда факторов: степени и режима влажности, химического состава стали и коррозионной среды (атмосферы), температуры металла, длительности коррозии, солнечной радиации и др.

С течением времени толщина слоя ржавчины увеличивается; в нем заполняются поры и трещины, что затрудняет транспортирование влаги и кислорода к границе раздела с металлом и миграцию от нее образующихся ионов железа. Все это замедляет коррозию, вследствие чего потеря массы стали от продолжительности коррозии выражается плавной затухающей кривой (рис.1.19). Вместе с тем на поверхности обычной углеродистой стали в условиях достаточной смачиваемости коррозия никогда не прекращается, так как образующийся мягкий пористый слой ржавчины слабо блокирует массоперенос.

При наличии в стали легирующих элементов: меди, никеля, хрома, молибдена, титана, кремния и др. они также участвуют в реакциях электрохимической коррозии, причем образующиеся соединения этих элементов, попадая в слой ржавчины, способны оказывать значительное влияние на его физико-механические свойства.

Именно на этой способности некоторых легирующих элементов, присутствуя в комплексе, изменять свойства ржавчины, основано применение так называемой атмосферостойкой стали, позволяющей (при соблюдении определенных условий) исключить необходимость нанесения на конструкции защитных покрытий.

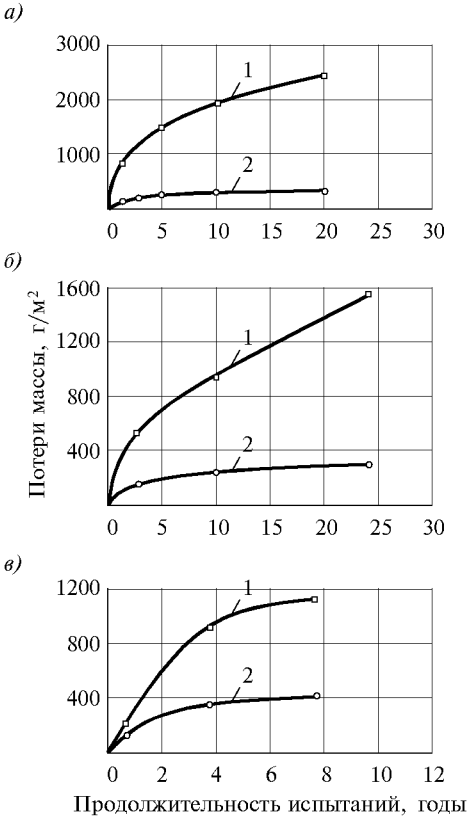


Рис.1.19. Коррозия углеродистой и атмосферостойкой строительной стали в атмосфере разной агрессивности

а – промышленной; *б* – сельской; *в* – морской; *1* – углеродистая сталь; *2* – атмосферостойкая сталь

Образующийся в течение 1,5 – 3 лет на незащищенной поверхности такой стали естественный слой продуктов коррозии, содержащих соединения основных сульфатов, гидроокиси, карбонатов, фосфатов и силикатов хрома, никеля, меди, обладает повышенными плотностью, прочностью и лучшей сцепляемостью с поверхностью металла, чем на обычной стали. Поэтому к концу указанного периода дальнейшая коррозия резко замедляется или прекращается совсем.

Многочисленные исследования, выполненные в нашей стране и за рубежом, показали, что из числа легирующих элементов медь и фосфор наиболее эффективно повышают сопротивление атмосферной коррозии. Их действие проявляется при небольших количествах и поэтому при увеличении содержания меди свыше 0,15 – 0,2 % и фосфора свыше 0,3 % коррозионная стойкость стали повышается лишь незначительно.

Хром при введении его в сталь до 1 % мало влияет на сопротивление атмосферной коррозии и даже несколько ее снижает. Однако в присутствии меди (0,06 % и более) хром существенно повышает коррозионную стойкость стали. Никель значительно увеличивает сопротивление стали атмосферной коррозии, причем наиболее существенно также в присутствии меди.

При одновременном присутствии в стали меди, фосфора, хрома и никеля совместное действие этих элементов на повышение коррозионной стойкости сильнее действия каждого из элементов в отдельности. Углерод, кремний, марганец и ванадий не оказывают большого влияния на коррозионную стойкость стали. В промышленной атмосфере марганец при содержании до 1,5 – 1,8 % снижает на 20 - 30 % коррозионную стойкость, в морской атмосфере примерно на столько же ее повышает. Кремний при введении в углеродистую и низколегированную марганцовистую сталь в количестве до 1,2 % не изменяет ее коррозионного поведения.

Влияние легирующих элементов на сопротивление коррозии в морской воде и морской атмосфере качественно такое же, как и воздействие на сопротивление коррозии в промышленной атмосфере (см.рис.1.19). Разница лишь в том, что коррозия протекает в несколько раз быстрее, чем в промышленной атмосфере и защитного слоя продуктов коррозии не образуется.

Атмосферостойкие низколегированные стали выпускаются металлургическими фирмами многих стран. Для большинства марок химический состав повторяет (с небольшими вариациями) ставшую классической композицию американской стали Кор Тен А: меди ~0,5, хрома ~1, кремния ~0,5, никеля ~0,5 и фосфора ~0,1 %. При этом для компенсации ухудшения вязкости и свариваемости, обусловленного высоким содержанием фосфора, ограничивают содержание углерода уровнем ≤ 0,12 % и максимальную толщину проката не более 9 – 12 мм. В этом диапазоне толщин прочностные свойства стали и ее пластичность после горячей прокатки удовлетворяют требованиям к обычной низколегированной стали: $\sigma_T \geq 345$ Н/мм^2; $\sigma_B \geq 490$ Н/мм^2 и $\delta_5 \geq 22$ %.

Для проката более значительных толщин предлагаются другие варианты атмосферостойкой стали, аналогичные американской стали Кор Тен Б, в которой при обычном содержании фосфора (≤ 0,04 %) находится марганца ~1, меди ~0,3, хрома ~0,6 и ванадия 0,02 – 0,1 %. Механические свойства сталей Кор Тен А и Кор Тен Б близки.

В нашей стране для применения в неокрашиваемых конструкциях рекомендована атмосферостойкая сталь марок 10ХНДП (10ХДП) типа Кор Тен А, поставляемая в листовом и фасонном прокате толщиной до 9 – 12 мм, 08ХГСДП, поставляемая в виде фасонных профилей и 12ХГДАФ типа Кор Тен Б, поставляемая в листовом прокате толщиной 12 – 50 мм. Последняя сталь, благодаря использованию карбонитридного упрочнения и термической обработки-нормализации, обладает высокой хладостойкостью, необходимой для конструкций «северного исполнения».

Химический состав и механические свойства отечественных атмосферостойких сталей приведены в табл.1.34 и 1.35. Сталь марок 10ХНДП (10ХДП) и 08ХГСДП применяется для конструкций, эксплуатируемых при статических нагрузках в обычном диапазоне климатических температур. Сталь марки 12ХГДАФ благодаря повышенному сопротивлению хрупкому разрушению может быть также использована для конструкций, подвергающихся динамическому и переменному нагружениям а также эксплуатируемых при расчетной температуре ниже минус 40 °С («северное исполнение»).

Таблица 1.34. Химический состав отечественных атмосферостойких сталей

Сталь марки	Содержание, % по массе										ГОСТ или ТУ
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	V	N	S	P	
10ХНДП	≤0,12	0,3–0,6	0,17–0,37	0,5–0,8	0,3–0,6	0,3–0,5	–	–	≤ 0,035	0,07–0,12	ТУ 14-1-1217-75 ГОСТ 19282-73*
10ХДП	≤0,12	0,3–0,6	0,17–0,37	0,5–0,8	0,3	0,2–0,4	–	–	≤ 0,035	0,07–0,12	ТУ 14-1-1217-75
08ХГСДП*	≤0,1	0,8–1,2	0,5–0,8	0,5–0,8	–	0,2–0,4	–	–	≤ 0,035	0,05–0,08	ТУ 14-1-3346-82
12ХГДАФ*	0,09–0,15	0,6–1	0,17–0,37	0,8–1,1	–	0,25–0,5	0,07–0,12	0,015–0,025	≤ 0,04	0,04	ТУ 14-1-2881-80

* В сталь вводится технологическая добавка алюминия

Сварка атмосферостойких сталей не вызывает затруднений и может производиться теми же способами, что и других низколегированных сталей. Однако, если к стойкости сварных швов против атмосферной коррозии предъявляются те же требования, что и к основному металлу, то применяемые сварочные материалы (электроды, присадочная проволока, флюс) и режим сварки должны обеспечить

получение химического состава металла шва, близкого к составу основного металла. Согласно данным ЦНИИпроектстальконструкции хорошие результаты дает ручная электродуговая сварка электродами с покрытием марки ОЗС-18, автоматическая сварка проволокой марки Св-08Х1ДЮ под флюсом АН-348А и сварка в атмосфере углекислого газа проволокой марки Св-08ХГ2СДЮ. Металл болтов и заклепок в неокрашиваемых монтажных соединениях должен быть близок по химическому составу к основному металлу.

Таблица 1.35. Механические свойства отечественных атмосферостойких сталей

Марка стали	Толщина проката, мм	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2 при температуре °С			Испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° при диаметре оправки, равном
					-40	-70	+20 после механического старения	
		не менее						
10ХНДП	До 5	470	343	21	–			2*a*
	5–9	470	343	21	34	–	–	2*a*
10ХДП	До 5	441	323	21	–	–	–	2*a*
	5–9	441	304	21	34	–	–	2*a*
08ХГСДП	До 10,5	470	323	21	–	29*	29	2*a*
12ХГДАФ	8–11	490	345	20	–	29	29	2*a*
	12–30	490	345	20	–	29	29	2*a*
	31–100	470	325	20	–	29	29	2*a*

* При минус 60 °С.

Экономический эффект от применения атмосферостойкой стали в сравнении с другими низколегированными сталями той же прочности создается вследствие исключения расходов на защиту от коррозии металлических конструкций и связанных с этим мероприятий. Последние включают в себя первоначальную подготовку поверхности, грунтовку и окраску при возведении конструкции, повторную окраску через 10 лет эксплуатации и последующее возобновление лакокрасочного слоя, периодически повторяемое через каждые три года.

Следует иметь в виду, что защитный слой на поверхности атмосферостойкой стали формируется в течение 1,5 – 3 лет только в условиях эксплуатации на открытом воздухе в слабоагрессивной атмосфере, при периодическом естественном увлажнении и высыхании. Потеря толщины металла при этом обычно не превышает 50 мкм. Защитный слой не образуется при эксплуатации в закрытых помещениях с постоянной повышенной влажностью, при постоянном контакте с водой, в средне- и сильно агрессивной атмосфере (химического производства и цветной металлургии), в морской атмосфере, во влажном тропическом климате. Однако и в этих условиях применение атмосферостойких сталей часто оказывается целесообразным, но в окрашенном состоянии, так как благодаря лучшей сцепляемости с поверхностью металла срок службы искусственных защитных покрытий на атмосферостойкой стали в 1,5 – 2 раза более продолжительный, чем на обычной стали.

1.8.3. Хладостойкие стали для конструкций, эксплуатирующихся при низкой (криогенной) температуре. Необходимость применения металлических материалов, работоспособных при низкой (криогенной) температуре, продиктована развитием химической и нефтехимической промышленности, а также освоением новых газо-

вых месторождений, что требует осуществлять в широких масштабах транспортировку, переработку и хранение различных газов. Известно, что хранить и транспортировать газы экономически выгодно лишь в сжиженном состоянии, так как, например, регазификация 1 м^3 сжиженного природного газа превращает его в 600 м^3 газообразного продукта. Металлоемкость хранилищ с переходом на сжиженный газ уменьшается в 1,5 – 2 раза.

Для хранения сжиженных газов используются изотермические резервуары, имеющие наружную и внутреннюю металлические оболочки с эффективным утеплителем между ними. Хранение осуществляется при давлении, несколько превышающем атмосферное, и температуре, близкой к точке кипения газа при атмосферном давлении. Эта температура, при которой эксплуатируется внутренняя оболочка резервуара, составляет для этилена минус 104 °С, для метана минус 162 °С, для природного газа минус 165 °С, для кислорода минус 183 °С и для азота минус 196 °С. Вместимость применяемых в нашей стране изотермических резервуаров изменяется в пределах 300 – 60000 м^3.

Материалы, используемые в конструкциях при указанных температурах, помимо высокой вязкости, необходимой для предотвращения хрупкого разрушения, должны обладать хорошей свариваемостью, достаточной прочностью, обрабатываемостью и не менять своих свойств в процессе изготовления конструкции и эксплуатации, а также быть экономически оправданными. Для этих целей возможно использование аустенитных нержавеющих сталей, алюминиевых, медных и никелевых сплавов. Однако наиболее эффективны стали с содержанием 6 и 9 % никеля [3].

При легировании стали никелем с повышением его содержания до 10 – 13 % температура хрупкости монотонно снижается со средней интенсивностью 20 – 30 °С на 1 % Ni. Это влияние никеля, отличное от действия большинства других легирующих элементов, объясняли рядом причин: измельчением карбидов и более равномерным их распределением, уменьшением энергии взаимодействия атомов примесей внедрения (углерода и азота) с дислокациями и уменьшением их концентрации на дислокациях. Однако преобладает мнение, что основной причиной положительного влияния никеля на хладостойкость является сильное измельчение микроструктуры. Причем это измельчение обусловлено не только малыми размерами зерен, субзерен и других фрагментов микроструктуры, но, главным образом, наличием в ней устойчивых микровыделений остаточного аустенита.

Оптимальные микроструктура и хладостойкость никелевых сталей достигаются после термической обработки, включающей закалку и последующий отпуск или нормализацию с последующим отпуском. Цель – получить мелкозернистую микроструктуру с максимальным содержанием остаточного аустенита. Вместе с тем этот аустенит должен быть устойчивым и не склонным к распаду на мартенсит при охлаждении до низких температур, а также дальнейшей эксплуатации. В этом отношении хорошие результаты дает либо термическое улучшение с нагревом при закалке до 800 °С, либо двойная нормализация с последующим отпуском. Температура нагрева первой нормализации около 900 °С (она призвана устранить появление «камневидного» излома), второй – 780 – 800 °С . Температура отпуска выбирается в диапазоне 570 – 620 °С. Предлагаются и другие режимы термообработки, более трудоемкие, но ведущие к получению повышенных результатов. Так, в США для достижения наиболее высокой хладостойкости стали с 5 – 9 % Ni используется закалка с нагревом до 800 °С и последующий двухкратный отпуск при 670 °С в течение 1 ч и при 600 °С – 1 ч.

Микроструктура после термической обработки состоит из отпущенных продуктов низкотемпературных превращений: мартенсита и бейнита и тонких включений аустенита (10–12 %), расположенных по границам мартенситных реек и внутри них.

В табл.1.36 и 1.37 приведен химический состав и механические свойства отечественных хладостойких никелевых сталей марок ОН6 и ОН9. Сталь ОН6 дополнительно легирована ниобием. В табл.1.37 обращают на себя внимание высокие прочностные характеристики $\sigma_т$ и $\sigma_в$ никелевых сталей. Это благоприятствует снижению металлоемкости и стоимости изготавливаемых из них конструкций.

Таблица 1.36. Химический состав отечественных хладостойких сталей

Сталь марки	Содержание, % по массе									ГОСТ или ТУ
	C не более	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Nb	Ti	
				не более						
ОН6	0,1	0,3–0,6	0,15–0,35	0,015	0,02	–	6,5–8	0,02–0,05	–	ТУ 14-1-2236-77
ОН9	0,1	0,3–0,6	0,15–0,35	0,015	0,02	–	8,5–10	–	–	ТУ 14-1-2236-77
10Х14Г14Н4Т*	0,1	13–15	Не более 0,8	0,02	0,035	13–15	2,8–4,5	–	5(C-0,02)-0,6	ГОСТ 5632-72* ТУ 14-1-3601-83

* В сталь вводится алюминий 0,02–0,05 %, цирконий 0,001 %, РЗМ 0,05 %, бор не более 0,003 %.

Таблица 1.37. Механические свойства отечественных хладостойких сталей

Сталь марки	Толщина листа, мм	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ_5, %	Ударная вязкость KCU, при -196 °С, Дж/см^2	Испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° при диаметре оправки, равном
		не менее				
ОН6	10–30	637	470	20	29,4	$2a$
ОН9	10–30	686	549	15	49	$2a$
10Х14Г14Н4Т	8–20	588	245	40	147	(a–толщина проката)

За рубежом (в США и Японии) разными металлургическими фирмами разработаны и предлагаются потребителям никелевые стали, в которых содержится до 1 – 2 % Mn, до 0,4 % Mo, а также добавки хрома и меди в разных сочетаниях. Это дополнительное легирование позволяет снизить содержание никеля до 5 – 5,5 % при сохранении хладостойкости на уровне стали с 9 % Ni.

У нас и за рубежом для сварки никелевых сталей используют ручную электродуговую сварку покрытыми электродами, электродуговую сварку в среде защитных газов, а также полуавтоматическую и автоматическую сварку под слоем флюса. Основная проблема – получение металла шва с такой же хладостойкостью, что и у основного металла. Однако существуют и другие проблемы: различие в температурных коэффициентах линейного расширения металла шва и основного металла, поведение при коррозионном воздействии окружающей среды, возможность водородного охрупчивания и т.п.

Обычно для сварки никелевых сталей используются присадочные материалы на основе высоконикелевых сплавов. В частности, в нашей стране, для ручной дуговой сварки стали марок ОН6 и ОН9 используются высоконикелевые электроды марок НИАТ-5 и ОЗЛ-25Б. Их недостатком является низкий предел текучести ме-

талла шва. В результате расчетные сопротивления для сварного соединения принимаются в 1,5 – 2 раза ниже, чем те, что могут быть приняты для основного металла. В связи с этим в последнее время проводятся работы по повышению прочности присадочных материалов, причем получены обнадеживающие результаты. Они основаны на введении в никелевый сплав значительных количеств хрома (до 20 %), молибдена (до 10 %), ниобия (до 4 %), вольфрама и других элементов в различных сочетаниях.

В отечественной практике проектирования металлоконструкций для криогенной техники сталь марки 0Н6 используется до температуры хранения жидкого этилена (минус 104 °С), а сталь марки 0Н9 – до температуры хранения жидкого природного газа (минус 165 °С). За рубежом стали указанных типов применяются до более низких температур.

В государствах бывш. СССР для металлоконструкций, эксплуатируемых при более низких температурах, в частности, для внутренних оболочек резервуаров хранилищ жидких кислорода и азота использовались аустенитные стали. Химический состав и механические свойства одной из них – экономно легированной стали марки 10Х14Г14Н4Т также приведены в табл.1.36 и 1.37. К сожалению, прочностные характеристики этих материалов значительно ниже прочностных характеристик никелевых сталей, что предопределяет их увеличенный расход.

1.9. Статистическое распределение характеристик прочности, нормативные и расчетные сопротивления

1.9.1. Статистическое распределение характеристик прочности. При установлении значений расчетных сопротивления проката и определении надежности конструкций необходима информация о распределениях характеристик прочности, являющихся непрерывными Изменчивость свойств проката складывается из стали в отдельном листе (уголке, швеллере и т.д.), в партии – плавке, в марке стали и зависит от множества технологических факторов. В отличие от специальных опытов в лаборатории, проводимых для исследования свойств новых сталей, в случае массового производства основными способами изучения стального проката являются статистические методы, использующие результаты большого количества испытаний, проводимых на металлургических предприятиях.

Обработка данных о прочностных характеристиках проката проводится строителями еще с 30 – 40-х годов и продолжается до настоящего времени [37 – 40]. В последние годы в связи с внедрением нормативных документов, содержащих требования по контролю качества проката с применением статистических методов, обработку информации о свойствах стали проводят и металлурги [41]. Широкое использование вычислительной техники позволяет оперативно получать статистическую информацию о свойствах стали и использовать ее для управления качеством продукции. В зависимости от решаемой задачи статистическая информация может группироваться и разделяться, а полученные выводы могут рассматриваться с разной степенью обобщения, распространяясь на прокат данной толщины, данного завода, данной стали или на продукцию, выпускаемую группой предприятий.

Государственные стандарты на металлопрокат практически всегда содержат нормы предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения. По результатам испытаний на растяжение, проводимым при контроле свойств проката в течение некоторого периода производства, можно составить выборки достаточного объема (например, не менее ста результатов за год), включив в них данные о пределе текучести, временном сопротивлении и относительном удлине-

нии. Выборки целесообразно составлять отдельно по маркам (наименованиям) стали, профилям, группам толщин, предприятиям-изготовителям проката и т.д. Более подробно требования к выборкам, составленным из результатов испытаний проката, приведены в специальной литературе, а также в ГОСТ 27772-88* и ОСТ 14-1-34-90.

В настоящее время имеется большее количество программ для статистической обработки данных на ЭВМ, с помощью которых можно получить исчерпывающую информацию о параметрах распределения, связях между случайными величинами, делать прогнозы и оценки.

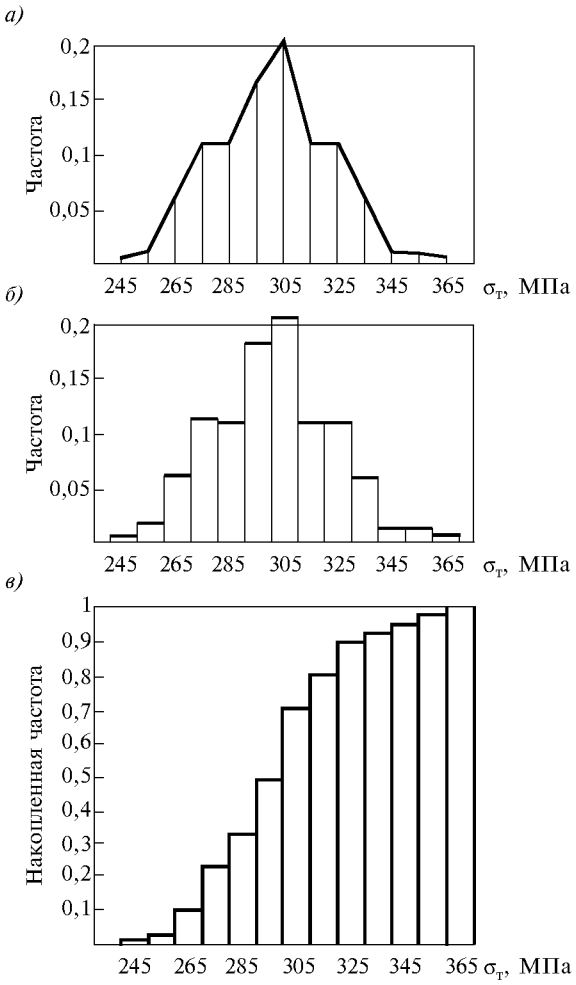


Рис.1.20. Эмпирическое распределение значений предела текучести двутавровой балки из стали марки ВСт3пс, изображенное разными способами

а – полигон; *б* – гистограмма; *в* – ступенчатая кривая

При статистической обработке результатов испытаний, образующих выборку, строят эмпирические распределения и определяют основные моменты этих распределений: среднеарифметическое значение, дисперсию и т.д. На рис.1.20 для примера приведены результаты обработки информации о пределе текучести двутавровой балки с толщиной полки до 10 мм из стали марок С255 и С275 производства Нижне-Тагильского металлургического комбината (1989 г.) в виде полигона (рис.1.20,*а*), гистограммы (рис. 1.20,*б*) и ступенчатой кривой (рис.1.20,*в*).

Построение и анализ эмпирических распределений позволяют оценить уровень и однородность прочностных характеристик проката. Например, можно оценить количество результатов ниже нормы стандарта или (выше) любого другого значения случайной величины. Однако для аналитических расчетов при прогнозировании свойств проката, оценке надежности контроля и решении задач, связанных с расчетом конструкции, переходят от эмпирических распределений прочностных характеристик к плотности распределения случайной величины X.

Рассмотрим для некоторого действительного числа x вероятность неравенства

$$x < X < x + \Delta x$$

где Δx – длина малого интервала в точке x.

Пусть при $\Delta x \to 0$

$$\frac{P(x < X < x + \Delta x)}{\Delta x} \to p(x) \qquad (1.31)$$

функция px и есть плотность распределения величины X. Интервал от плотности распределения по любому промежутку оси дает вероятность попадания величины X в этот промежуток. Этот интервал есть вероятность элементарного события.

Вероятность $P(X < x)$ того, что величина X меньше заданного числа x изобразится площадью под кривой $p(x)$ слева от ординаты $p(x)$. Для вероятности имеем

$$P(X < x) = \int_{-\infty}^{x} p(u)du = P(x) \qquad (1.32)$$

(для обозначения аргумента использована буква u , так как буква x применена для обозначения предела интеграла). Вероятность $P(x)$ называется интегральной функцией распределения.

На рис.1.21 на гистограмму и ступенчатую кривую, приведенные на рис.1.20, нанесены соответствующие им плотность вероятности и функция распределения. Для аппроксимации применен нормальный закон, записывающийся в виде плотности вероятности

$$p(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(x-\bar{x})^2}{2S^2}} \qquad (1.33)$$

для любого значения $-\infty < x < \infty$, где $\bar{x}$ и S параметры распределения. В случае больших выборок, получаемых при статистической обработке результатов испытаний на металлургических предприятиях, значения указанных параметров распределения достаточно близко совпадают со среднеарифметическим значением и среднеквадратическим отклонением. Для нормальной интегральной функции имеем выражение

$$P(x) = \int_{-\infty}^{x} p(x)dx \qquad (1.34)$$

Видно (см.рис.1.21), что эмпирическое распределение хорошо совпадает с нормальным. Для более объективного суждения можно воспользоваться специальными критериями, сведения о которых есть в литературе, например [42, 43]. Здесь же приведем доводы в пользу нормального закона, используемого подавляющим большинством исследователей при изучении свойств стального проката.

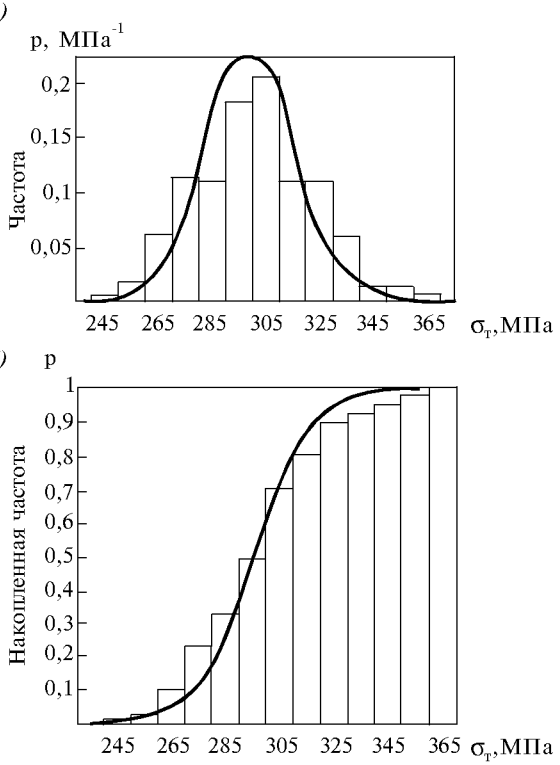


Рис.1.21. Плотность вероятности (*а*) и функция распределения (*б*) предела текучести двутавровой балки из стали марки ВСт3пс

Прочностные характеристики стали есть результат суммарного действия независимых (пусть даже слабо зависимых) случайных величин, ни одна из которых не

оказывает превалирующего влияния, что согласно предельным теоремам теории вероятностей позволяет считать распределения предела текучести и временного сопротивления стального проката сколь угодно близкими к нормальному закону.

Отвергать нормальный закон по той причине, что он допускает отрицательные значения случайной величины, нет оснований. Математическое ожидание предела текучести проката строительных сталей отстоит от нулевого значения на 7 – 10 среднеквадратических отклонений. Следовательно, при аппроксимации эмпирического распределения нормальной кривой вероятность нулевого, а тем более отрицательного значения прочностной характеристики, равна нулю. Нормальный закон симметричен. Симметрия может нарушаться из-за действия возмущающих факторов, именуемых «барьерами».

Таким «барьером» может служить нормативное значение ГОСТ или ТУ. Асимметрия распределения, построенного по результатам всех контрольных испытаний – удовлетворительных и неудовлетворительных, может появиться, если нормативное значение очень близко к математическому ожиданию. В этом случае возможны даже бимодальные эмпирические распределения с большой долей результатов, равных нормативному значению. Независимые переиспытания снимают асимметрию, но обнаруживают большую долю металла со свойствами, ниже нормативных значений. Если свойства проката достаточно высокие и результаты испытаний достаточно полно удовлетворяют требованиям норм («не натягиваются»), то распределения прочностных характеристик проката до проведения контрольных испытаний практически всегда симметричные.

Вместе с тем процесс контроля свойств может деформировать распределение в результате отбраковки некондиционных партий металла. Из-за неоднородности свойств стали в партии и выборочного характера контроля всегда остается вероятность попадания в конструкции проката со свойствами, ниже нормативных значений. Поэтому распределение прочностной характеристики после проведения контроля не может быть усеченным на уровне нормативного значения. На рис.1.22 показаны плотности вероятности распределения прочностной характеристики до контроля в виде нормального распределения $p(x)$, усеченного распределения $p_y(x)$, идеализирующего эффективность контроля, и асимметричного распределения после контроля $p_1(x)$. Степень асимметрии плотности вероятности $p_1(x)$, зависит от параметров, отражающих уровень и однородность свойств прочностной характеристики в исходном распределении, от однородности этой характеристики внутри партии и процедуры контроля.

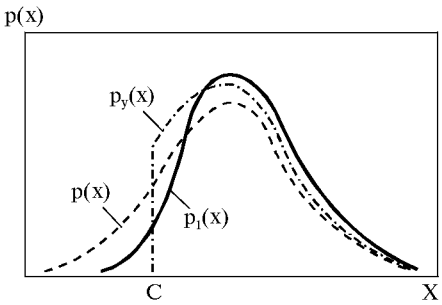


Рис.1.22. Влияние процедуры контроля прочностной характеристики на вид плотности ее распределения

При назначении расчетных сопротивлений и определении надежности конструкции можно было бы и не учитывать влияние процедуры контроля на вид распределения, оставляя его нормальным. Однако в настоящее время широкое распространение получила дифференциация проката на группы прочности, т.е. разделение проката одной и той же стали, одной и той же толщины на группы с различными нормами прочностных характеристик, основываясь на результатах испытаний или прогнозах по уравнениям регрессии.

Дифференциация проката начата металлургами в 1980 г. по инициативе ИЭС им. Е.О.Патона [44] и получила широкое распространение (ГОСТ 27772-88* «Прокат для строительных стальных конструкций», ГОСТ 19281-89* «Прокат из стали повышенной прочности»). В соответствии с положениями ГОСТ 27772-88* прокат из углеродистой полуспокойной стали разделяется на сталь марок С245 и С275, из углеродистой спокойной стали – на марки С255 и С285, а из низколегированной кремнемарганцовистой стали – на С345 и С375. Для проката из стали марок С275, С285 и С375 нормативные значения предела текучести установлены, как правило, на 30 МПа выше, чем соответствующего проката из стали марок С245, С255 и С345.

Прежде чем перейти к распределениям прочностных характеристик в прокате, дифференцированном по группам прочности, следует остановиться на процедуре контроля свойств, использованной в ГОСТ 27772-88*. Применен подход, основанный на теореме Байеса, использующий результаты контрольных испытаний и статистическую информацию об уровне и однородности свойств. В стандарте содержится требование обеспеченности норм предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения не ниже 0,95 в каждой партии. Эта достаточно высокая обеспеченность требует при контроле прочностных характеристик превышения среднеарифметических значений результатов испытаний двух (шести) образцов от партии над нормой стандарта на 10 – 25 МПа.

Значение приемочного числа, позволяющее получить заданную обеспеченность нормативного значения характеристики в партии, зависит от самого нормативного значения, количества испытаний при осуществлении контроля партии, среднеарифметического значения выборки и среднеквадратических отклонений контролируемой характеристики в выборке и партии [45]. О требованиях к выборке говорилось ранее. Добавим лишь, что в ГОСТ 27772-88* содержится требование превышения среднеарифметического значения выборки (в которую входят все результаты испытаний проката, еще не подвергнутого дифференциации) над нормативным значением на 1,64 от среднеквадратического отклонения. При проверке приведенного условия для проката, разделяемого на группы прочности, превышение среднеарифметического значения над нормативным определяется для менее прочной стали. Введенная регламентация для среднего уровня свойств позволяет уменьшить риск потребителя и в какой-то мере блокировать возможную асимметрию распределений прочностных характеристик, вызванную стремлением при сдаче продукции искусственно повысить (натянуть) результаты испытаний.

Плотность вероятности распределения прочностной характеристики в прокате, прошедшем контроль в соответствии с процедурой, оговоренной тем или иным нормативным документом, имеет вид: $p_1(x) = \mu(x)p$, где $\mu(x)$ функция преобразования, зависящая от плана контроля. Вывод аналитических выражений для плотности вероятности $p_1(x)$ дан в [46].

На рис.1.23 приведены плотности вероятности предела текучести в угловом прокате с толщиной полки до 10 мм включительно из углеродистой кипящей стали марки С235. Выбор примера обусловлен тем, что прокат из кипящей стали пока не разделен на группы прочности. В этом случае можно проследить изменение исходного нормального распределения (линия «*1*») после контроля по ГОСТ 535-89 (линия «*2*») или ГОСТ 27772-88* (линия «*3*»). Площадь под линией «*3*» левее значения расчетного сопротивления по СНиП II-23-81* (230 МПа) меньше, чем под линией «*2*», что свидетельствует о более высокой надежности контроля по ГОСТ 27772-88*.

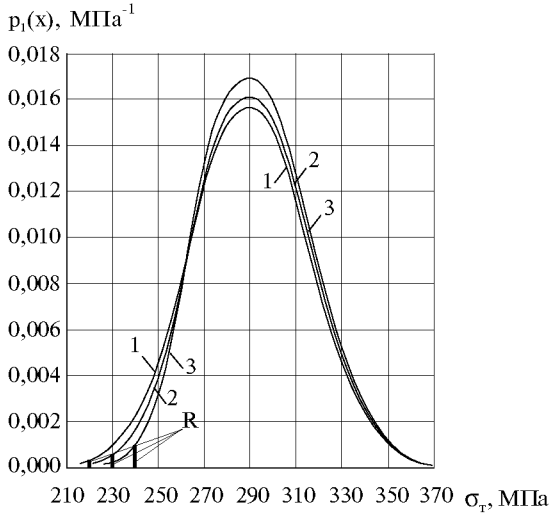


Рис.1.23. Плотность вероятности предела текучести в прокате угловых профилей из кипящей углеродистой стали до и после контроля свойств

1 – исходные значения; *2* – после контроля по нормам ГОСТ 535-89; *3* – после контроля по нормам ГОСТ 27772-88*; *R* – расчетные сопротивления с обеспеченностью 0,995

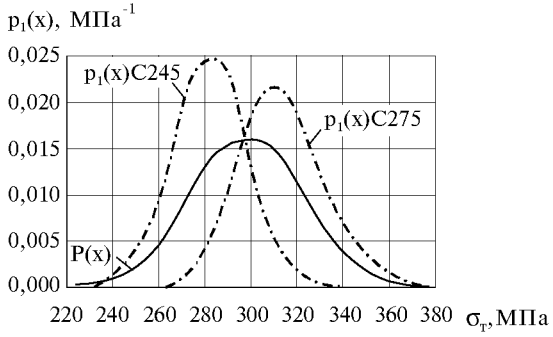


Рис.1.24. Плотность вероятности предела текучести в листовом прокате полуспокойной углеродистой стали толщиной 6–10 мм до и после его разделения на группы прочности

На рис.1.24 приведена плотность вероятности предела текучести для всей совокупности листового проката толщиной 6–10 мм из полуспокойной углеродистой стали (сплошная линия). Показано, что разделение проката на две группы прочности – С245 и С275 приводит к получению двух распределений плотности вероятности (штрихпунктирных линий) и к установлению двух значений расчетных сопротивлений. Остановимся на методике назначения расчетных сопротивлений. Во многом эта процедура носит волевой характер, опираясь на предшествующий опыт проектирования и эксплуатации металлоконструкций. В последние годы уменьшены значения коэффициентов надежности по материалу и, следовательно, повышены значения расчетных сопротивлений, что потребовало срочной вероятностной оценки обеспеченности расчетных сопротивлений и стандартизации методики их назначения.

При установлении расчетных сопротивлений целесообразно нормировать их обеспеченность и принять ее, например, не ниже вероятности 0,995, т.е. установить требование:

$$P_{\text{об.к}} = \int_{R}^{\infty} p_1(x)dx \geq 0{,}995 \qquad (1.35)$$

Во время подготовки СНиП II-23-81* редакции 1990 г. это требование проверено для всех видов проката, поставляемого по ГОСТ 27772-88*. Проверка производилась практически на каждом металлургическом предприятии.

1.9.2. Параметры статистических распределений характеристик прочности. Здесь приведены сведения о параметрах распределений прочностных характеристик проката из углеродистой и низколегированной стали, применяемого в стальных строительных конструкциях в соответствии со СНиП II-23-81*. Большое разнообразие оборудования, сырья, технологий, применяемых в металлургии, приводят к неодинаковым распределениям механических свойств в одинаковом прокате, но изготовленном на различных предприятиях. Вместе с тем прослеживаются общие тенденции, например: снижение прочностных свойств с ростом толщины проката.

На рис.1.25,*а* приведена зависимость среднеарифметических значений предела текучести в листовом прокате из углеродистой спокойной стали (марки С255 и С285) от толщины. Данные, полученные при обработке результатов испытаний проката, изготовленного на 10 предприятиях, показывают, что размах среднеарифметических значений может достигать 50 МПа для одной и той же толщины. Снижение предела текучести особенно интенсивно при росте толщины листа в пределах 2 – 6 мм. Вместе с тем именно на этом участке аппроксимирующей кривой (толстая линия) следует внести коррективы (толстая пунктирная линия).

В настоящее время бóльшая часть листа этой толщины после прокатки сматывается в рулон. Пробы для проведения испытаний отбираются от внешнего витка рулона. Этот виток имеет предел текучести в среднем на 30 МПа выше, чем металл внутренних витков. Разница обусловлена различной температурой окончания прокатки и смотки, а также неодинаковыми условиями остывания внешнего витка и остальной части рулона [47]. Схождение на рисунке сплошной и пунктирной аппроксимирующих линий объясняется уменьшением доли рулонированного листа с ростом его толщины, а не уменьшением разницы свойств внешнего витка и остальной части рулона. Зависимость временного сопротивления от толщины приведена на рис.1.25,*б*.

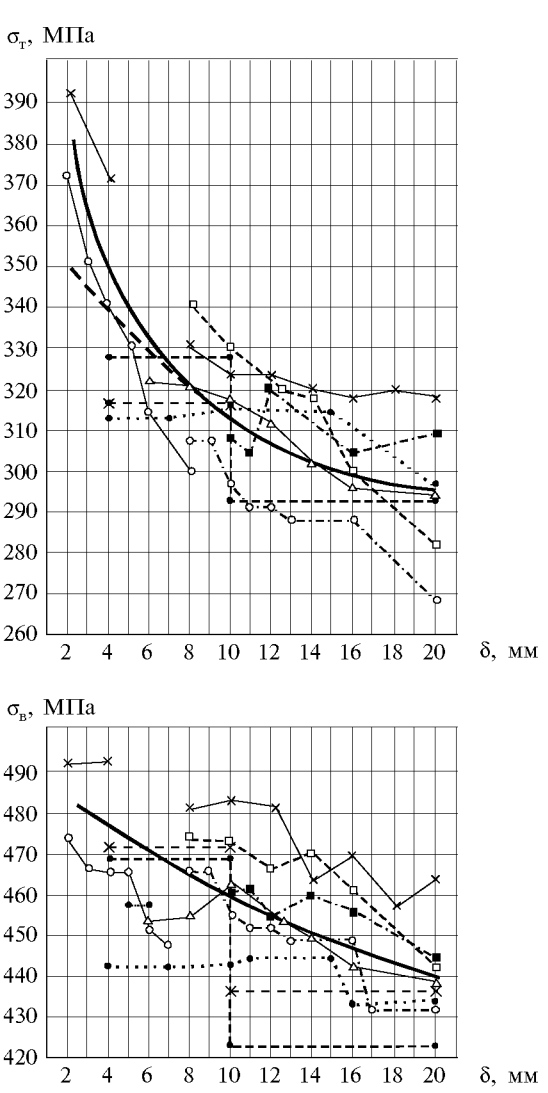


Рис.1.25. Влияние толщины листа δ из углеродистой стали, изготовленной на разных металлургических заводах, на величины предела текучести (*а*) и временного сопротивления (*б*) (среднеарифметические значения)

На рис.1.26 иллюстрируется зависимость предела текучести в листовом прокате из углеродистой стали от толщины при разной степени раскисленности металла. Приведены аппроксимирующие кривые среднеарифметических значений по результатам около 50 тыс. испытаний на разных металлургических заводах. Очевидна закономерность: чем выше раскисленность стали, тем больше прочностные характеристики проката. Предел текучести листа (и других профилей) из полуспокойной стали по своему уровню ближе к показателям проката из кипящей стали.

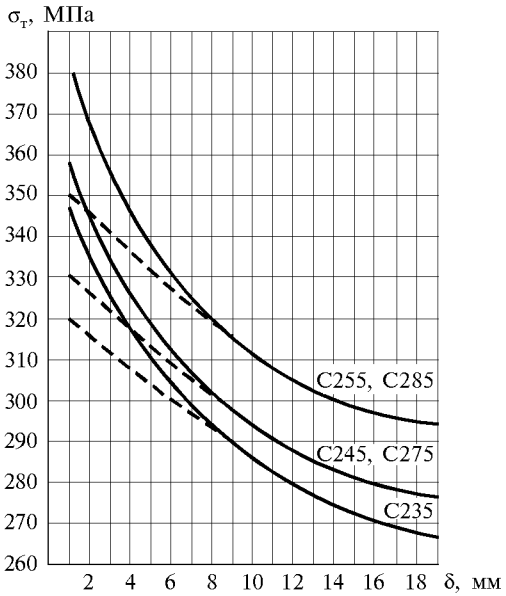


Рис.1.26. Зависимость предела текучести углеродистой стали от толщины листа и степени раскисленности

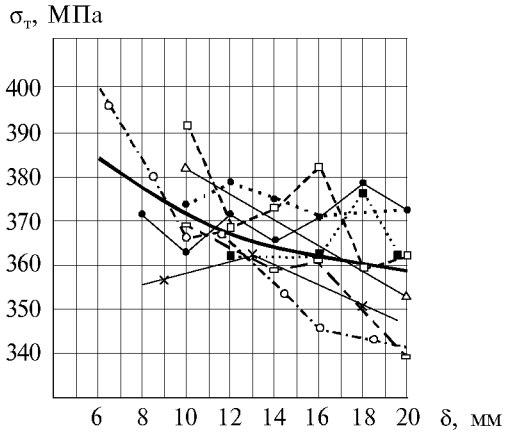


Рис.1.27. Влияние толщины листа из низколегированной кремнемарганцовистой стали, изготовленной на разных металлургических заводах, на величину предела текучести (среднеарифметические значения)

На рис.1.27 приведены зависимости среднеарифметических значений предела текучести листа из низколегированной кремне-марганцовистой стали (марок С345, С275) от толщины. Данные получены по результатам испытаний на семи металлургических предприятиях. Отмечается снижение прочности с ростом толщины, но в меньшей степени, чем в углеродистой стали. Отчасти сказывается применение термической обработки толстых листов, проводимой в ряде случаев для получения необходимых показателей прочности и хладостойкости. Размах среднеарифметических значений предела текучести в прокате одной толщины производства разных заводов также существенный.

Прочностные характеристики фасонного проката – уголков, швеллеров, двутавровых балок в большинстве случаев несколько выше, чем листового (при совпадении толщины листа и полки фасонного профиля). Однако прокат с толщиной полки 3 – 5 мм, изготовленный на мелкосортных станах с большой скоростью прокатки, из-за высокой температуры конца прокатки может иметь прочностные характеристики более низкие, чем более толстый прокат. В значительной мере это относится к низколегированной кремнемарганцовистой стали. На рис.1.28 приведены среднеарифметические значения предела текучести фасонного проката из углеродистой стали, а на рис.1.29 – угловых профилей из низколегированной кремнемарганцовистой стали при различной толщине полки. Аппроксимирующие кривые построены по данным 18 предприятий.

Приведенная информация дает общие представления об уровне прочностных свойств проката, имеющего массовое применение в строительных металлоконструкциях. Дополнительно можно сказать, что значения среднеквадратических отклонений распределений предела текучести и временного сопротивления в выборках, отражающих свойства однотипного проката производства отдельного завода примерно за год, находятся в интервале 2,5 – 3,5 МПа. Среднеквадратические отклонения этих же характеристик в партии 0,8 – 1,5 МПа. Меньшие значения чаще относятся к прокату, изготовленному из непрерывно литой заготовки.

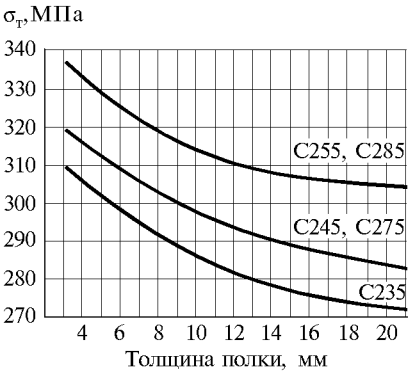


Рис.1.28. Зависимость предела текучести фасонного проката из углеродистой стали от толщины полки

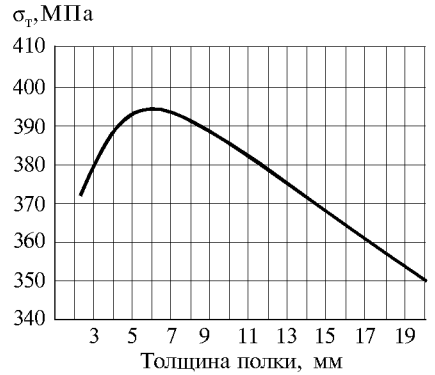


Рис.1.29. Зависимость предела текучести проката угловых профилей из низколегированной кремнемарганцовистой стали от толщины полки

1.9.3. Нормативные и расчетные сопротивления. Минимальные гарантируемые значения предела текучести и временного сопротивления проката стали при растяжении принимаются в качестве основных нормативных сопротивлений материала при расчете и проектировании металлических конструкций (обозначаются R_{yn} и R_{un} соответственно). Значения нормативных сопротивлений для листового, широкополосного универсального и фасонного прокатов стали разных уровней прочности по ГОСТ 27772-88* приведены в табл.1.38. Их обеспеченность согласно процедуре контроля по указанному стандарту выражается вероятностью $P_{об.к} \geq 0{,}95$.

В той же таблице даны значения расчетных сопротивлений проката по пределу текучести и временному сопротивлению (обозначаются R_y и R_u соответственно). Они получены делением соответствующих нормативных сопротивлений на коэффициент надежности по материалу, значение которого для проката разных сталей регламентировано СНиП II-23-81*. Обеспеченность расчетных сопротивлений согласно произведенной проверке, как указывалось, выражается вероятностью $P_{об.к} \geq 0{,}995$.

Таблица 1.38. Нормативные и расчетные сопротивления стали

Наименование стали	Толщина проката, мм	Нормативное сопротивление проката, МПа				Расчетное сопротивление проката, МПа			
		листового широкополосного универсального		фасонного		листового широкополосного универсального		фасонного	
		R_{yn}	R_{un}	R_{yn}	R_{un}	R_y	R_u	R_y	R_u
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
С235	От 2 до 20	235	360	235	360	230	350	230	350
	Св. 20 до 40	225	360	225	360	220	350	220	350
	Св. 40 до 100	215	360	–	–	210	350	–	–
	Св. 100	195	360	–	–	190	350		
С245	От 2 до 20	245	370	245	370	240	360	240	360
	Св. 20 до 30	–	–	235	370	–	–	230	360
С255	От 2 до 3,9	255	380	–	–	250	370	–	–
	От 4 до 10	245	380	255	380	240	370	250	370
	Св. 10 до 20	245	370	245	370	240	360	240	360
	От 20 до 40	235	370	235	370	230	360	230	360

Продолжение табл.1.38

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
С275	От 2 до 10	275	380	275	390	270	370	270	380
	Св. 10 до 20	265	370	275	380	260	360	270	370
С285	От 2 до 3,9	285	390	–	–	280	380	–	–
	От 4 до 10	275	390	285	400	270	380	280	390
	Св.10 до 20	265	380	275	390	260	370	270	380
С345	От 2 до 10	345	490	345	490	335	480	335	480
	Св. 10 до 20	325	470	325	470	315	460	315	460
	Св. 40 до 60	285	450	–	–	280	440	–	–
	Св. 60 до 80	275	440	–	–	270	430	–	–
	Св. 80 до 160	265	430	–	–	260	420	–	—
С345К	От 4 до 10	345	470	345	470	335	460	335	460
С375	От 2 до 10	375	510	365	510	365	500	365	500
	Св. 10 до 20	355	490	355	490	345	480	345	480
	Св. 20 до 40	335	480	335	480	325	470	325	470
С390	От 4 до 50	390	540	–	–	380	530	–	–
С390К	От 4 до 30	390	540	–	–	380	530	–	–
С440	От 4 до 30	440	590	–	–	430	575	–	–
	Св. 30 до 50	410	570	–	–	400	555	–	–
С590	От 10 до 36	540	635	–	–	515	605	–	–
С590К	От 16 до 40	540	635	–	–	515	605	–	–

Примечания. 1. За толщину фасонного проката следует принимать толщину полки. Минимальная толщина – 4 мм. 2. За нормативное сопротивление приняты нормативные значения предела текучести и временного сопротивления по ГОСТ 27772-88*. 3. Значения расчетных сопротивлений получены делением нормативных сопротивлений на коэффициенты надежности по материалу, определенные в соответствии с п.3.2 ГОСТ и округлением до 5 МПа.

1.10. Выбор стали для строительных стальных конструкций

Согласно строительным нормам и правилам СНиП II-23-81* (Нормы проектирования. Стальные конструкции) для стальных строительных конструкций зданий и сооружений марки стали в соответствии с их качеством принимаются в зависимости от степени ответственности конструкций, а также от условий их эксплуатации. При этом в зависимости от степени ответственности и условий эксплуатации все конструкции зданий и сооружений разделяются на четыре группы.

Группа 1. Сварные конструкции либо их элементы, работающие в особо тяжелых условиях или подвергающиеся непосредственному воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок (подкрановые балки, балки рабочих площадок, элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, непосредственно воспринимающие нагрузку от подвижных составов, фасонки ферм; пролетные строения транспортерных галерей; сварные специальные опоры больших переходов линий электропередачи (ВЛ) высотой более 60 м; элементы оттяжек мачт и оттяжечных узлов; балки под краны гидротехнических сооружений и т.п.).

Группа 2. Сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке (фермы; ригели рам; балки перекрытий и покрытий; косоуры лестниц; опоры ВЛ, за исключением сварных опор больших переходов; опоры ошиновки открытых распределительных устройств подстанции (ОРУ); опоры под включатели ОРУ; опоры транспортерных галерей; элементы контактных сетей транспорта; прожекторные мачты; элементы комбинированных опор антенных сооружений; трубопроводы ГЭС и насосных станций; облицовки водоводов; закладные части затворов и другие растянутые, растянуто-изгибаемые и изгибаемые элементы), а также конструкции и элементы группы *1* при отсутствии сварных

соединений и балки подвесных путей из двутавров по ГОСТ 19425-74* и ТУ 14-2-427-80 при наличии сварных монтажных соединений.

Группа 3. Сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке (колонны; стойки; опорные плиты; элементы настила перекрытий; конструкции, поддерживающие технологическое оборудование; вертикальные связи по колоннам с напряжением в связях свыше 0,4 R_y; анкерные, поддерживающие и фиксирующие конструкции на опорах и поперечинах контактной сети; опоры под оборудование ОРУ, кроме опор под выключатели; элементы стволов и башен антенных сооружений; колонны бетоновозных эстакад, прогоны покрытий и другие сжатые и сжато-изгибаемые элементы), а также конструкции и их элементы группы *2* при отсутствии сварных соединений.

Группа 4. Вспомогательные конструкции зданий и сооружений (связи, кроме указанных в группе *3*; элементы фахверка, лестницы; трапы; площадки; ограждения; металлоконструкции кабельных каналов; второстепенные элементы сооружений и т.п.), а также конструкции и их элементы группы *3* при отсутствии сварных соединений.

Для каждой группы конструкций в СНиП II-23-81* (табл.50) регламентируется набор марок стали разного уровня прочности, разной толщины проката. Требования по хладостойкости (категория по нормируемым показателям ударной вязкости) для каждой из этих марок назначаются в зависимости от климатического района, в котором возводятся конструкции, соответствующих расчетных температур (средних за наиболее холодную пятидневку). Определение наименований, марок и категорий поставок сталей, заменяемых сталями по ГОСТ 27772-88*, обеспечивается табл.51.б СНиП II-23-81*. В табл.1.39 приведен перечень марок сортового, фасонного широкополосного и листового проката стали, используемых в практике проектирования металлоконструкций зданий и сооружений общего назначения институтом ЦНИИпроектстальконструкция.

Для конструкций специальных сооружений: комплекса доменных цехов, специальных резервуаров и газгольдеров, морских стационарных платформ, железнодорожных и автодорожных мостов и пр. разработаны свои рекомендации по выбору марок стали.

Таблица 1.39. Марки стали сортового, фасонного, широкополосного и листового проката для стальных конструкций зданий и сооружений

Группа конструкций	Наименование стали	ГОСТ или ТУ	Категория стали для климатического района строительства (расчетная температура, °С)		
			II_4 (-30> t ≥-40) II_5 и др.(t ≥-30)	I_2, II_2 и III_3 (-40> t ≥-50)	I_1 (-50> t ≥-65)
1	2	3	4	5	6
1	С255	ГОСТ 27772-88*	+	–	–
	С285		+	–	–
	С345		3	3	4 а)
	С375		3	3	4 а)
	С390		+	+	+ б)
	С390К		+	+	+ б)
	С440		+	+ б)	+ в)
2	С245	ГОСТ 27772-88*	+ г)	–	–
	С255		+	–	–
	С275		+ г)	–	–
	С285		+	–	–
	С345		1	3	4 а,д)

Продолжение табл.1.39

1	2	3	4	5	6
2	С345К	ГОСТ 27772-88*	+	–	–
	С375		1	3	4 *а,д)*
	С390		+	+	+ *б)*
	С390К		+	+	+ *б)*
	С440		+	+	+ *в)*
	С590		+	–	–
	С590К		–	+	+
3	С235	ГОСТ 27772-88*	+ *е,и)*	–	–
	С245		+	–	–
	С255		+	+ *ж)*	–
	С275		+	–	–
	С285		+	+ *ж)*	–
	С345		1	1	2 или 3
	С345К		+	+	–
	С375		1	1	2 или 3
	С390		+	+	+
	С390К		+	+	+
	С440		+	+	+
	С590		+	–	–
	С590К		–	+	+
4	С235	ГОСТ 27772-88*	+	–	–
	С245		–	+	+
	С255		–	+	+
	С275		–	+	+
	С285		–	+	+

Обозначения, принятые в табл.1.39:

а) фасонный прокат толщиной до 11 мм, а при согласовании с изготовителем – до 20 мм; листовой – всех толщин;

б) требование по ограничению углеродного эквивалента по ГОСТ 27772-88* для всех толщин свыше 20 мм;

в) требование по ограничению углеродного эквивалента по ГОСТ 27772-88* для всех толщин;

г) для района II_4 для неотапливаемых зданий и конструкций, эксплуатируемых при температуре наружного воздуха, применять прокат толщиной не более 10 мм;

д) при толщине проката не более 11 мм допускается применять сталь категории 3;

е) кроме опор ВЛ, ОРУ и КС;

ж)прокат толщиной до 10 мм и с учетом требований раздела 10 СНиП II-23-81*;

и) кроме района II_4 для неотапливаемых зданий и конструкций, эксплуатируемых при температуре наружного воздуха.

Знак «+» означает, что данную сталь следует применять; знак «–» означает, что данную сталь в указанном климатическом районе применять не следует.

Примечания:

1. Требования настоящей таблицы не распространяются на стальные конструкции специальных сооружений: магистральные и технологические трубопроводы, резервуары специального назначения, кожухи доменных печей и воздухонагревателей и т.п. Стали для этих конструкций устанавливаются соответствующими СНиП или другими нормативными документами.
2. Требования настоящей таблицы распространяются на листовой прокат толщиной от 2 мм и фасонный прокат толщиной от 4 мм по ГОСТ 27772-88*, сортовой прокат (круг, квадрат, полоса) по ТУ 14-1-3023-80, ГОСТ 380-71** (1990 г. ГОСТ 535-88) и ГОСТ 19281-89. Указанные категории стали относятся к прокату толщиной не менее 5 мм, при толщине менее 5 мм приведенные в таблице стали применяются без требований ударной вязкости. Для конструкций всех групп, кроме группы 1 и опор ВЛ и ОРУ, во всех климатических

районах, кроме I_1, допускается применять прокат толщиной менее 5 мм из стали С235 по ГОСТ 27772-88*.

3. Климатические районы строительства устанавливаются в соответствии с ГОСТ 16350-80 «Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей». Указанные в головке таблицы в скобках расчетные температуры соответствуют температуре наружного воздуха соответствующего района, за которую принимается средняя температура наиболее холодной пятидневки согласно указаниям СНиП по строительной климатологии и геофизике.
4. К конструкциям, подвергающимся непосредственному воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок, относятся конструкции либо их элементы, подлежащие расчету на выносливость или рассчитываемые в учетом коэффициента динамичности.
5. При соответствующем технико-экономическом обосновании стали С345, С375, С440, С590, С590К, 16Г2АФ могут заказываться как стали повышенной коррозионной стойкости (с медью) – С345Д, С375Д, С440Д, С590Д, С590КД, 16Г2АФД.
6. Применение термоупрочненного с прокатного нагрева фасонного проката из стали С345Т и С375Т, поставляемого по ГОСТ 27772-88* как сталь С345 и С375, не допускается в конструкциях, которые при изготовлении подвергаются металлизации или пластическим деформациям при температуре выше 700°С.
7. Бесшовные горячедеформированные трубы по ГОСТ 8731-87 допускается применять только для элементов специальных опор больших переходов ЛЭП высотой более 60 м, для антенных сооружений связи и других специальных сооружений, при этом следует применять марки стали:

   во всех климатических районах, кроме I_2, II_2, II_3 – марку 09Г2С по ГОСТ 8731-87, но с дополнительным требованием по вязкости при температуре минус 20°С не менее 30 Дж/см^2 (3 кгс · м/см^2);

   в климатических районах I_2, II_2, III_3 – марку 09Г2С по ГОСТ 8731-87, но с дополнительным требованием, по ударной вязкости при температуре минус 40°С не менее 40 Дж/см^2 (4 кгс · м/см^2) при толщине стенки до 9 мм и 3,5 Дж/см^2 (3,5 кгс · м/см^2) при толщине стенки 10 мм и более.

   Не допускается применять бесшовные горячедеформированные трубы, изготовленные из слитков, имеющих маркировку с литером «Л», не прошедшие контроль неразрушающими методами.
8. К сортовому прокату (круг, квадрат, полоса) по ТУ 14-1-30230-80, ГОСТ 380-71** (с 1990 г. ГОСТ 535-88) и ГОСТ 19281-89 предъявляются такие же требования, как к фасонному прокату такой же толщины по ГОСТ 27772-88*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Стальные конструкции СНиП II-23-81* (часть II, гл.23). – М.: 1991.
2. **Мельников Н.П., Гладштейн Л.И.** Перспективы использования высокопрочной стали в строительных металлоконструкциях. – В кн.: Материалы по металлическим конструкциям, вып.18. – М.: Стройиздат, 1975.
3. IIWDoc.IX-535-67, 1967.
4. **Хашимото У., Инагаки М.** Автоматическая сварка. – 1967. – № 8, № 9.
5. Ito I., Bessyok.: IIWDoc.IX-576-68. – 1968.
6. Yurioka N., Ohsita S., Tamehiro H.: Pipe-line welding in the 80s. AWRA symp. March 1981, 1.
7. **Гладштейн Л.И., Литвиненко Д.А.** Высокопрочная строительная сталь. – М.: Металлургия, 1972.
8. **Бакши О.А.** О напряженном состоянии мягких прослоек в сварных соединениях при растяжении (сжатии). – В кн.: Вопросы сварочного производства (труды ЧПИ), вып.33. – Челябинск, 1965.
9. **Бакши 0.А., Ерофеев В.В.** и др. Влияние степени механической неоднородности на статическую прочность сварных соединений. – Сварочное производство. – 1983. – № 4.
10. **Макаров Э.Л.** Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981.

11. **Шоршоров М.Х.. Чернышева Т.А., Красовский А.И.** Испытания металлов на свариваемость. – М.: Металлургия, 1972.
12. **Копельман Л.А.** Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – М.: Машиностроение, 1978.
13. **Мешков Ю.Я.** Физические основы разрушения стальных конструкций. – Киев: Наукова думка, 1981.
14. **Гладштейн Л.И., Ларионова Н.П.** Влияние величины зерна феррита на характеристики деформирования и разрушения строительной стали. – Проблемы прочности. – 1982. – № 7.
15. **Cheviet A., Grumbach M., Prudhomme M., Sanz G.** Comparaison des resultas de divers essais de rupture fragile. – Revue de Metallurgie. – 1970. – № 3.
16. **Васильченко Г.С., Кошелев П.Ф.** Практическое применение механики разрушения для оценки прочности конструкции. – М.: Наука, 1974.
17. **Роботнов Ю.Н., Васильченко Г.С.** и др. Метод расчета конструкций на сопротивление хрупкому разрушению. – Машиностроение. – 1976. – № 1.
18. **Гладштейн Л.И., Литвиненко Д.А., Онучин Л.Г.** Структура аустенита и свойства горячекатаной стали. – М.: Металлургия, 1983.
19. **Ицкович Г.М.** Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений. – М.: Металлургия, 1981.
20. **Лихтарников Я.М.** Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979.
21. **Кузнецов В.В., Богатова И.В., Гладштейн Л.И., Стрелецкий Д.Н.** Об оценке экономической эффективности применения в металлоконструкциях сталей повышенной и высокой прочности. – Промышленное строительство. –1983. – № 9.
22. **Латаш Ю.В., Медовар Б.И.** Электрошлаковый переплав. –М.: Металлургия, 1970.
23. **Шнееров Я.А., Вихлевщук В.А.** Полуспокойная сталь. – М.: Металлургия, 1973.
24. Непрерывная разливка стали. Тематический сб. науч. тр. –М.: Металлургия, 1989.
25. **Литвиненко Д.А., Погоржельский В.Н., Матросов Ю.И.** и др. Контролируемая прокатка. – М.: Металлургия, 1980.
26. **Нестеров Д.К., Рудюк С.И., Коваленко В.Ф.** и др. Исследования уровня качества и обеспечение производства проката, дифференцированного по механическим свойствам. – В кн.: Повышение эффективности производства и применения проката. Черная металлургия, обзорная информация. – М.: Черметинформация, 1989.
27. **Кузнецов В.В., Беляев В.Ф., Гладштейн Л.И. Стрелецкий Д.Н.** Перспективные требования к металлопрокату строительных сталей. – В кн.: Разработка и исследование стали для металлических конструкций. – М.: 1988.
28. Полуспокойные стали для строительних металлических конструкций / Сб.тр.ЦНИИСК. М.: Стройиздат, 1976.
29. **Гольдштейн М.И., Гринь А.В., Блюм Э.Э., Панфилова Л.М.** Упрочнение конструкционных сталей нитридами. – М.: Металлургия, 1976.
30. **Мельников Н.П., Гладштейн Л.И.** Стали с карбонитридным упрочнением. – Вестник Академии наук СССР. – 1978., – № 6.
31. **Стародубов К.Ф., Узлов И.Г., Савенков В.Я.** и др. Термическое упрочнение проката. – М.: Металлургия, 1970.
32. **Кугушин А.А., Черненко В.Т., Бабич В.К.** и др. Повышение прочности и хладостойкости угловых профилей путем термического упрочнения с прокатного нагрева. – Сталь. – 1986. – № 6.
33. **Поповский Б.В., Лебедев Б.Ф.** О предотвращении слоистого растрескивания сварных соединений. Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1988, – № 3.
34. **Мельников Н.П., Гладштейн Л.И., Гавриленко Л.Г.** и др. Сталь с карбонитридным упрочнением электрошлакового переплава для крупногабаритных сосудов давления. – Сталь. – 1982. – № 12.
35. **Гладштейн Л.И., Лактюшин В.С.** Применение атмосферостойких сталей без защитных покрытий в строительных конструкциях. – Обзорная информация. – Строительство и архитектура. Вып.6. – М.: 1979.
36. **Гладштейн Л.И., Демыгин Н..Е.** Применение никелевых хладостойких сталей в сварных листовых конструкциях для хранения и транспортировки сжиженных газов. – Обзорная информация. – Строительство и архитектура. – М.: 1985, сер.8, вып.4.

ГЛАВА 2

СОРТАМЕНТЫ ПРОФИЛЕЙ, ЛИСТОВОГО ПРОКАТА, ТРУБ И СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

2.1. Классификация металлопроката

Весь металлопрокат по условиям применения разделяется на две группы: металлопрокат общего и специального назначения. К наиболее массовому относится металлопрокат общего назначения, широко используемый в различных областях промышленности и строительства при разнообразных силовых воздействиях: растяжении, сжатии, изгибе, внецентренном сжатии и растяжении. В эту группу металлопроката входят двутавры, швеллеры, зетовые, С-образные и корытные профили, тавры, уголки равнополочные и неравнополочные, трубы круглые, квадратные и прямоугольные, листовой, широкополосный универсальный и полосовой прокат; стальные канаты.

К металлопрокату специального назначения, используемому в строительных стальных конструкциях, относятся профили и изделия, форма и размеры которых определяются функциональным назначением и особенностями тех конструкций массового применения, где они используются. В эту группу входят: гофрированные профили (профилированные листы) для покрытий и стен, двутавровые балки для путей подвесного транспорта, профили для оконных и фонарных переплетов и для оконных панелей, крановые рельсы, рифленые листы, просечно-вытяжные листы.

2.2. Сортаменты

Сортаментом профилей (изделий) называется перечень профилей (изделий) одного определенного вида с указанием их формы, размеров, массы единицы длины, геометрических характеристик, допускаемых отклонений по размерам и форме, а также условий поставки. Сортаменты составляются обычно в порядке возрастания основных размеров профилей. В некоторых зарубежных сортаментах принято расположение профилей в порядке уменьшения этих величин. Сортаменты оформляются в виде государственных стандартов (ГОСТ) или ведомственных технических условий (ТУ). В сортаментах профилей специального назначения форма, размеры, характеристики профилей и их общее количество определяются в соответствии с конкретными условиями их использования.

Коэффициенты градации (отношение площади сечения данного профиля A_n к площади сечения ближайшего меньшего профиля A_{n-1} в каждом сортаменте имеют переменное значение, причем наименьшее их значение относится к наиболее широко применяемым профилям (как правило, наибольшим и наименьшим по размерам профилям). В существующих сортаментах профилей коэффициенты градации составляют 1,08–1,2.

2.3. Критерии оценки экономичности профилей

Наивыгоднейшая форма профиля определяется в зависимости от тех силовых воздействий, которым подвергается профиль в конструкции. Один из самых распространенных балочных (изгибаемых) профилей – симметричный двутавровый профиль. Поскольку изгибаемые элементы обычно закреплены настилами или другими связями, исключающими возможность потери общей устойчивости, швеллер также можно рассматривать как частный случай двутавра, имеющего одну ось симметрии. Для двутаврового профиля (рис.2.1), за исключением тонкостенного двутавра, приближенные значения расчетных характеристик (момента сопротивле-

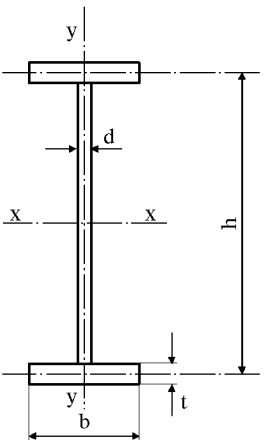


Рис.2.1. Схема симметричного двутавра

ния W, пластического момента сопротивления – $W_{\text{п}}$, момента инерции I, радиуса инерции i, сопротивления сечения срезу C_{c} относительно оси x-x) имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} W &= \frac{c^{1/2}A^{3/2}}{4}\left(2-\frac{4}{3}k\right)k^{1/2}; \\ W_{\text{п}} &= \frac{c^{1/2}A^{3/2}}{4}(2-k)k^{1/2}; \\ I &= \frac{cA^2}{12}(3-2k)k; \\ i &= \left(\frac{cA}{12}\right)^{1/2}(3-2k)^{1/2}k^{1/2}; \\ C_c &= \frac{I_s}{S} = \frac{2A}{3}\ \frac{3-2k}{2-k}; \end{aligned}\right\} \qquad (2.1)$$

где $c = h/s$ – гибкость стенки; $k = hs/A$ – удельная площадь стенки; S – статический момент полусечения.

При заданном количестве материала (A) с увеличением гибкости стенки (c) возрастают расчетные характеристики W, $W_{\text{п}}$, I, i . Предельные значения k для безреберной балки определяются либо условиями прокатки, либо условием сохранения устойчивости стенки. Значения параметра k, при которых расчетные характеристики двутавра достигают максимальной величины (при заданном A и $C = \text{const}$), приведены в таблице.

Оптимальные значения параметра k

Характеристики	k_{opt}
W	1/2
$W_{\text{п}}$	2/3
I, i	3/4
C_{c}	1

В литературных источниках приводятся различные критерии оценки экономичности изгибаемых и сжатых профилей. Наиболее приемлемыми из них считаются безразмерные удельные характеристики профилей. Удельной называется расчетная характеристика профиля, площадь поперечного сечения которого равна единице. Применительно к двутавровому профилю (рис.2.1) его удельные характеристики относительно оси x–x имеют следующие приближенные значения:

$$\left.\begin{aligned} \overline{W} &= \frac{c^{1/2}}{4}\left(2-\frac{4}{3}k\right)k^{1/2}; \\ \overline{W}_{\text{п}} &= \frac{c^{1/2}}{4}(2-k)k^{1/2}; \\ \overline{I} &= \frac{c}{12}(3-2k)k; \\ \overline{C}_c &= \frac{2-\frac{4}{3}k}{2-k}k; \\ \overline{i} &= \left(\frac{c}{12}\right)^{1/2}(3-2k)^{1/2}k^{1/2}; \end{aligned}\right\} \qquad (2.2)$$

Первые четыре характеристики изгибаемых профилей используются в зависимости от того, какая из них является определяющей. Характеристика ($\bar{i}$) относится к сжатым профилям. Чем больше значение удельной характеристики профиля, тем рациональнее в нем использован материал. Для изгибаемых профилей используется еще безразмерная характеристика $\bar{A}_w$ – удельная площадь профиля, т.е. площадь профиля, момент сопротивления которого равен единице:

$$\bar{A}_w = \frac{A}{W^{2/3}} \approx \frac{3{,}3}{(3-2k)^{2/3} c^{1/3} k^{1/3}} \ ; \tag{2.3}$$

Удельные характеристики показывают, насколько рационально использован материал в поперечном сечении профиля для получения наибольшего значения расчетной характеристики или как получить требуемую расчетную характеристику при наименьшем расходе материала.

2.4. Методика оценки экономичности

Количественную оценку экономичности одного профиля (или элемента конструкции) в сравнении с другим следует производить только при соблюдении условий сопоставимости, а именно: при одинаковых геометрических и расчетных схемах, при одинаковых силовых воздействиях и при равной несущей способности (по прочности или устойчивости) сравниваемых профилей (элементов конструкций), а также при равной жесткости, если предельная деформация является определяющим условием.

Равенство несущей способности или жесткости представлено в общем виде, выражающем условия сопоставимости

$$N = N_1 \tag{2.4}$$

Здесь N, N_1 означают допускаемые нагрузки $[q]$ или $[N]$ или определяющие характеристики W, $W_{\text{п}}$, I, $C_{\text{с}}$, $A_{\text{р}}$, WR, $A_{\text{р}}R$ (последние две характеристики относятся к случаям сопоставления профилей или конструкций из стали разных марок; $A_{\text{р}} = A_{\varphi}$ – расчетная площадь сечения при продольном изгибе; R – расчетное сопротивление).

При совпадении у сопоставляемых профилей (элементов конструкций) показателей, согласно равенству (2.4), относительная экономичность (в процентах) одного профиля (элемента конструкции) в сравнении с другим определяется по формуле

$$\Delta = \left(\frac{F}{F_1} - 1 \right) 100\ \% \ , \tag{2.5}$$

где F, F_1 – масса или стоимость элемента конструкции или единицы длины профиля, площадь поперечного сечения профиля.

Если показатели, согласно равенству (2.4), не совпадают (для профилей это наиболее распространенный случай), то определяют эквивалентные показатели сравниваемого профиля или элемента конструкции по методике эквивалентных параметров.

Искомый показатель профиля (элемента конструкции) $m_{\text{э}}$ равнопрочного профилю (элементу конструкции) A_n (рис.2.2) находится между ближайшими по значению показателя N профилями (элементами конструкции) B_m и $B_{m\text{-}1}$ сортамента B. Эквивалентный показатель $F_{m_{\text{э}}}$ профиля (элемента конструкции) $m_{\text{э}}$ равен (рис.2.2)

$$F_{m_э} = F_{m-1} + (F_m - F_{m-1})k_э \ , \qquad (2.6)$$

где $k_э$ – коэффициент эквивалентности, определяемый по формуле

$$k_э = \frac{N_n - N_{n-1}}{N_m - N_{n-1}} \qquad (2.7)$$

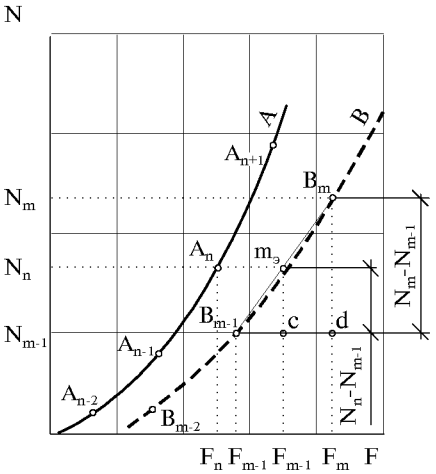


Рис.2.2. К определению эквивалентных показателей

Сопоставляемая сортаментная кривая *B* заменяется ломаной линией (рис.2.2). Участки сортаментных кривых как правило весьма пологи, поэтому точность показателей, определенных по методике эквивалентных параметров, находится в пределах 1-2 %.

2.5. Классификация профилей по способам изготовления

Основная масса профилей – сортовой и профильный прокат, бесшовные трубы, листовой прокат[1] изготовляется методом горячей прокатки. Этот вид металлопроката (за исключением труб) самый дешевый.

Гнутые, в том числе гофрированные, профили открытого типа изготовляются методом непрерывного холодного профилирования из листовой рулонной заготовки. В связи с этим стоимость гнутых профилей выше стоимости листовой стали.

Замкнутые гнутосварные профили также изготовляются из листовой рулонной заготовки методом непрерывного холодного профилирования с последующей сваркой замыкающего шва токами высокой частоты. К этому виду профилей относятся электросварные трубы круглого сечения, замкнутые гнутосварные профили (трубы) квадратного и прямоугольного сечений. Электросварные трубы, благодаря более производительному способу их изготовления, дешевле горячекатаных труб, поэтому их применение предпочтительнее. Замкнутые гнутосварные профили (трубы) квадратного и прямоугольного сечений изготовляют также холодным деформированием электросварных труб круглого сечения. Этот вид металлопродукции более дорогой.

Стальные канаты являются продукцией дополнительных переделов и относятся к металлическим изделиям. Они свиваются: из тонких проволок с пределом прочности 1200-2000 МПа.

Все перечисленные профили, применяемые в строительных стальных конструкциях, изготовляют из углеродистой и из низколегированной сталей. Листовую сталь изготовляют также из термообработанной углеродистой и низколегированной стали. Электросварные трубы выполняют также из термообработанной низколегированной стали. Ведутся работы по термоупрочнению профильной стали – двутавров, швеллеров, уголков. Электросварные трубы для получения большей стабильности механических свойств обычно подвергаются термической обработке.

Двутавры с параллельными гранями полок (широкополочные двутавры), прокатываемые на универсальных балочных станах, и уголки имеют так называемые серийные профили (профили одной номинальной высоты и ширины, но имеющие бóльшие толщины полок и стенок). Серийные профили в этих случаях образуются путем простой раздвижки валков без удорожания технологического процесса. Поэтому сортаменты двутавров и тавров с параллельными гранями полок (широкополочных двутавров и тавров, получаемых роспуском двутавров пополам) и равнополочных и неравнополочных уголков содержат много серийных профилей, благодаря чему коэффициенты градации составляют в основном 1,08–1,1. В сортаментах горячекатаных швеллеров также имеются серийные (литерные) профили, которые, однако, не нашли практического применения в строительных стальных конструкциях. Некоторые профили прокатывают повышенной и нормальной точности. В строительных конструкциях применяется чаще всего металлопрокат нормальной точности.

2.6. Общие правила использования профилей

При проектировании строительных стальных конструкций следует компоновать каждый элемент конструкции и весь объект в целом из минимально необходимого числа различных профилей. Применяемые в одном отправочном элементе уголки, тавры, полосы одного калибра (одного номинального размера), но разной толщины должны иметь разность толщин одноименных профилей не менее 2 мм. Не допускается применять в одном отправочном элементе одинаковые профилеразмеры из стали разных марок. Применение в одном объекте профилированных листов одной номинальной высоты разной толщины не допускается.

Подробные сортаменты со всеми геометрическими и справочными данными приведены :

п.2.7 – горячекатаных профилей и листового (горячекатаного и холоднокатаного) проката общего назначения (табл.2.1–2.14);

п.2.8 – гнутых и гнутосварных профилей общего назначения (табл.2.15–2.21);

п.2.9 – горячекатаных профилей специального назначения (табл.2.22–2.26);

п.2.10 – гофрированных профилей (табл.2.27–2.33);

п.2.11 – электросварных труб (табл.2.34);

п.2.12 – канатов (табл.2.35–2.41).

---

[1] Листовой прокат малой толщины изготовляется также методом холодной прокатки.

2.7. Сортаменты горячекатаных профилей и листового горячекатаного и холоднокатаного проката общего назначения

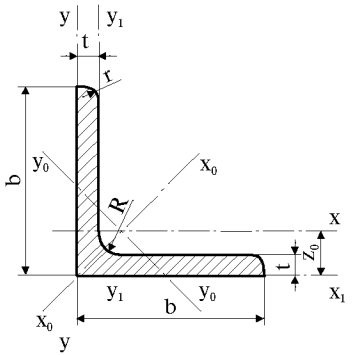


Таблица 2.1. Сортамент горячекатаных равнополочных уголков по ГОСТ 8509-93

Номер уголка	*b*, мм	*t*, мм	*R*, мм	*r*, мм	Площадь поперечного сечения, см^2	Справочные значения для осей										Масса 1м уголка, кг
						x – *x*			*x*$_0$ – *x*$_0$		*y*$_0$ – *y*$_0$			*J*$_{xy}$, см^4	*z*$_0$, см	
						J$_x$, см^4	W$_x$, см^3	*i*$_x$, см	*J*$_{x_0}$, см^4	*i*$_{x_0}$, см	*J*$_{y_0}$, см^4	W$_{y_0}$, см^3	*i*$_{y_0}$, см			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2	20	3	3,5	1,2	1,13	0,4	0,28	0,59	0,63	0,75	0,17	0,2	0,39	0,23	0,6	0,89
		4			1,46	0,5	0,37	0,58	0,78	0,73	0,22	0,24	0,38	0,28	0,64	1,15
2,5	25	3			1,43	0,81	0,46	0,75	1,29	0,95	0,34	0,33	0,49	0,47	0,73	1,12
		4			1,86	1,03	0,59	0,74	1,62	0,93	0,44	0,41	0,48	0,59	0,76	1,46
		5*			2,27	1,22	0,71	0,73	1,91	0,92	0,53	0,47	0,48	0,69	0,8	1,78
2,8	28	3	4	1,3	1,62	1,16	0,58	0,85	1,84	1,07	0,48	0,42	0,55	0,68	0,8	1,27
3	30	3	4	1,3	1,74	1,45	0,67	0,91	2,3	1,15	0,6	0,53	0,59	0,85	0,85	1,36
		4			2,27	1,84	0,87	0,9	2,92	1,13	0,77	0,61	0,58	1,08	0,89	1,78
		5*			2,78	2,2	1,06	0,89	3,47	1,12	0,94	0,71	0,58	1,27	0,93	2,18

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
3,2	32	3			1,86	1,77	0,77	0,97	2,8	1,23	0,74	0,59	0,63	1,03	0,89	1,46
		4			2,43	2,26	1,0	0,96	3,58	1,21	0,94	0,71	0,62	1,32	0,94	1,91
		3	4,5	1,5	2,04	2,35	0,93	1,07	3,72	1,35	0,97	0,71	0,69	1,37	0,97	1,60
3,5	35	4			2,67	3,01	1,21	1,06	4,76	1,33	1,25	0,88	0,68	1,75	1,01	2,1
		5			3,28	3,61	1,47	1,05	5,71	1,32	1,52	1,02	0,68	2,1	1,05	2,58
		3			2,35	3,55	1,22	1,23	5,63	1,55	1,47	0,95	0,79	2,08	1,09	1,85
4	40	4			3,08	4,58	1,6	1,22	7,26	1,53	1,9	1,19	0,78	2,68	1,13	2,42
		5			3,79	5,53	1,95	1,21	8,75	1,52	2,3	1,39	0,78	3,22	1,17	2,98
		6*	5	1,7	4,48	6,41	2,3	1,2	10,13	1,5	2,7	1,58	0,78	3,72	1,21	3,52
		3			2,65	5,13	1,56	1,39	8,13	1,75	2,12	1,24	0,89	3	1,21	2,08
4,5	45	4			3,48	6,63	2,04	1,38	10,52	1,74	2,74	1,54	0,89	3,89	1,26	2,73
		5			4,29	8,03	2,51	1,37	12,74	1,72	3,33	1,81	0,88	4,71	1,3	3,37
		6*			5,08	9,35	2,95	1,36	14,8	1,71	3,9	2,06	0,88	5,45	1,34	3,99
		3			2,96	7,11	1,94	1,55	11,27	1,95	2,95	1,57	1	4,16	1,33	2,32
		4			3,89	9,21	2,54	1,54	14,63	1,94	3,8	1,95	0,99	5,42	1,38	3,05
5	50	5	5,5	1,8	4,8	11,2	3,13	1,53	17,77	1,92	4,63	2,3	0,98	6,57	1,42	3,77
		6			5,69	13,07	3,69	1,52	20,72	1,91	5,43	2,63	0,98	7,65	1,46	4,47
		7*			6,56	14,84	4,23	1,5	23,47	1,89	6,21	2,93	0,97	8,63	1,5	5,15
		8*			7,41	16,51	4,76	1,49	26,03	1,87	6,98	3,22	0,97	9,52	1,53	5,82
5,6	56	4	6	2	4,38	13,1	3,21	1,73	20,79	2,18	5,41	2,52	1,11	7,69	1,52	3,44
		5			5,41	15,97	3,96	1,72	25,36	2,16	6,59	2,97	1,1	9,41	1,57	4,25
		4			4,72	16,21	3,7	1,85	25,69	2,33	6,72	2,93	1,19	9,48	1,62	3,71
		5			5,83	19,79	4,56	1,84	31,4	2,32	8,18	3,49	1,18	11,61	1,66	4,58
6*	60	6			6,92	23,21	5,4	1,83	36,81	2,31	9,6	3,99	1,18	13,6	1,7	5,43
		8	7	2,3	9,04	29,55	7	1,81	46,77	2,27	12,34	4,9	1,17	17,22	1,78	7,1
		10			11,08	35,32	8,52	1,79	55,64	2,24	15	5,7	1,16	20,32	1,85	8,7
		4			4,96	18,86	4,09	1,95	29,9	2,45	7,81	3,26	1,25	11	1,69	3,9
6,3	63	5			6,13	23,10	5,05	1,94	36,8	2,44	9,52	3,87	1,25	13,7	1,74	4,81
		6			7,28	27,06	5,98	1,93	42,91	2,43	11,18	4,44	1,24	15,9	1,78	5,72

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
		4,5			6,2	29,04	5,67	2,16	46,03	2,72	12,04	4,53	1,39	17	1,88	4,87
		5			6,86	31,94	6,27	2,16	50,67	2,72	13,22	4,92	1,39	18,7	1,9	5,38
7	70	6	8	2,7	8,15	37,58	7,43	2,15	59,64	2,71	15,52	5,66	1,38	22,1	1,94	6,39
		7			9,42	42,98	8,57	2,14	68,19	2,69	17,77	6,31	1,37	25,2	1,99	7,39
		8			10,67	48,16	9,68	2,12	76,35	2,68	19,97	6,99	1,37	28,2	2,02	8,37
		10*			13,11	57,9	11,82	2,1	91,52	2,64	24,27	8,17	1,36	33,6	2,1	10,29
		5			7,39	39,53	7,21	2,31	62,65	2,91	16,41	5,74	1,49	23,1	2,02	5,8
		6			8,78	46,57	8,57	2,3	73,87	2,9	19,28	6,62	1,48	27,3	2,06	6,89
7,5	75	7	9	3	10,15	53,34	9,89	2,29	84,61	2,89	22,07	7,43	1,47	31,2	2,1	7,96
		8			11,5	59,84	11,18	2,28	94,89	2,87	24,8	8,16	1,47	35	2,15	9,02
		9			12,83	66,1	12,43	2,27	104,72	2,86	27,48	8,91	1,46	38,6	2,18	10,07
		5,5			8,63	52,68	9,03	2,47	83,56	3,11	21,8	7,1	1,59	30,9	2,17	6,78
		6			9,38	56,97	9,8	2,47	90,4	3,11	23,54	7,6	1,58	33,4	2,19	7,36
8	80	7	9	3	10,85	65,31	11,32	2,45	103,6	3,09	26,97	8,55	1,58	38,3	2,23	8,51
		8			12,3	73,36	12,8	2,44	116,39	3,08	30,32	9,44	1,57	43	2,27	9,65
		10*			15,14	83,58	15,67	2,42	140,31	3,04	36,85	11,09	1,56	56,7	2,35	11,88
		12*			17,9	102,74	18,42	2,4	162,27	3,01	43,21	12,62	1,55	59,5	2,42	14,05
		6			10,61	82,10	12,49	2,78	130	3,5	33,97	9,88	1,79	48,1	2,43	8,33
		7			12,28	94,3	14,45	2,77	149,67	3,49	38,94	11,15	1,78	55,4	2,47	9,64
9	90	8	10	3,3	13,93	106,11	16,36	2,76	168,42	3,48	43,8	12,34	1,77	62,3	2,51	10,93
		9			15,6	118	18,29	2,75	186	3,46	48,6	13,48	1,77	68	2,55	12,2
		10*			17,17	128,6	20,07	2,74	203,93	3,45	53,27	14,54	1,76	75,3	2,59	13,48
		12*			20,33	149,67	23,85	2,71	235,88	3,41	62,4	16,53	1,75	86,2	2,67	15,96
		6,5			12,82	122,1	16,69	3,09	193,46	3,89	50,73	13,38	1,99	71,4	2,68	10,06
		7			13,75	130,59	17,9	3,08	207,01	3,88	54,16	14,13	1,98	76,4	2,71	10,79
		8			15,6	147,19	20,3	3,07	233,46	3,87	60,92	15,66	1,98	86,3	2,75	12,25
10	100	10			19,24	178,95	24,97	3,05	283,83	3,84	74,08	18,51	1,96	110	2,83	15,1
		12			22,8	208,9	29,47	3,03	330,95	3,81	86,84	21,1	1,95	122	2,91	17,9
		14			26,28	237,15	33,83	3	374,98	3,78	99,32	23,49	1,94	138	2,99	20,63
		15*	12	4	27,99	250,68	35,95	2,99	395,87	3,76	105,48	24,62	1,94	145	3,03	21,97
		16			29,68	263,82	38,04	2,98	416,04	3,74	111,61	25,79	1,94	152	3,06	23,3

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
11	110	7			15,15	175,61	21,83	3,4	278,54	4,29	72,68	17,36	2,19	106	2,96	11,89
		8			17,2	198,17	24,77	3,39	314,51	4,28	81,83	19,29	2,18	116	3	13,5
12*	120	8	12	4	18,8	259,75	29,68	3,72	412,45	4,68	107,04	23,29	2,39	153	3,25	14,76
		10			23,24	317,16	36,59	3,69	503,79	4,66	130,54	27,72	2,37	187	3,33	18,24
		12			27,6	371,8	43,3	3,67	590,28	4,62	153,33	31,79	2,36	218	3,41	21,67
		15			33,99	448,9	52,96	3,63	711,32	4,57	186,48	37,35	2,34	262	3,53	26,68
12,5	125	8			19,69	294,36	32,2	3,87	466,76	4,87	121,98	25,67	2,49	172	3,36	15,46
		9			22	327,48	36	3,86	520	4,86	135,88	28,26	2,48	192	3,4	17,3
		10			24,33	359,82	39,74	3,85	571,04	4,84	148,59	30,45	2,47	211	3,45	19,1
		12			28,89	422,23	47,06	3,82	670,02	4,82	174,43	34,94	2,46	248	3,53	22,68
		14			33,37	481,76	54,17	3,8	763,9	4,78	199,62	39,1	2,45	282	3,61	26,2
		16			37,77	538,56	61,09	3,78	852,84	4,75	224,29	43,1	2,44	315	3,68	29,65
14	140	9	14	4,6	24,72	465,72	45,55	4,34	739,42	5,47	192,03	35,92	2,79	274	3,78	19,41
		10			27,33	512,29	50,32	4,33	813,62	5,46	210,96	39,05	2,78	301	3,82	21,45
		12			32,49	602,49	59,66	4,31	956,98	5,43	248,01	44,97	2,76	354	3,9	25,5
15*	150	10			29,33	634,76	58,07	4,65	1008,56	5,86	260,97	45,34	2,98	374	4,07	23,02
		12			34,89	747,48	68,9	4,63	1187,86	5,83	307,09	52,32	2,97	440	4,15	27,39
		15			43,08	908,38	84,66	4,59	1442,6	5,79	374,17	61,96	2,95	534	4,27	33,82
		18			51,09	1060,08	99,86	4,56	1680,92	5,74	439,24	70,91	2,93	621	4,38	40,11
16	160	10			31,43	774,24	66,19	4,96	1229,1	6,25	319,38	52,52	3,19	455	4,3	24,67
		11			34,42	844,21	72,44	4,95	1340,06	6,24	347,77	56,53	3,18	496	4,35	27,02
		12			37,39	912,89	78,62	4,94	1450	6,23	375,78	60,53	3,17	537	4,39	29,35
		14			43,57	1046,47	90,77	4,92	1662,13	6,2	430,81	68,15	3,16	615	4,47	33,97
		16			49,07	1175,19	102,64	4,89	1865,73	6,17	484,64	75,92	3,14	690	4,55	38,52
		18	16	5,3	54,79	1290,24	114,24	4,87	2061,03	6,13	537,46	82,08	3,13	771	4,63	43,01
		20			60,4	1418,85	125,6	4,85	2248,26	6,1	589,43	90,02	3,12	830	4,7	47,44
18	180	11			38,8	1216,44	92,47	5,6	1933,1	7,06	499,78	72,86	3,59	716	4,85	30,47
		12			42,19	1316,62	100,41	5,59	2092,78	7,04	540,45	78,15	3,58	776	4,89	33,12
		15*			52,18	1607,36	123,74	5,55	2554,99	7	659,73	93,11	3,56	948	5,01	40,96
		18*			61,99	1884,07	146,36	5,51	2992,69	6,95	775,44	106,88	3,54	1108	5,13	48,66
		20*			68,43	2061,11	161,07	5,49	3271,31	6,91	850,92	115,71	3,53	1210	5,2	53,72

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
		12			47,1	1822,78	124,61	6,22	2896,16	7,84	749,4	98,68	3,99	1073	5,37	36,97
		13			50,85	1960,77	134,44	6,21	3116,18	7,83	805,35	105,07	3,98	1156	5,42	39,92
		14			54,6	2097	144,17	6,2	3333	7,81	861	111,5	3,97	1236	5,46	42,8
		16			61,98	2362,57	163,37	6,17	3755,39	7,78	969,74	123,77	3,96	1393	5,54	48,65
20	200	18*	18	6	69,3	2620,64	182,22	6,15	4164,54	7,75	1076,74	135,48	3,94	1544	5,62	54,4
		20			76,54	2871,47	200,73	6,12	4560,42	7,72	1181,92	146,62	3,93	1689	5,7	60,08
		24*			90,78	3350,66	236,77	6,08	5313,5	7,65	1387,73	167,74	3,91	1963	5,85	71,26
		25			94,29	3466,21	245,59	6,06	5494,04	7,63	1438,38	172,68	3,91	2028	5,89	74,02
		30			111,54	4019,6	288,57	6	6351,05	7,55	1698,16	193,06	3,89	2332	6,07	87,56
22	220	14	21	7	60,38	2814,36	175,18	6,83	4470,15	8,6	1158,56	138,62	4,38	1655	5,91	47,4
		16			68,58	3175,44	198,71	6,8	5045,37	8,58	1305,52	153,34	4,36	1869	6,02	53,83
		16			78,4	4717,1	258,43	7,76	7492,1	9,78	1942,09	203,45	4,98	2775	6,75	61,55
		18			87,72	5247,24	288,82	7,73	8336,69	9,75	2157,78	223,39	4,96	3089	6,83	68,86
		20			96,96	5764,87	318,76	7,71	9159,73	9,72	2370,01	242,52	4,94	3395	6,91	76,11
25	250	22	24	8	106,12	6270,32	348,26	7,69	9961,6	9,69	2579,04	260,52	4,93	3691	7	83,31
		25			119,71	7006,39	391,72	7,65	11125,52	9,64	2887,26	287,14	4,91	4119	7,11	93,97
		28			133,12	7716,86	434,25	7,61	12243,84	9,59	3189,89	311,98	4,9	4527	7,23	104,5
		30			141,96	8176,52	462,11	7,59	12964,66	9,56	3388,98	327,82	4,89	4788	7,31	111,44

* – уголки отмеченные звездочкой, изготовляют по требованию потребителя.

Примечание. При заказе уголков размером 56 – 90 мм толщиной до 9 мм; 100 – 150 мм толщиной до 12 мм; 160 – 200 мм толщиной до 12 мм необходимо указывать требование (в примечании к технической спецификации стали) о поставке уголков с предельными отклонениями по массе $^{+3}_{-5}$ % в соответствии с п.6 ГОСТ 8509-93.

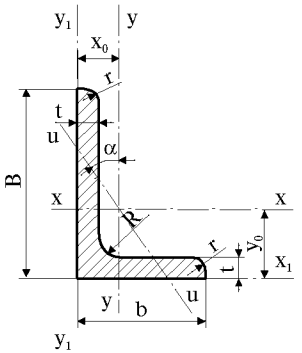


Таблица 2.2. Сортамент горячекатаных неравнополочных уголков по ГОСТ 8510-86*

Номер уголка	B мм	b мм	t мм	R мм	r мм	Площадь поперечного сечения, см^2	Справочные значения для осей									x_0, см	y_0, см	J_{xy}, см^4	Угол наклона оси, tgα	Масса 1 м уголка, кг
							$x-x$			$y-y$			$u-u$							
							J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см	J_u, см^4	W_u, см^3	i_u, см					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
2,5/1,6	25	16	3	3,5	1,2	1,16	0,7	0,43	0,78	0,22	0,19	0,44	0,13	0,16	0,34	0,42	0,86	0,22	0,392	0,91
3/2*	30	20	3			1,43	1,27	0,62	0,94	0,45	0,3	0,56	0,26	0,25	0,43	0,51	1	0,43	0,427	1,12
			4			1,86	1,61	0,82	0,93	0,56	0,39	0,55	0,34	0,32	0,43	0,54	1,04	0,54	0,421	1,46
3,2/2	32	20	3			1,49	1,52	0,72	1,01	0,46	0,3	0,55	0,28	0,25	0,43	0,49	1,08	0,47	0,382	1,17
			4			1,94	1,93	0,93	1	0,57	0,39	0,54	0,35	0,33	0,43	0,53	1,12	0,59	0,374	1,52
4/2,5	40	25	3	4	1,3	1,89	3,06	1,14	1,27	0,93	0,49	0,7	0,56	0,41	0,54	0,59	1,32	0,96	0,385	1,48
			4			2,47	3,93	1,49	1,26	1,18	0,63	0,69	0,71	0,52	0,54	0,63	1,37	1,22	0,381	1,94
			5			3,03	4,73	1,82	1,25	1,41	0,77	0,68	0,86	0,64	0,53	0,66	1,41	1,44	0,374	2,37
4/3*	40	30	4			2,67	4,18	1,54	1,25	2,01	0,91	0,87	1,09	0,75	0,64	0,78	1,28	1,68	0,544	2,26
			5			3,28	5,04	1,88	1,24	2,41	1,11	0,86	1,33	0,91	0,64	0,82	1,32	2	0,539	2,46
4,5/2,8	45	28	3	5	1,7	2,14	4,41	1,45	1,48	1,32	0,61	0,79	0,79	0,52	0,61	0,64	1,47	1,38	0,382	1,68
			4			2,8	5,68	1,9	1,42	1,69	0,8	0,78	1,02	0,67	0,6	0,68	1,51	1,77	0,379	2,2
5/3,2	50	32	3	5,5	1,8	2,42	6,18	1,82	1,6	1,99	0,81	0,91	1,18	0,68	0,7	0,72	1,6	2,01	0,403	1,9
			4*			3,17	7,98	2,38	1,59	2,56	1,05	0,9	1,52	0,88	0,69	0,76	1,65	2,59	0,401	2,4

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
5,6/3,6	56	36	4	6	2	3,58	11,37	3,01	1,78	3,7	1,34	1,02	2,19	1,13	0,78	0,84	1,82	3,74	0,406	2,81
			5			4,41	13,82	3,7	1,77	4,48	1,65	1,01	2,65	1,37	0,78	0,88	1,87	4,5	0,404	3,46
6,3/4	63	40	4	7	2,3	4,04	16,33	3,83	2,01	5,16	1,67	1,13	3,07	1,41	0,87	0,91	2,03	5,25	0,397	3,17
			5			4,98	19,91	4,72	2	6,26	2,05	1,12	3,73	1,72	0,86	0,95	2,08	6,41	0,396	3,91
			6			5,9	23,31	5,58	1,99	7,29	2,42	1,11	4,36	2,02	0,86	0,99	2,12	7,44	0,393	4,63
			8			7,68	29,6	7,22	1,96	9,15	3,12	1,09	5,58	2,6	0,85	1,07	2,2	9,27	0,386	6,03
6,5/5*	65	50	5	6	2	5,56	23,41	5,2	2,05	12,08	3,23	1,47	6,41	2,68	1,07	1,26	2	9,77	0,576	4,36
			6			6,6	27,46	6,16	2,04	14,12	3,82	1,46	7,52	3,15	1,07	1,3	2,04	11,46	0,575	5,18
			7			7,62	31,32	7,08	2,03	16,05	4,38	1,45	8,6	3,59	1,06	1,34	2,08	12,94	0,571	5,98
			8			8,62	35	7,99	2,02	18,88	4,93	1,44	9,65	4,02	1,06	1,37	2,12	13,61	0,57	6,77
7/4,5	70	45	5	7,5	2,5	5,59	27,76	5,88	2,23	9,05	2,62	1,27	5,34	2,2	0,98	1,05	2,28	9,12	0,406	4,39
7,5/5	75	50	5*	8	2,7	6,11	34,81	6,81	2,39	12,47	3,25	1,43	7,24	2,73	1,09	1,17	2,39	12	0,436	4,79
			6			7,25	40,92	8,08	2,38	14,6	3,85	1,42	8,48	3,21	1,08	1,21	2,44	14,1	0,435	5,69
			7*			8,37	46,77	9,31	2,36	16,61	4,43	1,41	9,69	3,69	1,08	1,25	2,48	16,18	0,435	6,57
			8			9,47	52,38	10,52	2,35	18,52	4,88	1,4	10,87	4,14	1,07	1,29	2,52	17,8	0,43	7,43
8/5	80	50	5			6,36	41,64	7,71	2,56	12,68	3,28	1,41	7,57	2,75	1	1,13	2,6	13,2	0,387	4,49
			6			7,55	48,98	9,15	2,55	14,85	3,88	1,4	8,88	3,24	1,08	1,17	2,65	15,5	0,386	5,92
8/6*	80	60	6			8,15	52,06	9,42	2,53	25,18	5,58	1,76	13,61	4,66	1,29	1,49	2,47	20,98	0,547	6,39
			7			9,42	59,61	10,87	2,52	28,74	6,43	1,75	15,58	5,34	1,29	1,53	2,52	24,01	0,546	7,39
			8			10,67	66,88	12,38	2,5	32,15	7,26	1,74	17,49	5,99	1,28	1,57	2,56	26,83	0,544	8,37
9/5,6	90	56	5,5	9	3	7,86	65,28	10,74	2,88	19,67	4,53	1,58	11,77	3,81	1,22	1,26	2,92	20,54	0,384	6,17
			6			8,54	70,58	11,66	2,88	21,22	4,91	1,58	12,7	4,12	1,22	1,28	2,95	22,23	0,384	6,7
			8			11,18	90,87	15,24	2,85	27,08	6,39	1,56	16,29	5,32	1,21	1,36	3,04	28,33	0,38	8,77
10/6,3	100	63	6	10	3,3	9,58	98,29	14,52	3,2	30,58	6,27	1,79	18,2	5,27	1,38	1,42	3,23	31,5	0,393	7,53
			7			11,09	112,86	16,78	3,19	34,99	7,23	1,78	20,83	6,06	1,37	1,46	3,28	36,1	0,392	8,7
			8			12,57	126,96	19,01	3,18	39,21	8,17	1,77	23,38	6,82	1,36	1,5	3,32	40,5	0,391	9,87
			10			15,47	153,95	23,32	3,15	47,18	9,99	1,75	28,34	8,31	1,35	1,58	3,4	48,6	0,387	12,14

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
			7			11,23	114,05	16,87	3,19	38,32	7,7	1,85	22,77	6,43	1,41	1,52	3,24	38	0,415	8,81
10/6,5*	100	65	8			12,73	128,31	19,11	3,18	42,96	8,7	1,84	25,24	7,26	1,41	1,56	3,28	42,64	0,414	9,99
			10	10	3,3	15,67	155,52	23,45	3,15	51,68	10,64	1,82	30,6	8,83	1,4	1,64	3,37	51,18	0,41	12,3
11/7	110	70	6,5			11,45	142,42	19,11	3,53	45,61	8,42	2	26,94	7,05	1,53	1,58	3,55	46,8	0,402	8,98
			8			13,93	171,54	23,22	3,51	54,64	10,2	1,98	32,31	8,5	1,52	1,64	3,61	55,9	0,4	10,93
			7			14,06	226,53	26,67	4,01	73,73	11,89	2,29	43,4	9,96	1,76	1,8	4,01	74,7	0,407	11,04
12,5/8	125	80	8	11	3,7	15,98	255,62	30,26	4	80,95	13,47	2,28	48,82	11,25	1,75	1,84	4,05	84,1	0,406	12,58
			10			19,7	311,61	37,27	3,98	100,47	16,52	2,26	59,33	13,74	1,74	1,92	4,14	102	0,404	15,47
			12			23,36	364,79	44,07	3,95	116,84	19,46	2,24	69,47	16,11	1,72	2	4,22	118	0,4	18,34
14/9	140	90	8	12	4	18	363,68	38,25	4,49	119,79	17,19	2,58	70,27	14,39	1,58	2,03	4,49	121	0,411	14,13
			10			22,24	444,45	47,19	4,47	145,54	21,14	2,58	85,51	17,58	1,96	2,12	4,58	147	0,409	17,46
			9			22,87	605,97	56,04	5,15	186,03	23,96	2,85	110,4	20,01	2,2	2,24	5,19	194	0,391	17,96
16/10	160	100	10	13	4,3	25,28	666,59	61,91	5,13	204,09	26,42	2,84	121,16	22,02	2,19	2,28	5,23	213	0,39	19,85
			12			30,04	784,22	73,42	5,11	238,75	31,23	2,82	142,14	25,93	2,18	2,36	5,32	249	0,388	23,58
			14			34,72	897,19	84,65	5,08	271,6	35,89	2,8	162,49	29,75	2,16	2,43	5,4	282	0,385	27,26
18/11	180	110	10			28,33	952,28	78,59	5,8	276,37	32,27	3,12	165,44	26,96	2,42	2,44	5,88	295	0,376	22,2
			12			33,69	1122,56	93,33	5,77	324,09	38,2	3,1	194,28	31,83	2,4	2,52	5,97	348	0,374	26,4
			11			34,87	1449,02	107,31	6,45	446,36	45,98	3,58	263,84	38,27	2,75	2,79	6,5	465	0,392	27,37
20/12,5	200	125	12	14	4,7	37,89	1568,19	116,51	6,43	481,93	49,85	3,57	285,04	41,45	2,74	2,83	6,54	503	0,392	29,74
			14			43,87	1800,83	134,64	6,41	550,77	57,43	3,54	326,54	47,57	2,73	2,91	6,62	575	0,39	34,43
			16			49,77	2026,08	152,41	6,38	616,66	64,83	3,52	366,99	53,66	2,72	2,99	6,71	643	0,388	39,07

* Уголки, отмеченные звездочкой, изготовляют по требованию потребителя.

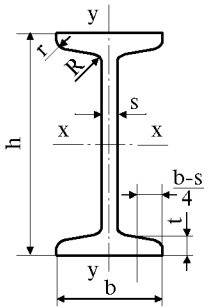


Таблица 2.3. Сортамент горячекатаных двутавров
(с уклоном внутренних граней полок 6–12 %) по ГОСТ 8239-89

Номер двутавра	h	b	s	t	R	r	Площадь поперечного сечения, см^2	Масса 1 м, кг	Справочные значения для осей						
					не более				$x-x$				$y-y$		
	мм								J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	S_x, см^3	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см
10	100	55	4,5	7,2	7	2,5	12	9,46	198	39,7	4,06	23	17,9	6,49	1,22
12	120	64	4,8	7,3	7,5	3	14,7	11,5	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38
14	140	73	4,9	7,5	8	3	17,4	13,7	572	81,7	5,73	46,8	41,9	11,5	1,55
16	160	81	5	7,8	8,5	3,5	20,2	15,9	873	109	6,57	62,3	58,6	14,5	1,7
18	180	90	5,1	8,1	9	3,5	23,4	18,4	1290	143	7,42	81,4	82,6	18,4	1,88
20	200	100	5,2	8,4	9,5	4	26,8	21	1840	184	8,28	104	115	23,1	2,07
22	220	110	5,4	8,7	10	4	30,6	24	2550	232	9,13	131	157	28,6	2,27
24	240	115	5,6	9,5	10,5	4	34,8	27,3	3460	289	9,97	163	198	34,5	2,37
27	270	125	6	9,8	11	4,5	40,2	31,5	5010	371	11,2	210	260	41,5	2,54
30	300	135	6,5	10,2	12	5	46,5	36,5	7080	472	12,3	268	337	49,9	2,69
33	330	140	7	11,2	13	5	53,8	42,2	9840	597	13,5	339	419	59,9	2,79
36	360	145	7,5	12,3	14	6	61,9	48,6	13380	743	14,7	423	516	71,1	2,89
40	400	155	8,3	13	15	6	72,6	57	19062	953	16,2	545	667	86,1	3,03
45	450	160	9	14,2	16	7	84,7	66,5	27696	1231	18,1	708	808	101	3,09
50	500	170	10	15,2	17	7	100	78,5	39727	1589	19,9	919	1043	123	3,23
55	550	180	11	16,5	18	7	118	92,6	55962	2035	21,8	1181	1356	151	3,39
60	600	190	12	17,8	20	8	138	108	76806	2560	23,6	1491	1725	182	3,54

Примечание. Двутавры №№ 24–60 не рекомендуется применять в новых разработках.

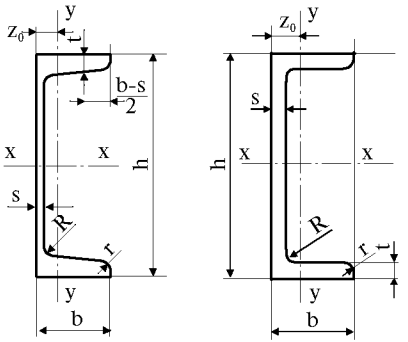


Таблица 2.4. Сортамент горячекатаных швеллеров по ГОСТ 8240-89

Номер швеллера	h	b	s	t	R	r	Площадь сечения, см^2	Масса 1 м, кг	Справочные значения для осей							z_0, см
									$x - x$				$y - y$			
	мм								J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	S_x, см^3	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Швеллеры с уклоном внутренних граней полок																
5	50	32	4,4	7	6	2,5	6,16	4,84	22,8	9,1	1,92	5,59	5,61	2,75	0,954	1,16
6,5	65	36	4,4	7,2	6	2,5	7,51	5,9	48,6	15	2,54	9	8,7	3,68	1,08	1,24
8	80	40	4,5	7,4	6,5	2,5	8,98	7,05	89,4	22,4	3,16	13,3	12,8	4,75	1,19	1,31
10	100	46	4,5	7,6	7	3	10,9	8,59	174	34,8	3,99	20,4	20,4	6,46	1,37	1,44
12	120	52	4,8	7,8	7,5	3	13,3	10,4	304	50,6	4,78	29,6	31,2	8,52	1,53	1,54
14	140	58	4,9	8,1	8	3	15,6	12,3	491	70,2	5,6	40,8	45,4	11	1,7	1,67
16	160	64	5	8,4	8,5	3,5	18,1	14,2	747	93,4	6,42	54,1	63,3	13,8	1,87	1,8
16а	160	68	5	9	8,5	3,5	19,5	15,3	823	103	6,49	59,4	78,8	16,4	2,01	2
18	180	70	5,1	8,7	9	3,5	20,7	16,3	1090	121	7,24	69,8	86	17	2,04	1,94
18а	180	74	5,1	9,3	9	3,5	22,2	17,4	1190	132	7,32	76,1	105	20	2,18	2,13
20	200	76	5,2	9	9,5	4	23,4	18,4	1520	152	8,07	87,8	113	20,5	2,2	2,07
22	220	82	5,4	9,5	10	4	26,7	21	2110	192	8,89	110	151	25,1	2,37	2,21

Продолжение табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
24	240	90	5,6	10	10,5	4	30,6	24	2900	242	9,73	139	208	31,6	2,6	2,42
27	270	95	6	10,5	11	4,5	35,2	27,7	4160	308	10,9	178	262	37,3	2,73	2,47
30	300	100	6,5	11	12	5	40,5	31,8	5810	387	12	224	327	43,6	2,84	2,52
33	330	105	7	11,7	13	5	46,5	36,5	7980	484	13,1	281	410	51,8	2,97	2,59
36	360	110	7,5	12,6	14	6	53,4	41,9	10820	601	14,2	350	513	61,7	3,1	2,68
40	400	115	8	13,5	15	6	61,5	48,3	15220	761	15,7	444	642	73,4	3,23	2,75
Швеллеры с параллельными гранями полок																
5-П	50	32	4,4	7	6	3,5	6,16	4,84	22,8	9,14	1,92	5,61	5,95	2,99	0,983	1,21
6,5-П	65	36	4,4	7,2	6	3,5	7,51	5,9	48,8	15	2,55	9,02	9,35	4,06	1,12	1,29
8-П	80	40	4,5	7,4	6,5	3,5	8,98	7,05	89,8	22,5	3,16	13,3	13,9	5,31	1,24	1,38
10-П	100	46	4,5	7,6	7	4	10,9	8,59	175	34,9	3,99	20,5	22,6	7,37	1,44	1,53
12-П	120	52	4,8	7,8	7,5	4,5	13,3	10,4	305	50,8	4,79	29,7	34,9	9,84	1,62	1,66
14-П	140	58	4,9	8,1	8	4,5	15,6	12,3	493	70,4	5,61	40,9	51,5	12,9	1,81	1,82
16-П	160	64	5	8,4	8,5	5	18,1	14,2	750	93,8	6,44	54,3	72,8	16,4	2	1,97
16а-П	160	68	5	9	8,5	5	19,5	15,3	827	103	6,51	59,5	90,5	19,6	2,15	2,19
18-П	180	70	5,1	8,7	9	5	20,7	16,3	1090	121	7,26	70	100	20,6	2,2	2,14
18а-П	180	74	5,1	9,3	9	5	22,2	17,4	1200	133	7,34	76,3	123	24,3	2,35	2,36
20-П	200	76	5,2	9	9,5	5,5	23,4	18,4	1530	153	8,08	88	134	25,2	2,39	2,3
22-П	220	82	5,4	9,5	10	6	26,7	21	2120	193	8,9	111	178	31	2,58	2,47
24-П	240	90	5,6	10	10,5	6	30,6	24	2910	243	9,75	139	248	39,5	2,85	2,72
27-П	270	95	6	10,5	11	6,5	35,2	27,7	4180	310	10,9	178	314	46,7	2,99	2,78
30-П	300	100	6,5	11	12	7	40,5	31,8	5830	389	12	224	393	54,8	3,12	2,83
33-П	330	105	7	11,7	13	7,5	46,5	36,5	8010	486	13,1	281	491	64,6	3,25	2,9
36-П	360	110	7,5	12,6	14	8,5	53,4	41,9	10850	603	14,3	350	611	76,3	3,38	2,99
40-П	400	115	8	13,5	15	9	61,5	48,3	15260	763	15,8	445	760	89,9	3,51	3,05

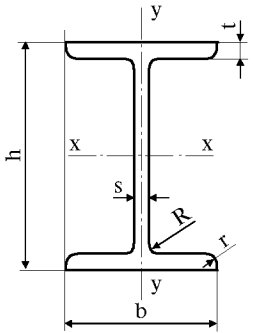


Таблица 2.5. Сортамент горячекатаных двутавров с параллельными гранями полок по ГОСТ 26020-83

Номер профиля	h	b	s	t	R	Площадь сечения, см^2	Линейная плотность, кг/м	Справочные значения для осей						
	мм							$x-x$				$y-y$		
								J_x, см^4	W_x, см^3	S_x, см^3	i_x, см	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Нормальные двутавры (Б)														
10Б1	100	55	4,1	5,7	7	10,32	8,1	171	34,2	19,7	4,07	15,9	5,8	1,24
12Б1	117,6	64	3,8	5,1	7	11,3	8,7	257	43,8	24,9	4,83	22,4	7	1,42
12Б2	120	64	4,4	6,3	7	13,21	10,4	318	53	30,4	4,9	27,7	8,6	1,45
14Б1	137,4	73	3,8	5,6	7	13,39	10,5	435	63,3	35,8	5,7	36,4	10	1,65
14Б2	140	73	4,7	6,9	7	16,43	12,9	541	77,3	44,2	5,74	44,9	12,3	1,65
16Б1	157	82	4	5,9	9	16,18	12,7	689	87,8	49,5	6,53	54,4	13,3	1,83
16Б2	160	82	5	7,4	9	20,09	15,8	869	108,7	61,9	6,58	68,3	16,6	1,84
18Б1	177	91	4,3	6,5	9	19,58	15,4	1063	120,1	67,7	7,37	81,9	18	2,04
18Б2	180	91	5,3	8	9	23,95	18,8	1317	146,3	83,2	7,41	100,8	22,2	2,05
20Б1	200	100	5,6	8,5	12	28,49	22,4	1943	194,3	110,3	8,26	142,3	28,5	2,23
23Б1	230	110	5,6	9	12	32,91	25,8	2996	260,5	147,2	9,54	200,3	36,4	2,47
26Б1	258	120	5,8	8,5	12	35,62	28	4024	312	176,6	10,63	245,6	40,9	2,63
26Б2	261	120	6	10	12	39,7	31,2	4654	356,6	201,5	10,83	288,8	48,1	2,7

Продолжение табл.2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30Б1	296	140	5,8	8,5	15	41,92	32,9	6328	427	240	12,29	390	55,7	3,05
30Б2	299	140	6	10	15	46,67	36,6	7293	487,8	273,8	12,5	458,6	65,5	3,13
35Б1	346	155	6,2	8,5	18	49,53	38,9	10060	581,7	328,6	14,25	529,6	68,3	3,27
35Б2	349	155	6,5	10	18	55,17	43,3	11550	662,2	373	14,47	622,9	80,4	3,36
40Б1	392	165	7	9,5	21	61,25	48,1	15750	803,6	456	16,03	714,9	86,7	3,42
40Б2	396	165	7,5	11,5	21	69,72	54,7	18530	935,7	529,7	16,3	865	104,8	3,52
45Б1	443	180	7,8	11	21	76,23	59,8	24940	1125,8	639,5	18,09	1073,7	119,3	3,75
45Б2	447	180	8,4	13	21	85,96	67,5	28870	1291,9	732,9	18,32	1269	141	3,84
50Б1	492	200	8,8	12	21	92,98	73	37160	1511	860,4	19,99	1606	160,6	4,16
50Б2	496	200	9,2	14	21	102,8	80,7	42390	1709	970,2	20,3	1873	187,3	4,27
55Б1	543	220	9,5	13,5	24	113,37	89	55680	2051	1165	22,16	2404	218,6	4,61
55Б2	547	220	10	15,5	24	124,75	97,9	62790	2296	1302	22,43	2760	250,9	4,7
60Б1	593	230	10,5	15,5	24	135,26	106,2	78760	2656	1512	24,13	3154	274,3	4,83
60Б2	597	230	11	17,5	24	147,3	115,6	87640	2936	1669	24,39	3561	309,6	4,92
70Б1	691	260	12	15,5	24	164,7	129,3	125930	3645	2095	27,65	4556	350,5	5,26
70Б2	697	260	12,5	18,5	24	183,6	144,2	145912	4187	2393	28,19	5437	418,2	5,44
80Б1	791	280	13,5	17	26	203,2	159,5	199500	5044	2917	31,33	6244	446	5,54
80Б2	798	280	14	20,5	26	226,6	177,9	232200	5820	3343	32,01	7527	537,6	5,76
90Б1	893	300	15	18,5	30	247,1	194	304400	6817	3964	35,09	8365	557,6	5,82
90Б2	900	300	15,5	22	30	272,4	213,8	349200	7760	4480	35,8	9943	662,8	6,04
100Б1	990	320	16	21	30	293,82	230,6	446000	9011	5234	38,96	11520	719,9	6,26
100Б2	998	320	17	25	30	328,9	258,2	516400	10350	5980	39,62	13710	856,9	6,46
100Б3	1006	320	18	29	30	364	285,7	587700	11680	6736	40,18	15900	993,9	6,61
100Б4	1013	320	19,5	32,5	30	400,6	314,5	655400	12940	7470	40,45	17830	1114,3	6,67
Широкополочные двутавры (Ш)														
20Ш1	193	150	6	9	13	38,95	30,6	2660	275	153	8,26	507	67,6	3,61
23Ш1	226	155	6,5	10	14	46,08	36,2	4260	377	210	9,62	622	80,2	3,67

Продолжение табл.2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26Ш1	251	180	7	10	16	54,37	42,7	6225	496	276	10,7	974	108,2	4,23
26Ш2	255	180	7,5	12	16	62,73	49,2	7429	583	325	10,88	1168	129,8	4,31
30Ш1	291	200	8	11	18	68,31	53,6	10400	715	398	12,34	1470	147	4,64
30Ш2	295	200	8,5	13	18	77,65	61	12200	827	462	12,53	1737	173,7	4,73
30Ш3	299	200	9	15	18	87	68,3	14040	939	526	12,7	2004	200,4	4,8
35Ш1	338	250	9,5	12,5	20	95,67	75,1	19790	1171	651	14,38	3260	261	5,84
35Ш2	341	250	10	14	20	104,74	82,2	22070	1295	721	14,52	3650	292	5,9
35Ш3	345	250	10,5	16	20	116,3	91,3	25140	1458	813	14,7	4170	334	5,99
40Ш1	388	300	9,5	14	22	122,4	96,1	34360	1771	976	16,76	6306	420	7,18
40Ш2	392	300	11,5	16	22	141,6	111,1	39700	2025	1125	16,75	7209	481	7,14
40Ш3	396	300	12,5	18	22	157,2	123,4	44740	2260	1259	16,87	8111	541	7,18
50Ш1	484	300	11	15	26	145,7	114,4	60930	2518	1403	20,45	6762	451	6,81
50Ш2	489	300	14,5	17,5	26	176,6	138,7	72530	2967	1676	20,26	7900	526	6,69
50Ш3	495	300	15,5	20,5	26	199,2	156,4	84200	3402	1923	20,56	9250	617	6,81
50Ш4	501	300	16,5	23,5	26	221,7	174,1	96150	3838	2173	20,82	10600	707	6,92
60Ш1	580	320	12	17	28	181,1	142,1	107300	3701	2068	24,35	9302	581	7,17
60Ш2	587	320	16	20,5	28	225,3	176,9	131800	4490	2544	24,19	11230	702	7,06
60Ш3	595	320	18	24,5	28	261,8	205,5	156900	5273	2997	24,48	13420	839	7,16
60Ш4	603	320	20	28,5	28	298,34	234,2	182500	6055	3455	24,73	15620	976	7,23
70Ш1	683	320	13,5	19	30	216,4	169,9	172000	5036	2843	28,19	10400	650	6,93
70Ш2	691	320	15	23	30	251,7	197,6	205500	5949	3360	28,58	12590	787	7,07
70Ш3	700	320	18	27,5	30	299,8	235,4	247100	7059	4017	28,72	15070	942	7,09
70Ш4	708	320	20,5	31,5	30	341,6	268,1	284400	8033	4598	28,85	17270	1079	7,11
70Ш5	718	320	23	36,5	30	389,7	305,9	330600	9210	5298	29,13	20020	1251	7,17
Колонные двутавры (К)														
20К1	195	200	6,5	10	13	52,82	41,5	3820	392	216	8,5	1334	133	5,03
20К2	198	200	7	11,5	13	59,7	46,9	4422	447	247	8,61	1534	153	5,07

Продолжение табл.2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
23К1	227	240	7	10,5	14	66,51	52,2	6589	580	318	9,95	2421	202	6,03
23К2	230	240	8	12	14	75,77	59,5	7601	661	365	10,02	2766	231	6,04
26К1	255	260	8	12	16	83,08	65,2	10300	809	445	11,14	3517	271	6,51
26К2	258	260	9	13,5	16	93,19	73,2	11700	907	501	11,21	3957	304	6,52
26К3	262	260	10	15,5	16	105,9	83,1	13560	1035	576	11,32	4544	349	6,55
30К1	296	300	9	13,5	18	108	84,8	18110	1223	672	12,95	6079	405	7,5
30К2	300	300	10	15,5	18	122,7	96,3	20930	1395	771	13,06	6980	465	7,54
30К3	340	300	11,5	17,5	18	138,72	108,9	23910	1573	874	13,12	7881	525	7,54
35К1	343	350	10	15	20	139,7	109,7	31610	1843	1010	15,04	10720	613	8,76
35К2	348	350	11	17,5	20	160,4	125,9	37090	2132	1173	15,21	12510	715	8,83
35К3	353	350	13	20	20	184,1	144,5	42970	2435	1351	15,28	14300	817	8,81
40К1	393	400	11	16,5	22	175,8	138	52400	2664	1457	17,26	17610	880	10
40К2	400	400	13	20	22	210,96	165,6	64140	3207	1767	17,44	21350	1067	10,06
40К3	409	400	16	24,5	22	257,8	202,3	80040	3914	2180	17,62	26150	1307	10,07
40К4	419	400	19	29,5	22	308,6	242,2	98340	4694	2642	17,85	31500	1575	10,1
40К5	431	400	23	35,5	22	371	291,2	121570	5642	3217	18,1	37910	1896	10,11
Двутавры дополнительной серии (Д)														
24ДБ1	239	115	5,5	9,3	15	35,45	27,8	3535	295,8	166,6	9,99	236,8	41,2	2,58
27ДБ1	269	125	6	9,5	15	40,68	31,9	5068	376,8	212,7	11,16	310,5	49,7	2,76
36ДБ1	360	145	7,2	12,3	18	62,6	49,1	13800	766,4	434,1	14,84	627,6	86,6	3,17
35ДБ1*	349	127	5,8	8,5	15	42,78	33,6	8540	489,4	279,4	14,13	291,5	45,9	2,61
40ДБ1*	399	139	6,2	9	15	50,53	39,7	13050	654,2	374,5	16,06	404,4	58,2	2,83
45ДБ1*	450	152	7,4	11	15	67,05	52,6	21810	969,2	556,8	18,04	646,2	85	3,1
45ДБ2*	450	180	7,6	13,3	18	82,8	65	28840	1280	722	18,7	1300	144	3,96
30ДШ1	300,6	201,9	9,4	16	18	92,6	72,7	15090	1000	563	12,8	2200	218	4,87
40ДШ1	397,6	302	11,5	18,7	22	159	124	46330	2330	1290	17,1	8590	569	7,36
50ДШ1	496,2	303,8	14,2	21	26	198	155	86010	3470	1950	20,8	9830	647	7,05

* Эти профили наиболее экономичны в сравнении с равнопрочными (W_x) нормальными двутаврами Б.

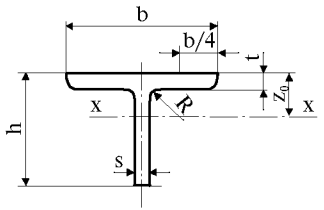


Таблица 2.6. Сортамент тавров с параллельными гранями полки по ТУ 14-2-685-86, получаемых продольной разрезкой пополам горячекатаных двутавров с параллельными гранями полок (ГОСТ 26020-83)

Номер профиля	h	b	s	t	R	Площадь попереч-ного сечения	Масса 1 м, кг	Справочные значения для осей							z_0, см
	мм							$x - x$				$y - y$			
								J_x, см^4	W_x^{min}, см^3	W_x^{max}, см^3	i_x, см	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Нормальные тавры (БТ)															
10БТ1	96,5	100	5,6	8,5	12	14,05	11	106	14,1	49,2	2,74	71,2	14,2	2,25	2,15
11,5БТ1	111,5	110	5,6	9	12	16,26	12,8	165	18,9	67,4	3,19	100	18,2	2,48	2,45
13БТ1	125,5	120	5,8	8,5	12	17,6	13,8	240	24,8	83,8	3,7	123	20,5	2,64	2,87
13БТ2	127	120	6	10	12	19,64	15,4	261	26,4	93,5	3,65	144	24,1	2,71	2,79
15БТ1	144,5	140	5,8	8,5	15	20,75	16,3	374	33,3	117	4,25	195	27,9	3,07	3,21
15БТ2	146	140	6	10	15	23,13	18,2	405	35,2	130	4,18	229	32,8	3,15	3,11
17,5БТ1	169,5	155	6,2	8,5	18	24,55	19,3	635	48,7	162	5,09	265	34,2	3,29	3,92
17,5БТ2	171	155	6,5	10	18	27,36	21,5	693	52,2	181	5,03	311	40,2	3,37	3,82
20БТ1	192,5	165	7	9,5	21	30,38	23,8	1030	70,4	225	5,83	358	43,4	3,43	4,59
20БТ2	194,5	165	7,5	11,5	21	34,59	27,2	1160	77,2	257	5,78	433	52,5	3,54	4,49
22,5БТ1	218	180	7,8	11	21	37,84	29,7	1660	100	317	6,63	537	59,7	3,77	5,25
22,5БТ2	220	180	8,4	13	21	42,68	33,5	1860	110	358	6,59	635	70,5	3,86	5,18
25БТ1	242,5	200	8,8	12	21	46,18	36,2	2550	140	428	7,44	803	80,3	4,17	5,97
25БТ2	244,5	200	9,2	14	21	51,1	40,1	2780	149	478	7,37	937	93,7	4,28	5,82
27,5БТ1	268	220	9,5	13,5	24	56,35	44,2	3750	185	580	8,17	1200	109	4,62	6,48
27,5БТ2	270	220	10	15,5	24	62,02	48,7	4060	198	641	8,11	1380	126	4,72	6,37

Продолжение табл.2.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
30БТ1	293	230	10	15,5	24	67,26	52,8	5390	243	751	8,95	1580	137	4,84	7,17
30БТ2	295	230	11	17,5	24	73,25	57,5	5810	259	821	8,9	1780	155	4,93	7,07
35БТ1	342	260	12	15,5	24	81,95	64,3	9420	374	1048	10,7	2280	175	5,27	8,99
35БТ2	345	260	12,5	18,5	24	91,38	71,7	10310	399	1190	10,6	2720	209	5,45	8,87
40БТ1	392	280	13,5	17	26	101,12	79,4	15580	547	1460	12,4	3120	223	5,56	10,7
40БТ2	395,5	280	14	20,5	26	112,8	88,5	17070	583	1660	12,3	3760	269	5,78	10,3
45БТ1	443	300	15	18,5	30	123,04	96,6	24520	770	1970	14,1	4180	279	5,83	12,4
45БТ2	446,5	300	15,5	22	30	135,66	106,5	26660	816	2230	14	4970	331	6,05	12
50БТ1	491,5	320	16	21	30	146,34	114,9	35830	1010	2610	15,6	5760	360	6,27	13,7
50БТ2	495,5	320	17	25	30	163,85	128,6	39760	1100	2970	15,6	6860	428,5	6,47	13,4
50БТ3	499,5	320	18	29	30	181,35	142,3	43670	1190	3320	15,5	7950	497	6,62	13,2
50БТ4	503	320	19,5	32,5	30	199,61	156,7	48190	1300	3640	15,5	8910	557	6,68	13,2
Широкополочные тавры (ШТ)															
10ТШТ1	93	150	6	9	13	19,27	15,1	110	14,5	65	2,39	254	33,8	3,63	1,69
11,5ШТ1	109,5	155	6,5	10	14	22,81	17,9	192	21,7	92,2	2,9	311	40,1	3,69	2,08
13ШТ1	122	180	7	10	16	26,94	21,15	288	29,1	125	3,27	487	54,1	4,25	2,3
13ШТ2	124	180	7,5	12	16	31,1	24,4	324	32,1	140	3,23	584	64,9	4,33	2,31
15ШТ1	142	200	8	11	18	33,97	26,6	512	44,9	184	3,89	735	73,5	4,66	2,79
15ШТ2	144	200	8,5	13	18	38,53	30,2	569	48,9	205	3,84	868	86,8	4,75	2,77
15ШТ3	146	200	9	15	18	43,18	33,9	627	53	225	3,81	1000	100	4,82	2,78
17,5ШТ1	165,5	250	9,5	12,5	20	47,5	37,3	971	72,7	304	4,52	630	130	5,86	3,2
17,5ШТ2	167	250	10	14	20	52,02	40,8	1050	77,7	329	4,49	1830	146	5,92	3,19
17,5ШТ3	169	250	10,5	16	20	57,78	45,4	1140	83,3	359	4,45	2090	167	6,01	3,19
20ШТ1	190,5	300	9,5	14	22	60,84	47,8	1530	97,8	456	5,02	3150	210	7,2	3,37
20ШТ2	192,5	300	11,5	16	22	70,37	55,2	1860	119	516	5,15	3610	240	7,16	3,61
20ШТ3	194,5	300	12,5	18	22	78,14	61,3	2070	131	563	5,15	4060	270	7,2	3,68
25ШТ1	238,5	300	11	15	26	72,49	56,9	3320	175	684	6,76	3380	225	6,83	4,85
25ШТ2	241	300	14,5	17,5	26	87,81	68,9	4300	230	801	7	3950	263	6,71	5,37
25ШТ3	244	300	15,5	20,5	26	99,04	77,7	4780	251	896	6,95	4630	308	6,83	5,34
25ШТ4	247	300	16,5	23,5	26	110,28	86,6	5280	273	986	6,92	5300	353	6,93	5,35

Продолжение табл. 2.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
30ШТ1	286,5	320	12	17	28	90,1	70,7	6180	273	1020	8,28	4650	291	7,19	6,05
30ШТ2	290	320	16	20,5	28	112,08	88	8160	365	1230	8,53	5610	351	7,08	6,65
30ШТ3	294	320	18	24,5	28	130,27	102,3	9500	419	1410	8,54	6710	419	7,18	6,75
30ШТ4	298	320	20	28,5	28	148,46	116,5	10890	475	1580	8,56	7810	488	7,25	6,88
35ШТ1	338	320	13,5	19	30	107,73	84,6	10980	422	1414	10,1	5200	325	6,95	7,76
35ШТ2	342	320	15	23	30	125,31	98,4	12660	478	1640	10,1	6300	394	7,09	7,74
35ШТ3	346,5	320	18	27,5	30	149,28	117,2	15440	581	1910	10,2	7540	471	7,10	8,09
35ШТ4	350,5	320	20,5	31,5	30	170,06	133,5	17890	671	2140	10,3	8640	540	7,13	8,37
35ШТ5	355,5	320	23	36,5	30	194,03	152,3	20660	767	2400	10,3	10010	626	7,18	8,6
Колонные тавры КТ															
10КТ1	94	200	6,5	10	13	26,19	20,6	129	16,3	85,6	2,22	667	66,7	5,05	1,5
10КТ2	95,5	200	7	11,5	13	29,61	23,2	144	18	93,2	2,2	767	76,7	5,09	1,54
11,5КТ1	110	240	7	10,5	14	33,01	25,9	225	24,2	132	2,61	1210	101	6,06	1,71
11,5КТ2	111,5	240	8	12	14	37,6	29,5	263	28,1	146	2,65	1380	115	6,07	1,81
13КТ1	124	260	8	12	16	41,26	32,4	365	35	185	2,98	1760	135	6,53	1,97
13КТ2	125,5	260	9	13,5	16	46,28	36,3	419	40	203	3,01	1980	152	6,54	2,07
13КТ3	127,5	260	10	15,5	16	52,6	41,3	481	45,5	223	3,03	2270	175	6,57	2,16
15КТ1	144,5	300	9	13,5	18	53,69	42,1	652	53,6	285	3,49	3040	203	7,52	2,29
15КТ2	146,5	300	10	15,5	18	60,99	47,9	745	60,7	314	3,5	3490	233	7,56	2,38
15КТ3	148,5	300	11,5	17,5	18	68,96	54,1	875	70,9	347	3,56	3940	263	7,56	2,52
17,5КТ1	168	350	10	15	20	69,52	54,6	1150	80,8	436	4,06	5360	306	8,78	2,63
17,5КТ2	170,5	350	11	17,5	20	79,8	62,6	1300	90,9	483	4,04	6260	357	8,85	2,7
17,5КТ1	173	350	13	20	20	91,61	71,9	1570	109	541	4,14	7150	409	8,84	2,91
20КТ1	193	400	11	16,5	22	87,4	68,7	1920	118	640	4,68	8800	440	10	3
20КТ2	196,5	400	13	20	22	105,02	82,4	2340	142	738	4,73	10670	534	10,1	3,18
20КТ3	201	400	16	24,5	22	128,32	100,7	3000	180	865	4,83	13080	654	10,1	3,46
20КТ4	206	400	19	29,5	22	153,61	120,6	3730	221	994	4,93	15750	787	10,1	3,75
20КТ5	212	400	23	35,5	22	184,67	145	4750	278	1150	5,07	18960	948	10,1	4,13

Примечание. Применение тавров по ТУ 14-2-685-86 возможно только по согласованию с организациями или заводами-изготовителями.

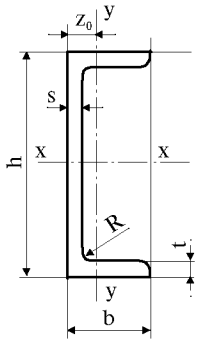


Таблица 2.7. Сортамент горячекатаных тонкостенных швеллеров с узкими параллельными полками по ТУ 14-2-204-76

Номер профиля	h	b	s	t	R	Площадь сечения, см^2	Линейная плотность, кг/м	Справочные значения для осей							z_0, см
								$x - x$				$y - y$			
	мм							J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	S_x, см^3	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см	
Т12	120	30	3	4,8	7	6,4	5	135	22,5	4,6	13,4	5	2,2	0,89	0,76
Т14	140	32	3,2	5	7	7,6	5,9	213	30,4	5,3	18,2	6,6	2,7	0,93	0,78
Т16	160	35	3,4	5,3	8	9	7,1	332	41,5	6,1	24,8	9,2	3,5	1,01	0,83
Т18	180	40	3,6	5,6	8	10,8	8,5	504	56	6,8	33,5	14,6	4,8	1,16	0,94
Т20	200	45	3,8	6	9	12,9	10,1	748	74,8	7,6	44,6	22,4	6,5	1,32	1,06
Т22	220	50	4	6,4	10	15,1	11,9	1071	97,4	8,4	57,8	32,9	8,6	1,47	1,19
Т24	240	55	4,2	6,8	10	17,4	13,7	1476	123	9,2	72,9	46,3	11	1,63	1,31
Т27	270	60	4,5	7,3	11	20,8	16,3	2218	164	10,3	97,5	65,1	14,2	1,77	1,41
Т30	300	65	4,8	7,8	11	24,3	19,1	3187	212	11,5	126,2	89,1	17,8	1,91	1,51

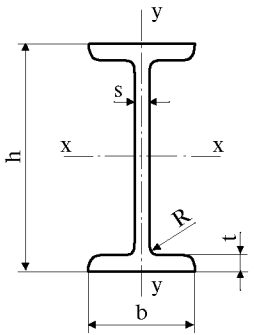


Таблица 2.8. Сортамент горячекатаных тонкостенных двутавров с узкими параллельными полками по ТУ 14-2-205-76

Номер профиля	*h*	*b*	*s*	*t*	*R*	Площадь поперечного сечения, см^2	Линейная плотность, кг/м	Справочные значения для осей						
								x – x				*y – y*		
	мм							J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	S_x, см^3	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см
Т12	120	45	3	4,5	7	7,8	6,1	181	30,2	4,8	17,4	6,9	3,1	0,94
Т14	140	50	3,2	4,7	7	9,3	7,3	291	41,6	5,6	24	9,8	3,9	1,03
Т16	160	55	3,4	5	8	11,1	8,8	455	56,9	6,4	32	13,9	5,1	1,12
Т18	180	60	3,6	5,3	8	13	10,2	668	74,3	7,2	43	19,2	6,4	1,21
Т20	200	65	3,8	5,6	9	15,1	11,9	960	96	8	55	25,8	7,9	1,3
Т22	220	70	4	5,9	10	17,4	13,7	1336	121	8,8	70	33,9	9,7	1,39
Т24	240	75	4,2	6,2	10	19,7	15,5	1790	149	9,5	86	43,8	11,7	1,49
Т27	270	80	4,5	6,6	11	23,2	18,2	2630	195	10,7	113	56,7	14,2	1,56
Т30	300	85	4,8	7	11	26,7	20,9	3694	246	11,8	143	72,1	16,9	1,64

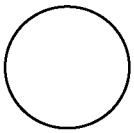


Таблица 2.9. Сортамент горячекатаного круглого проката по ГОСТ 2590-88

Диаметр d, мм	Площадь поперечного сечения, см^2	Масса 1 м профиля, кг	Диаметр d, мм	Площадь поперечного сечения, см^2	Масса 1 м профиля, кг
5	0,1963	0,154	50	19,64	15,42
5,5	0,2376	0,186	52	21,24	16,67
6	0,2827	0,222	53	22,06	17,32
6,3	0,3117	0,245	54	22,89	17,97
6,5	0,3318	0,260	55	23,76	18,65
7	0,3848	0,302	56	24,63	19,33
8	0,5027	0,395	58	26,42	20,74
9	0,6362	0,499	60	28,27	22,19
10	0,7854	0,616	62	30,19	23,7
11	0,9503	0,746	63	31,17	24,47
12	1,131	0,888	65	33,18	26,05
13	1,327	1,04	67	35,26	27,68
14	1,539	1,21	68	36,32	28,51
15	1,767	1,39	70	38,48	30,21
16	2,011	1,58	72	40,72	31,96
17	2,270	1,78	75	44,18	34,68
18	2,545	2,00	78	47,78	37,51
19	2,835	2,23	80	50,27	39,46
20	3,142	2,47	82	52,81	41,46
21	3,464	2,72	85	56,74	44,54
22	3,801	2,98	87	59,42	46,64
23	4,155	2,26	90	63,62	49,94
24	4,524	3,55	92	66,44	52,16
25	4,909	3,85	95	70,88	55,64
26	5,309	4,17	97	73,86	57,98
27	5,726	4,50	100	78,54	61,65
28	6,158	4,83	105	86,59	67,97
29	6,605	5,18	110	95,03	74,6
30	7,069	5,55	115	103,87	81,54
31	7,548	5,92	120	113,1	88,78
32	8,042	6,31	125	122,72	96,33
33	8,533	6,71	130	132,73	104,2
34	9,079	7,13	135	143,14	112,36
35	9,621	7,55	140	153,94	120,84
36	10,18	7,99	145	165,1	129,6
37	10,75	8,44	150	176,72	138,72
38	11,34	8,9	155	188,6	148,05
39	11,95	9,38	160	201,06	157,83
40	12,57	9,87	165	213,72	167,77
41	13,2	10,36	170	226,98	178,18
42	13,85	10,87	175	240,41	188,72
43	14,52	11,4	180	254,47	199,76
44	15,2	11,94	185	268,67	210,91
45	15,9	12,48	190	283,53	222,57
46	16,62	13,05	195	298,5	234,32
47	17,35	13,75	200	314,16	246,62
48	18,1	14,2			

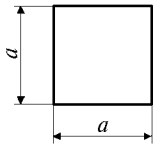


Таблица 2.10. Сортамент горячекатаного квадратного проката по ГОСТ 2591-88

Сторона квадрата *a*, мм	Площадь поперечного сечения, см^2	Масса 1 м профиля, кг	Сторона квадрата *a*, мм	Площадь поперечного сечения, см^2	Масса 1 м профиля, кг
6	0,36	0,283	45	20,25	15,9
7	0,49	0,385	46	21,16	16,61
8	0,64	0,502	48	23,04	18,09
9	0,81	0,636	50	25	19,63
10	1	0,785	52	27,04	21,23
11	1,21	0,95	55	30,25	23,75
12	1,44	1,13	58	33,64	26,4
13	1,69	1,33	60	36	28,26
14	1,96	1,54	63	39,69	31,16
15	2,25	1,77	65	42,25	33,17
16	2,56	2,01	70	49	38,46
17	2,89	2,27	75	56,25	44,16
18	3,24	2,54	80	64	50,24
19	3,61	2,82	85	72,25	56,72
20	4	3,14	90	81	63,58
21	4,41	3,46	93	86,49	67,9
22	4,84	3,8	95	90,25	70,85
23	5,29	4,15	100	100	78,5
24	5,76	4,52	105	110,25	86,57
25	6,25	4,91	110	121	94,98
26	6,76	5,3	115	132,25	103,82
27	7,29	5,72	120	144	113,04
28	7,84	6,15	125	156,25	122,66
29	8,41	6,6	130	169,00	132,67
30	9	7,06	140	182,25	143,07
32	10,24	8,04	145	196	153,86
34	11,56	9,07	150	210,25	165,05
35	12,25	9,62	160	225	176,63
36	12,96	10,17	170	256	200,96
38	14,44	11,24	180	289	227
40	16	12,56	190	324	254
42	17,64	13,85	200	400	314

Таблица 2.11. Сортамент горячекатаного листового проката по ГОСТ 19903-74*

1. Прокат, изготовляемый в листах

Толщина листов, мм: 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,63; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5 ; 2,8; 3,0 ; 3,2; 3,5; 3,8; 3,9; 4,0 ; 4,5; 5,0 ; 5,6; 6 ; 6,5; 7; 7,5; 8,0 ; 8,5; 9; 9,5; 10 ; 10,5; 11; 11,5; 12 ; 12,5; 13; 13,5; 14 ; 14,5; 15; 15,5; 16 ; 16,5; 17; 17,5; 18 ; 18,5; 19; 19,5; 20 ; 20,5; 21; 21,5; 22 ; 22,5; 23; 23,5; 24; 24,5; 25 ; 25,5; 26; 27; 28 ; 29; 30 ; 31; 32 ; 34; 36 ; 38; 40 ; 42; 45 ; 48; 50 ; 52; 55; 58; 60 ; 62; 65; 68; 70; 72; 75; 78; 80 ; 82; 85; 87; 90; 92; 95; 100 ; 105; 110; 115; 120 ; 125; 130; 135; 140 ; 145; 150; 155; 160 .

Ширина листов, мм: 500; 510; 600; 650; 670; 700; 710; 750; 800; 850; 900; 950; 1000; 1100; 1250; 1400; 1420; 1500; 1600; 1700; 1800; 1900; 2000; 2100; 2200; 2300; 2400; 2500; 2600; 2700; 2800; 2900; 3000; 3200; 3400; 3600; 3800.

Размеры проката

Толщина листа, мм	0,4–0,6	0,63–0,75	0,8–0,9	1	1,2–1,4	1,5–2,8	3–5,6
Ширина листа, мм	500–750; 1000	500–750; 1000; 1250	500–800; 1000; 1250	600–1000; 1250	600–1250	600–1500	600–1800

Продолжение

Толщина листа, мм	6–7,5	8–10,5	11–12,5	13–25,5	26–40	42–160
Ширина листа, мм	700–2000	700–2500	1000–2500	1000–2800	1250–3600	1250–3800

2. Листовой прокат, изготовляемый в рулонах

Толщина листов, мм: 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3; 3,2; 3,5; 3,8; 3,9; 4; 4,5; 5; 5,3; 5,5; 6; 6,3; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12.

Ширина проката, мм: 500; 530; 550; 600; 630; 650; 670; 700; (710); 750; 800; 850; 900; 950; 1000; 1100; 1250; 1400; (1420); 1500; 1600; 1700; 1800; 1900; 2000; 2100; 2200.

Размеры рулонов (ширина, толщина)

Толщина проката, мм	1,2–12	1,5–12	3–12	6–10	7–10
Ширина проката, мм	500–630; 1000–1250	650–950; 1400–1500	1600–1800	1900; 2000	2100; 2200

Таблица 2.12. Сортамент холоднокатаного листового проката по ГОСТ 19904-90

Толщина проката, мм: 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,9; 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3; 3,2; 3,5; 3,8; 3,9; 4; 4,2; 4,5; 4,8; 5.

Ширина проката, мм: 500; 550; 600; 650; 700; 750; 800; 850; 900; 950; 1000; 1100; 1200; 1250; 1400; 1450; 1500; 1600; 1700; 1800; 1900; 2000; 2100; 2200; 2300; 2350.

Размер проката, изготовляемого в рулонах

Толщина проката, мм	0,35–0,5	0,55–0,65	0,7–0,8; 1,5–2; 2,8–3,5	0,9–1,4	2,2; 2,5
Ширина проката, мм	500–1250	500–1700	500–1800	500–2000	500–2300

Примечание. 1. Холоднокатаный листовой прокат изготовляют в листах толщиной 0,35–5 мм и в рулонах толщиной 0,35–3,5 мм. 2. Холоднокатаный листовой прокат, применяемый для изготовления профилированных листов типов Н и НС (см.табл.2.27–2.32), рекомендуется заказывать высокой точности прокатки.

Таблица 2.13. Сортамент горячекатаного широкополосного универсального проката по ГОСТ 82-70*

Толщина проката, мм	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40, 45, 50, 55, 60
Ширина проката, мм	200, 210, 220, 240, 250, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 450, 460, 480, 500, 520, 530, 560, 600, 630, 650, 670, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000, 1050

Примечание. По требованию потребителя допускается изготовление широкополосного проката шириной 160, 170, 180, 190, 350, 440, 550, 580 и 710 мм.

Таблица 2.14. Сортамент горячекатаных полос по ГОСТ 103-76*

Толщина полос, мм	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 60
Ширина полос, мм	11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40, 45, 50, 55, 60, 63, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 120, 125, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200

Размеры полос, мм

Толщина полос, мм	4,6–8	5	9, 10 12	11,14,16	18	20	22	25
Ширина полос, мм	12–200	11	16–200	20–200	22–200	25–200	28–200	32–200

Продолжение

Толщина полос, мм	28–32	36	40	45	50	56	60
Ширина полос, мм	40–200	45–200	50–200	60–200	63, 65, 80–200	80–200	85–200

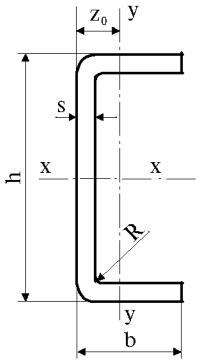


Таблица 2.15. Сортамент гнутых равнополочных швеллеров по ГОСТ 8278-83* из стали марок С235 и С245 по ГОСТ 27772-88*

h	b	s	R, не более	$n = \frac{b-(R+s)}{s}$	$n_1 = \frac{h-2(R+s)}{s}$	Площадь сечения, см^2	Справочные значения для осей								Масса 1 м, кг
							$x-x$				$y-y$			z_0, см	
мм							J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	S_x, см^3	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
25	26	2	3	10,5	7,5	1,39	1,43	1,14	1,01	0,67	0,96	0,6	0,83	1	1,09
	30	2	3	12,5	7,5	1,55	1,64	1,31	1,03	0,76	1,42	0,78	0,96	1,19	1,22
28	27	2,5	4	8,2	6	1,81	2,24	1,6	1,11	0,95	1,32	0,8	0,85	1,04	1,42
30	25	3	5	5,7	4,7	2,05	2,73	1,82	1,15	1,1	1,24	0,81	0,78	0,96	1,61
	30	2	3	12,5	10	1,65	2,5	1,67	1,23	0,96	1,53	0,82	0,96	1,12	1,3
32	25	3	5	5,7	5,3	2,11	3,2	2	1,23	1,23	1,28	0,82	0,78	0,94	1,66
	32	2	3	13,5	11	1,77	3,08	1,92	1,31	1,1	1,88	0,93	1,03	1,29	1,39
38	95	2,5	3	35,8	10,8	5,48	15,42	8,12	1,68	4,47	49,26	9,18	3	4,13	4,3

Продолжение табл. 2.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	20	2	3	7,5	15	1,45	3,4	1,7	1,53	1,02	0,35	0,4	0,62	0,6	1,14
		3	5	4	8	2,05	4,45	2,23	1,47	1,38	0,75	0,56	0,6	0,66	1,61
	30	2	3	12,5	15	1,85	4,85	2,42	1,62	1,4	1,72	0,86	0,96	1,01	1,45
40		2,5	3	9,8	11,6	2,28	5,83	2,91	1,6	1,66	2,09	1,06	0,96	1,03	1,79
		2	3	17,5	15	2,25	6,29	3,15	1,67	1,78	3,79	1,49	1,3	1,45	1,77
	40	2,5	3	13,8	11,6	2,78	7,58	3,79	1,65	2,17	4,63	1,83	1,29	1,47	2,18
		3	5	10,7	8	3,25	8,57	4,28	1,62	2,51	5,31	2,14	1,28	1,52	2,55
42	42	4	6	8	5,5	4,45	12,34	5,88	1,67	3,49	7,8	3,05	1,32	1,65	3,49
43	45	2	3	20	16,5	2,51	8,25	3,84	1,81	2,15	5,38	1,88	1,46	1,64	1,97
45	25	3	5	5,7	9,7	2,5	7,29	3,24	1,71	1,99	1,49	0,89	0,77	0,82	1,96
	31	2	3	13	17,5	1,99	6,55	2,91	1,81	1,68	1,97	0,94	0,99	1,01	1,56
48	70	5	7	11,6	4,8	8,49	32,6	13,58	1,96	7,95	41,22	10,15	2,2	2,94	6,67
	30	2	3	12,5	20	2,05	8,12	3,25	1,99	1,88	1,87	0,9	0,96	0,92	1,61
		2,5	3	9,8	15,6	2,53	9,82	3,93	1,97	2,3	2,28	1,11	0,95	0,94	1,99
	32	2,5	3	10,6	15,6	2,63	10,38	4,15	1,98	2,42	2,72	1,25	1,02	1,02	2,07
		2	3	17,5	20	2,45	10,42	4,17	2,06	2,36	4,13	1,55	1,3	1,34	1,92
	40	2,5	3	13,8	15,6	3,03	12,64	5,06	2,04	2,9	5,05	1,92	1,29	1,36	2,38
50		3	4	11	12	3,58	14,55	5,82	2,02	3,37	5,88	2,26	1,28	1,39	2,81
		4	6	7,5	7,5	4,61	17,8	7,12	1,97	4,23	7,35	2,89	1,26	1,48	3,62
	47	6	9	5,3	3,3	7,3	26,62	10,65	1,91	6,54	15,42	5,51	1,45	1,9	5,73
		2,5	3	17,8	15,6	3,53	15,46	6,18	2,09	3,49	9,31	2,92	1,62	1,81	2,77
	50	3	4	14,3	12	4,18	17,87	7,15	2,07	4,08	10,89	3,44	1,61	1,84	3,28
		4	6	10	7,5	5,4	22,04	8,82	2,02	5,15	13,72	4,44	1,59	1,91	4,24
	26	2,5	4	7,8	18,8	2,56	13,22	4,41	2,27	2,65	1,61	0,86	0,79	0,73	2,01
60	30	2,5	3	9,8	19,6	2,78	15,07	5,02	2,33	2,97	2,43	1,14	0,93	0,87	2,19
		3	5	7,3	14,7	3,25	17,1	5,7	2,29	3,41	2,8	1,33	0,93	0,9	2,55

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
		2,5	3	10,6	19,6	2,89	15,9	5,3	2,34	3,11	2,91	1,29	1	0,95	2,26
	32	3	4	8,3	15,3	3,4	18,31	6,1	2,32	3,62	3,38	1,52	1	0,97	2,67
		4	6	5,5	10	4,37	22,41	7,47	2,27	4,53	4,22	1,95	0,98	1,03	3,43
	40	2	3	17,5	25	2,65	15,78	5,26	2,44	3	4,49	1,6	1,29	1,25	2,08
60		3	4	11	15,3	3,88	22,21	7,4	2,39	4,3	6,31	2,33	1,27	1,3	3,04
	50	3	5	14	14,7	4,45	26,85	8,95	2,46	5,16	11,6	3,56	1,61	1,74	3,5
	60	3	4	17,7	15,3	5,08	31,97	10,66	2,51	6,01	19,26	5,03	1,95	2,17	3,99
		4	6	12,5	10	6,6	40	13,33	2,46	7,67	24,55	6,53	1,93	2,24	5,18
	80	3	5	24	14,7	6,25	41,49	13,83	2,58	7,68	42,02	8,59	2,59	3,11	4,91
	90	5	7	15,6	7,2	11,09	69,97	23,32	2,51	13,34	90,96	17,18	2,86	3,71	8,71
63	21	2,2	3	7,2	23,9	2,14	11,48	3,64	2,32	2,23	0,8	0,51	0,61	0,52	1,68
65	75	4	6	16,2	11,2	8	52,26	18,23	2,72	10,33	46,88	10,12	2,41	2,87	6,28
68	27	1	2	24	62	1,18	8,21	2,41	2,64	1,41	0,82	0,4	0,84	0,65	0,93
	30	2	3	12,5	30	2,45	17,84	5,1	2,7	3,01	2,1	0,95	0,93	0,79	1,92
	40	3	5	10,7	18	4,15	31,49	9	2,75	5,31	6,64	2,39	1,26	1,22	3,26
70	50	3	5	14	18	4,75	38,23	10,92	2,84	6,27	12,32	3,66	1,61	1,64	3,73
	50	4	6	10	12,5	6,21	48,3	13,8	2,79	8,05	15,77	4,76	1,59	1,69	4,87
	60	4	6	12,5	12,5	7	57,02	16,29	2,85	9,37	26,12	6,74	1,93	2,13	5,5
78	46	6	9	5,16	8	8,86	77,08	19,76	2,95	12,02	18,85	5,87	1,42	1,56	6,96
	25	4	6	3,75	15	4,61	37,07	9,27	2,84	5,85	2,29	1,25	0,71	0,65	3,61
	32	4	6	5,5	15	5,16	45,16	11,29	2,96	6,91	4,7	2,04	0,95	0,9	4,05
	35	4	6	6,25	15	5,41	48,63	12,16	3	7,37	6,08	2,44	1,06	1,01	4,24
	40	2,5	3	13,8	27,6	3,78	37,4	9,35	3,14	5,45	5,98	2,07	1,26	1,12	2,97
80		3	4	11	22	4,48	43,51	10,88	3,12	6,39	7	2,45	1,25	1,44	3,51
	50	4	6	10	15	6,6	65,98	16,5	3,16	9,65	16,6	4,48	1,58	1,6	5,18
		3	4	17,7	22	5,68	61,3	15,32	3,29	8,7	21,46	5,31	1,94	1,96	4,46
	60	4	6	12,5	15	7,4	77,54	19,38	3,23	11,17	27,53	6,92	1,93	2,02	5,81
		6	9	7,5	8,33	10,66	105,03	26,26	3,14	15,56	38,27	9,91	1,89	2,14	8,37

Продолжение табл. 2.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
80	80	3	4	24,3	22	6,88	79,1	19,77	3,39	11,01	47,03	9,11	2,61	2,84	5,4
		4	6	17,5	15	9	100,66	25,17	3,34	14,21	60,69	11,91	2,6	2,9	7,07
	85	4	6	18,8	15	9,41	106,45	26,61	3,36	14,97	71,64	13,35	2,76	3,13	7,38
	100	6	9	14,2	8,33	15,46	170,88	42,72	3,32	30,59	158,47	26,22	3,2	3,96	12,14
90	50	3,5	5	11,9	20,9	6,2	78,16	17,37	3,55	10,13	15,5	4,42	1,58	1,49	4,87
	54	5	7	8,4	13,2	8,99	110,99	24,66	3,51	14,57	25,94	7,07	1,7	1,73	7,06
	100	2,5	4	37,4	30,8	7,01	106,27	23,62	3,89	12,94	75,7	11,83	3,29	3,6	5,5
100	40	2,5	3	13,8	35,6	4,28	63,16	12,63	3,84	7,47	6,41	2,14	1,22	1	3,36
		3	5	10,7	28	5,05	73,11	14,62	3,8	8,72	7,5	2,53	1,22	1,03	3,97
	50	3	4	14,3	28,7	5,68	87,88	15,57	3,93	10,24	14,05	3,9	1,57	1,39	4,47
		4	6	10	20	7,4	111,44	22,29	3,88	13,15	18,01	5,07	1,56	1,45	5,81
		5	7	7,6	15,2	9,09	133,39	26,68	3,83	15,93	21,72	6,2	1,55	1,49	7,14
		6	9	5,8	11,7	10,66	151,84	30,37	3,77	18,39	25,03	7,26	1,53	1,55	8,37
	60	3	4	17,7	28,7	6,28	111,99	20,4	4,03	11,69	23,25	5,52	1,92	1,79	4,93
		4	6	12,5	20	8,2	129,89	25,98	3,98	15,07	29,93	7,2	1,91	1,84	6,44
	80	3	4	24,3	28,7	7,48	130,23	26,05	4,17	14,6	51,03	9,49	2,61	2,62	5,87
		4	6	17,5	20	9,8	166,77	33,35	4,12	18,91	66,07	12,43	2,59	2,68	7,7
		5	7	13,6	15,2	12,09	201,14	40,23	4,08	23,06	80,47	15,29	2,58	2,74	9,49
	100	3	5	31,7	28	8,65	157,81	31,56	4,27	17,51	93,15	14,37	3,28	3,52	6,79
		6	9	14,2	11,7	16,66	284,56	56,91	4,13	32,49	173,39	27,49	3,22	3,69	13,08
	160	4	6	37,5	20	16,2	314,31	62,86	4,4	13,43	436,25	45,27	5,19	6,36	12,72
104	20	2	3	7,5	47	2,73	35,64	6,85	3,61	4,36	0,73	0,45	0,52	0,37	1,14
106	50	4	6	10	21,5	7,64	127,9	24,13	4,09	14,28	18,38	5,12	1,55	1,41	6
108	70	6	9	9,2	13	13,54	245,48	45,46	4,56	26,69	66,59	14,15	2,22	2,29	10,63
110	26	2,5	3	8,2	39,6	3,83	58,96	10,72	3,92	6,69	1,93	0,93	0,71	0,53	3,01
	50	4	6	10	22,5	7,8	139,63	25,39	4,23	15,05	18,61	5,15	1,54	1,38	6,13
		5	7	7,6	17,2	9,59	167,57	30,47	4,18	18,27	22,47	6,29	1,53	1,43	7,53
	100	4	6	22,5	22,5	11,81	252,05	45,83	4,62	25,66	125,87	19,23	3,27	3,46	9,27

Продолжение табл. 2.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	25	4	6	3,75	25	6,2	104,42	17,4	4,1	11,25	2,57	1,31	6,44	0,54	4,87
		3	5	14	34,7	6,25	133,77	22,29	4,63	13,15	14,85	3,99	1,54	1,28	4,91
	50	4	6	10	25	8,2	171,72	28,62	4,57	11,71	19,15	5,21	1,53	1,33	6,44
		6	9	5,8	15	11,86	236,44	39,41	4,46	24,02	26,75	7,48	1,50	1,42	9,31
120	60	5	7	9,6	19,2	11,09	239,63	39,94	4,67	23,6	38,73	9,1	1,87	1,74	8,71
		6	9	7,5	15	13,06	275,47	45,91	4,59	27,44	44,95	10,7	1,85	1,8	10,25
	70	5	7	11,6	19,2	12,09	272,71	45,45	4,75	26,48	59,56	12,25	2,22	2,14	9,49
	80	4	6	17,5	25	10,6	252,49	42,08	4,88	24,01	70,65	12,84	2,58	2,5	8,32
		5	7	13,6	19,2	13,09	305,8	50,97	4,83	29,35	86,2	15,81	2,57	2,55	10,28
	40	2,5	3	13,8	51,6	5,28	141,38	20,2	5,17	12,25	7,04	2,23	1,15	0,84	4,15
		3	5	10,7	41,3	6,25	164,66	23,52	5,13	14,37	8,26	2,63	1,15	0,86	4,91
		3	5	17,3	41,3	7,45	220,97	31,57	5,45	18,48	25,89	5,79	1,86	1,53	5,85
140	60	5	7	9,6	23,2	12,09	345,47	49,35	5,34	29,4	40,8	9,32	1,84	1,62	9,49
		6	9	7,5	18,3	14,26	398,68	66,95	5,29	34,27	47,46	10,97	1,82	1,67	11,2
	70	5	7	11,6	23,2	13,09	391,05	55,86	5,47	32,77	62,87	12,56	2,19	1,99	10,28
	80	4	6	17,5	30	11,4	359,42	51,35	5,61	29,52	74,59	13,17	2,56	2,34	8,95
		5	7	13,6	23,2	14,09	436,63	62,38	5,57	36,15	91,13	16,23	2,54	2,38	11,06
145	65	3	5	19	43	7,9	255,04	35,18	5,68	20,49	32,69	6,78	2,03	1,68	6,2
148	25	4	6	3,75	32	7,32	170,34	24,37	4,96	15,99	2,7	1,34	6,07	4,92	5,75
		2	3	17,5	75	4,65	158,77	19,58	5,84	12,13	5,93	1,83	1,13	0,75	3,65
	40	3	5	10,7	48	6,85	228,59	28,57	5,78	17,75	8,55	2,67	1,12	0,8	5,38
		5	7	5,6	27	11,09	355,32	44,31	5,66	27,95	12,23	4,25	1,09	0,89	8,71
		2,5	4	17,4	58,8	6,26	225,47	28,18	6	16,99	13,68	3,48	1,48	1,07	4,92
160	50	4	6	10	35	9,81	343,12	42,42	5,91	26,06	20,87	5,41	1,46	1,14	7,7
		5	7	7,6	27,2	12,09	415,41	51,93	5,86	31,82	25,29	6,63	1,45	1,19	9,49
		6	9	5,83	21,7	14,26	479,22	59,9	5,8	37,08	29,35	7,8	1,43	1,24	11,2

Продолжение табл. 2.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
160	60	2,5	4	21,4	58,8	6,76	256,48	32,06	6,16	18,96	22,79	4,96	1,84	1,4	5,31
		3	5	17,3	48	8,05	302,54	37,82	6,13	22,46	26,95	5,89	1,83	1,42	6,32
		4	6	12,5	35	10,6	391,8	48,97	6,08	29,18	34,98	7,72	1,82	1,43	8,32
		5	7	9,6	27,2	13,09	475,49	59,44	6,03	35,7	42,56	9,49	1,8	1,52	10,28
		6	9	7,5	21,7	15,46	550,41	68,8	5,97	41,6	49,68	11,18	1,79	1,57	12,14
	70	4	6	15	35	11,4	440,48	55,06	6,21	32,3	53,86	10,4	2,17	1,82	8,95
	80	2,5	3	29,8	59,6	7,78	319,89	39,99	6,41	22,9	50,52	8,59	2,55	2,12	6,11
		3	5	24	48	9,25	376,5	47,06	6,38	27,17	59,79	10,22	2,54	2,15	7,26
		4	6	17,5	35	12,2	489,16	61,14	6,33	35,42	78,01	13,44	2,53	2,2	9,58
		5	7	13,6	27,2	15,09	595,66	74,46	6,28	43,45	95,4	16,57	2,51	2,24	11,85
		6	9	10,8	21,7	17,86	692,78	86,6	6,23	51,9	111,72	19,59	2,5	2,3	14,02
	100	3	5	30,7	48	10,45	452,12	56,31	6,56	31,88	110,04	15,59	3,24	2,94	8,28
		6	9	14,2	21,7	20,26	835,14	104,39	6,42	60,18	207,59	30,04	3,2	3,09	15,91
	120	5	7	21,6	27,2	19,09	836,99	104,5	6,62	58,95	291,01	35,78	3,9	3,87	14,99
		6	9	17,5	21,7	22,66	977,51	122,19	6,57	69,42	342,63	42,45	3,89	3,93	17,79
	160	6	9	24,2	21,7	27,46	1262,25	157,78	6,78	87,9	750,85	72,82	5,23	5,69	21,56
170	60	4	6	12,5	37,5	11	452,84	53,27	6,41	31,88	35,61	7,78	1,8	1,42	8,64
	70	5	7	11,6	29,2	14,59	618,28	72,74	6,51	43,16	66,99	12,92	2,14	1,81	11,45
		6	9	9,2	23,3	17,26	718,44	84,52	6,45	50,56	78,32	15,25	2,13	1,86	13,55
180	40	3	5	10,7	54,7	7,45	306,23	34,03	6,41	21,22	8,79	2,7	1,09	0,75	5,85
		4	6	7,5	40	9,81	395,47	43,94	6,35	27,64	11,3	3,52	1,07	0,79	7,7
	50	4	6	10	40	10,6	457,43	50,82	6,57	31,16	21,53	5,48	1,42	1,07	8,32
	70	6	9	9,2	25	17,85	823,93	91,55	6,79	54,95	79,76	15,38	2,11	1,81	14,02
	80	4	6	17,5	40	13	643,32	71,48	7,03	41,72	61,01	13,67	2,49	2,07	10,21
		5	7	13,6	31,6	16,09	784,86	87,21	6,98	51,24	99,15	16,86	2,48	2,12	12,68
		6	9	10,8	25	19,08	914,79	101,79	6,93	60,17	116,23	19,94	2,47	2,17	14,96
	100	5	7	17,6	31,2	18,09	936,03	104,23	7,2	59,99	184,04	25,85	3,19	2,88	14,2
		6	9	14,2	25	21,46	1096,84	121,84	7,15	70,61	216,45	30,63	3,18	2,93	16,84
	130	8	12	13,8	17,5	32,82	1746,62	194,07	7,29	111,44	574,59	65,86	4,18	4,28	25,76

Продолжение табл. 2.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
185	100	3	5	30,7	56,3	11,2	626,06	67,68	7,48	38,54	115,48	15,93	3,21	2,75	8,79
200	50	3	5	14	61,3	8,65	456,99	45,7	7,27	28,18	17,09	4,24	1,41	0,97	6,79
		4	6	10	45	11,41	592,95	59,3	7,21	36,67	22,11	5,54	1,39	1,01	8,95
	80	4	6	17,5	45	13,81	823,48	82,35	7,72	48,43	83,67	13,86	2,46	1,96	10,83
		5	7	13,6	35,2	17,09	1006,26	100,63	7,67	59,54	102,45	17,1	2,45	2,01	13,42
		6	9	10,8	28,3	20,26	1174,93	117,49	6,61	70	120,22	20,24	2,44	2,06	15,91
	100	3	5	30,7	61,3	11,65	748,08	74,81	8,01	42,96	118,41	16,11	3,19	2,65	9,15
		6	9	14,2	28,3	22,66	1400,82	140,08	7,86	81,64	224,37	31,14	3,15	2,79	17,79
	180	6	9	27,5	28,3	32,26	2304,37	230,44	8,45	128,2	1122,23	94,54	5,9	6,13	25,33
205	38	2,5	3	13	77,6	6,81	351,96	34,34	7,19	21,65	6,62	2,08	0,99	0,62	5,34
206	75	6	9	10	29,3	20,02	1200,75	116,58	7,74	70,07	101,09	17,92	2,25	1,86	15,72
210	57	4	6	11,8	47,5	12,37	728,59	69,39	7,68	42,45	32,59	7,21	1,62	1,18	9,71
250	35	3	5	9	78	9,25	657,45	52,6	8,43	34,41	6,34	2,12	0,83	0,52	7,26
	60	3	5	17,3	78	10,75	886,25	70,9	9,08	43,67	30,27	6,19	1,68	1,11	8,44
		4	6	12,5	57,5	14,21	1156,1	92,49	9,02	57,09	39,37	8,12	1,66	1,15	11,15
		5	7	9,6	45,2	17,59	1413,5	113,08	8,96	70,22	48,01	9,99	1,65	1,19	13,81
		6	9	7,5	36,7	20,86	1650,53	132,04	8,89	82,56	56,16	11,79	1,64	1,24	16,38
	125	6	9	18,3	36,7	28,66	2811,72	224,94	9,9	130,14	448,01	49,33	3,95	3,42	22,5
270	100	7	10	11,7	33,7	31,11	3254,41	241,07	10,23	143,96	283,03	37,48	3,02	2,45	24,42
280	60	3,9	6	12,8	66,7	15,03	1495,61	106,83	9,98	66,57	39,47	8,01	1,62	1,07	11,8
	140	5	7	25,6	51,2	27,09	3388,17	242,01	11,18	138,97	536,69	52,31	4,45	3,74	21,27
300	80	6	9	10,8	45	26,26	3131,48	208,77	10,92	128,15	134,74	21,25	2,27	1,66	20,62
	100	8	12	10	32,5	37,62	4694,84	312,98	11,17	189,27	327,88	42,94	2,95	2,37	29,53
310	100	6	9	14,2	46,7	29,26	3948,93	54,77	11,62	153,02	256,39	33,01	2,96	2,23	22,97
380	65	6	9	8,3	58,3	29,26	4998,26	126,31	13,07	166,64	77,71	14,37	1,63	1,09	22,97
400	95	8	12	9,4	45	44,82	9179,84	458,99	14,31	285,48	305,12	40,06	2,61	1,88	35,18
410	65	6	9	8,3	63,3	31,06	6077,35	296,46	13,99	191,27	78,82	14,45	1,59	1,05	24,38

Примечание. Швеллеры по этому сортаменту изготовляют из углеродистой кипящей и полуспокойной стали (в том числе из стали марок С235 и С245 по ГОСТ 27772-88*).

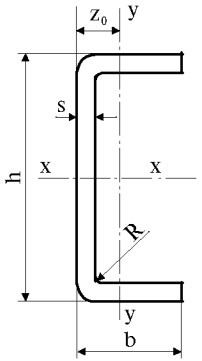


Таблица 2.16. Сортамент гнутых равнополочных швеллеров по ГОСТ 8278-83* из стали марок С255 и С375 по ГОСТ 27772-88*

h	b	s	R, не более	$n = \frac{b-(R+s)}{s}$	$n_1 = \frac{h-2(R+s)}{s}$	Площадь сечения, см^2	Справочные значения для осей								Масса 1 м, кг
							$x-x$				$y-y$			z_0, см	
мм							J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	S_x, см^3	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
25	26	2	5	9,5	5,5	1,36	1,37	1,1	1,01	0,64	0,92	0,58	0,82	1,03	1,07
	30	2	5	11,5	5,5	1,52	1,59	1,27	1,02	0,74	1,37	0,77	0,95	1,21	1,19
30	25	3	7	12,5	3,3	2	2,61	1,74	1,14	1,06	1,19	0,79	0,77	0,99	1,57
	30	2	5	11,5	8	1,62	2,42	1,61	1,22	0,93	1,49	0,8	0,96	1,15	1,27
38	95	2,5	6	34,6	8,4	5,42	15,18	7,99	1,67	4,43	48,12	9,15	2,98	4,18	4,25
	20	2	5	6,5	13	1,42	3,26	1,63	1,52	0,98	0,54	0,39	0,62	0,62	1,11
	30	2	5	11,5	13	1,82	4,7	2,35	1,61	1,36	1,68	0,85	0,96	1,03	1,43
40		2,5	6	8,6	9,2	2,22	5,56	2,78	1,58	1,63	2,01	1,04	0,95	1,06	1,74
	40	2	5	16,5	13	2,22	6,15	3,07	1,67	1,74	3,71	1,47	1,29	1,48	1,74
		2,5	6	12,6	9,2	2,72	7,33	3,66	1,64	2,1	4,48	1,8	1,28	1,51	2,13
		3	7	10	6,7	3,2	8,35	4,17	1,61	2,43	5,18	2,11	1,27	1,55	2,51
48	70	5	12	10,6	2,8	8,28	31,28	13,03	1,94	7,68	39,21	9,85	2,18	3,02	6,5
50	30	2	5	11,5	18	2,02	7,89	3,16	1,98	1,81	1,84	0,89	0,93	0,94	1,58
		2,5	6	8,6	13,2	2,47	9,4	3,76	1,95	2,22	2,21	1,09	0,95	0,97	1,94

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
		2	5	16,5	18	2,42	10,2	4,08	2,05	2,32	4,06	1,54	1,3	1,36	1,9
	40	2,5	6	12,6	13,2	2,97	12,22	4,89	2,03	2,81	4,92	1,89	1,29	1,39	2,33
		3	7	10	10	3,5	14,04	5,62	2	3,27	5,71	2,22	1,28	1,43	2,75
50	50	2,5	6	16,6	13,2	3,47	15,04	6,02	2,08	3,41	9,09	2,88	1,62	1,84	2,72
		3	7	13,3	10	4,1	17,36	6,94	2,06	3,98	10,6	3,39	1,61	1,8	3,22
		4	10	9	5,5	5,27	21,13	8,45	2	4,96	13,17	4,33	1,58	1,96	4,13
	60	4	10	11,5	5,5	6,07	25,37	10,15	2,04	5,88	21,92	6,14	1,9	2,43	4,76
	30	2,5	6	8,6	17,2	2,72	14,48	4,83	2,31	2,87	2,38	1,13	0,93	0,89	2,13
		3	7	6,7	13,3	3,2	16,61	5,54	2,28	3,33	2,75	1,32	0,93	0,92	2,51
	32	2,5	6	9,4	17,2	2,82	15,3	5,1	2,33	3,01	2,85	1,28	1	0,97	2,21
		3	7	7,3	13,3	3,32	17,59	5,85	2,3	3,5	3,3	1,5	1	1	2,61
60	40	2	5	16,5	23	2,62	15,46	5,15	2,43	2,95	4,36	1,59	1,29	1,27	2,05
		3	7	10	13,3	3,8	21,49	7,16	2,38	4,19	6,17	2,31	1,27	1,33	2,98
	50	3	7	13,3	13,3	4,4	26,37	8,79	2,45	5,04	11,44	3,53	1,61	1,76	3,45
	60	3	7	16,7	13,3	5	31,24	10,41	2,5	5,9	18,87	4,98	1,84	2,21	3,93
		4	10	11,5	8	6,47	38,7	12,9	2,45	7,43	23,79	6,42	1,92	2,29	5,08
	90	5	12	14,6	5,2	10,88	67,93	22,64	2,5	13	37,79	16,28	2,84	3,78	8,54
65	40	4	10	6,5	9,2	5,07	31,64	9,74	2,56	5,83	7,94	3	1,25	1,35	3,98
	75	4	10	15,2	9,2	7,87	57,73	17,76	2,71	10,1	45,66	9,96	2,41	2,92	6,18
	40	3	7	10	16,7	4,1	30,83	8,81	2,74	5,17	6,56	2,36	1,26	1,24	3,22
70	60	4	10	11,5	10,5	6,87	55,24	15,78	2,83	9,12	25,45	6,64	1,92	2,17	5,39
	65	4	10	12,7	10,5	7,27	59,6	17,03	2,86	9,78	31,75	7,73	2,09	2,39	5,7
78	46	6	14	4,3	6,3	8,6	72,93	18,7	2,91	14,49	17,18	5,75	1,41	1,61	6,75
	32	4	10	4,5	13	5,03	42,85	10,71	2,92	6,63	4,58	2,02	0,95	0,93	3,95
	35	4	10	5,25	13	5,27	46,32	11,58	2,97	7,09	5,93	2,41	1,06	1,04	4,14
	40	2,5	6	12,6	25,2	3,72	36,34	9,08	3,12	5,32	5,89	2,06	1,26	1,14	2,92
80		3	7	10	20	4,4	42,23	10,56	3,1	6,23	6,9	2,42	1,25	1,17	3,45
	50	4	10	9	13	6,47	63,67	15,92	3,14	9,37	16,22	4,82	1,58	1,63	5,08
	60	3	7	16,7	20	5,6	60,03	15,01	3,27	8,55	21,15	5,27	1,94	1,99	4,4
		4	10	11,5	13	7,27	75,23	18,81	3,22	10,89	26,92	6,83	1,92	2,06	5,7
		6	14	6,6	6,6	10,4	100,66	25,17	3,11	15,04	36,99	9,72	1,89	2,19	8,17

Продолжение табл. 2.16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	80	3	7	23,3	20	6,81	77,82	19,45	3,38	10,86	46,38	9,04	2,61	2,87	5,34
80		4	10	16,5	13	8,87	98,36	24,59	3,33	13,93	59,44	11,77	2,59	2,95	6,96
	85	4	10	17,8	13	9,27	104,14	26,03	3,35	14,69	70,19	13,2	2,75	3,18	7,28
90	54	5	12	7,4	11,2	8,78	106,44	23,65	3,48	14,07	25,25	6,97	1,7	1,78	6,89
	115	5	12	19,6	11,2	14,88	216,75	48,17	3,82	17,04	204,49	29,26	3,71	4,51	11,68
	40	2,5	6	12,6	33,2	4,22	61,52	12,3	3,82	7,31	6,35	2,13	1,23	1,02	3,31
		3	7	10	26,7	5	71,77	14,35	3,79	8,59	7,44	2,52	1,22	1,04	3,93
	50	3	7	13,3	26,7	5,6	85,89	17,18	3,92	10,04	13,89	3,87	1,57	1,41	4,4
		4	10	9	18	7,27	107,86	21,57	3,85	12,8	17,7	5,02	1,56	1,48	5,7
		5	12	6,6	13,2	8,88	127,79	25,56	3,79	15,6	21,21	6,12	1,55	1,54	6,97
		7	18	3,5	7,1	11,73	156,52	31,3	3,65	20,13	26,84	8,07	1,51	1,67	9,21
100	60	3	7	16,7	26,7	6,2	100,01	20	4,01	11,5	22,98	5,48	1,92	1,81	4,87
		4	10	11,5	18	8,07	126,31	26,26	3,96	7,57	29,42	7,14	1,91	1,88	6,33
	80	3	7	23,3	26,7	7,4	128,25	25,65	4,14	14,41	50,47	9,43	2,61	2,65	5,81
		4	10	16,5	18	9,67	163,19	32,64	4,11	18,56	65,01	12,32	2,59	2,72	7,69
		5	12	12,6	13,2	11,87	195,54	39,11	4,06	22,73	78,73	15,11	2,57	2,98	9,32
	120	8	20	11,5	5,5	24,27	405,91	81,18	4,09	47,05	350,77	49,12	3,8	4,86	19,06
	160	4	10	36,5	18	16,07	310,73	62,15	4,4	33,92	430,44	44,93	5,18	6,42	12,61
	26	2,5	6	7	37,5	3,77	56,98	10,36	3,89	6,51	1,91	0,92	0,71	0,54	2,96
110	50	4	10	9	20,5	7,67	135,31	24,6	4,2	14,67	18,32	5,1	1,54	1,41	6,02
		5	12	6,6	15,2	9,38	160,81	29,24	4,14	17,91	22	6,23	1,53	1,47	7,36
	25	4	10	2,75	23	6,07	99,29	16,55	4,04	10,83	2,54	1,31	0,65	0,56	4,76
	50	3	7	13,3	33,3	6,2	131,86	21,98	4,61	12,39	14,36	3,88	1,54	1,29	4,87
	60	4	10	11,5	23	8,87	193,52	32,25	4,67	18,95	31,48	7,36	1,88	1,72	6,96
		5	12	8,6	17,2	10,88	231,6	38,6	4,61	23,31	38,03	9,01	1,87	1,78	8,54
120		6	14	6,7	13,3	12,98	265,77	44,29	4,55	26,64	44,06	10,59	1,85	1,83	10,05
	75	4	10	15,2	23	10,07	233,91	38,98	4,82	22,43	58,39	11,28	2,41	2,32	7,9
	80	4	10	16,5	23	10,47	247,37	41,23	4,86	23,59	69,73	12,75	2,58	2,53	8,22
		5	12	12,6	17,2	12,88	297,77	49,63	4,81	28,96	84,7	15,66	2,56	2,59	10,11
	90	7	18	9,2	10	18,79	428,06	71,34	4,77	41,53	154,54	26,45	2,87	3,16	14,75
	105	8	20	9,6	8	23,47	543,64	90,61	4,81	52,89	262,65	39,8	3,35	3,9	18,43

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
130	135	8	20	13,4	9,25	29,07	834,22	28,34	5,36	73,57	546,18	65,35	4,33	5,4	22,82
	40	2,5	6	12,6	49,2	5,22	138,17	19,74	5,15	12,03	7	2,22	1,16	0,85	4,1
	60	4	10	11,5	28	9,67	278,47	39,78	5,37	23,59	33,2	7,54	1,85	1,6	7,59
		5	12	8,6	21,2	11,88	334,59	47,8	5,31	28,94	40,19	9,25	1,84	1,65	9,32
140		6	14	6,7	16,7	14	385,54	55,08	5,25	33,34	46,69	10,88	1,82	1,71	10,99
	70	5	12	10,6	21,2	12,88	380,17	54,31	5,43	32,01	61,95	12,46	2,19	2,03	10,11
	80	4	10	16,5	28	11,27	352,48	50,35	5,59	29,03	73,78	13,09	2,56	2,37	8,84
		5	12	12,6	21,2	13,88	425,75	60,82	5,54	35,69	89,81	16,1	2,54	2,42	10,89
145	65	3	7	18,3	41,7	7,25	252,27	34,8	5,67	20,3	32,53	6,77	2,04	1,69	6,16
	75	5	12	11,6	22,2	13,63	437,5	60,34	5,67	21,73	76,04	14,32	2,36	2,19	10,7
	40	3	7	10	46,7	6,8	225,22	28,15	5,75	17,44	8,51	2,67	1,12	0,81	5,34
		5	12	4,6	25,2	10,88	341,16	42,64	5,6	27,07	13,08	4,28	1,1	0,91	8,54
	50	4	10	9	33	9,67	334,07	41,76	5,88	25,5	20,68	5,38	1,46	1,16	7,6
		5	12	6,6	25,2	11,88	401,24	50,16	5,81	30,95	24,98	6,59	1,45	1,21	9,32
	60	3	7	16,7	46,7	8	299,17	37,4	6,11	22,15	26,84	5,88	1,83	1,44	6,28
		4	10	11,5	33	10,47	382,75	48,84	6,05	28,62	34,62	7,69	1,82	1,49	8,22
160		5	10	9	26	12,96	467,05	58,38	6	35,17	42,25	9,46	1,8	1,53	10,18
		6	14	6,7	20	15,2	533,32	66,66	5,92	40,64	48,92	11,11	1,79	1,6	11,93
	75	8	20	5,8	13	21,87	787,44	98,43	6	59,73	115,44	22,07	2,3	2,27	17,17
	80	2,5	6	28,6	57,2	7,72	315,7	39,46	6,4	22,62	50,22	8,56	2,55	2,14	6,06
		4	10	16,5	33	12,07	480,12	60,01	6,31	32,86	77,29	13,38	2,53	2,22	9,47
		5	12	12,6	26	14,88	581,49	72,69	6,25	42,92	94,24	16,47	2,52	2,52	11,68
	120	6	14	16,7	20	22,4	960,49	120,05	6,55	68,36	338,38	42,17	3,89	3,98	17,59
	160	6	14	23,3	20	27,2	1245,16	155,65	6,77	86,84	742,04	72,35	5,22	5,74	21,36
170	70	5	12	10,6	27,2	14,38	602,31	70,86	6,47	42,23	66,23	12,84	2,15	1,84	11,29
		6	14	8,3	21,7	17	699,18	82,25	6,41	49,44	77,37	15,16	2,13	1,9	13,35
	50	4	10	7	38	10,47	446,01	49,56	6,53	30,53	21,37	5,46	1,43	1,09	8,22
180	70	5	12	10,6	29,2	14,88	690,41	76,41	6,81	46,28	67,47	12,95	2,13	1,79	11,68
		6	14	8,3	23,3	17,6	802,37	79,15	6,25	53,77	78,86	15,29	2,12	1,84	13,82
		7	18	6,4	18,5	20,13	895,52	99,52	6,67	60,67	89,12	17,5	2,1	1,91	15,8

Продолжение табл. 2.16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	80	4	10	16,5	38	12,87	631,9	70,21	7,01	41,09	80,37	12,61	2,5	2,1	10,1
		5	12	12,6	29,2	15,88	766,99	85,22	6,95	50,65	88,11	16,77	2,49	2,15	12,46
		6	14	10	23,3	18,8	893,23	99,25	6,89	58,99	114,93	19,82	2,47	2,2	14,76
180		8	20	6,5	15,5	24,27	1107,95	123,11	6,76	74,5	145,09	25,58	2,44	2,33	19,05
	100	5	12	16,6	29,2	17,88	920,16	102,24	7,17	59,4	182,13	25,71	3,19	2,92	14,03
		6	14	13,3	23,3	21,2	1074,96	119,44	7,12	69,43	214,06	30,46	3,18	2,97	16,64
	130	8	20	12,7	15,5	32,37	1700,06	188,9	7,26	108,9	563,65	65,19	4,18	4,35	25,33
	60	4	10	11,5	43	12,07	655,73	65,57	7,37	38,89	37	7,91	1,75	1,32	9,47
	80	4	10	16,5	43	13,67	809,42	80,94	7,69	47,73	83,09	13,82	2,46	1,99	10,75
		5	12	12,6	33,2	16,88	984,24	98,42	7,64	58,89	101,52	17,03	2,45	2,04	13,25
200		6	14	10	26,7	20	1148,38	114,84	7,58	68,69	119,05	20,14	2,44	2,09	15,7
	100	5	12	16,6	33,2	18,88	1174,41	117,44	7,98	68,64	188,88	26,14	3,16	2,77	14,82
		6	14	13,3	16,7	22,4	1374,27	137,43	7,83	80,33	222,2	30,99	3,15	2,83	17,59
	160	8	20	16,5	18	38,67	2611,1	261,11	8,22	148,48	1040,1	98,58	5,19	5,45	30,36
205	38	2,5	6	11,8	75,2	6,74	345,1	33,67	7,15	21,32	6,6	2	0,99	0,63	5,29
206	75	6	14	9,2	27,7	19,76	1172,61	113,85	7,7	68,72	100,14	17,83	2,25	1,88	15,52
210	57	4	10	10,8	45,5	12,23	713,12	67,92	7,64	41,72	32,39	7,19	1,63	1,2	9,6
	25	3	7	6	76,7	8,6	557,77	44,62	8,05	30,22	23,28	1,08	0,52	0,34	5,75
		4	10	11,5	55,5	14,07	1134,22	90,74	8,98	56,22	39,18	8,1	1,67	1,16	11,04
250	60	5	12	8,6	43,2	17,38	1379,26	110,34	8,91	69,4	47,7	9,96	1,65	1,21	13,64
		6	14	6,6	35	20,6	1609,27	128,74	8,84	80,93	55,77	11,76	1,65	1,26	16,17
	90	8	20	7,8	24,3	31,47	2705,51	216,44	9,27	131,56	227,26	33,91	2,69	2,3	24,71
	125	6	14	13,6	17,5	28,4	2770,46	221,64	9,88	128,51	444,78	49,15	3,96	3,45	22,3
270	100	7	18	10,7	31,43	30,63	3164,2	234,38	10,16	140,66	279,91	37,28	3,02	2,49	24,04
280	60	3,9	10	11,8	64,7	14,9	1488,9	104,92	9,93	65,62	39,3	7,99	1,62	1,08	11,89
		6	14	6,6	35	22,4	2142,56	153,24	9,78	97,06	57,34	11,89	1,6	1,18	17,58
300	80	6	14	10	43,3	26	3072,29	204,82	10,82	137,45	134	21,19	2,27	1,68	20,41
310	100	6	14	13,3	45	29	3885,79	250,7	11,57	151,02	255,01	32,92	2,97	2,25	22,77

Примечание. Швеллеры по этому сортаменту изготовляют из углеродистой кипящей и полуспокойной стали (в том числе из стали марок С255 и С345 по ГОСТ 27772-88*).

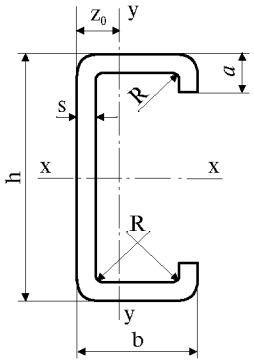


Таблица 2.17. Сортамент гнутых равнополочных С-образных профилей по ГОСТ 8282-83* и по ТУ 67-559-83

h	*b*	*a*	*s*	*R* не более	Площадь сечения, см^2	Справочные значения для осей						z_0, см	Масса 1 м, кг
						x – x			*y – y*				
мм						J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
62	66	17,5	3	4,5	6,23	40,14	12,95	2,54	35,65	9,61	2,39	2,89	4,89
65	32	8	1	1,5	1,38	9,38	2,69	2,61	1,89	0,88	1,17	1,05	1,08
65	32	8	1,6	3	2,11	13,92	4,28	2,57	2,7	1,25	1,13	1,04	1,66
80	50	24	4	6	7,93	73,05	18,26	3,03	27,72	9,65	1,87	2,13	6,23
100	50	10	2	3	4,12	65,59	13,12	4	12,64	3,68	1,76	1,56	3,22
100	80	35	5	7,5	14,68	220,49	44,11	3,87	33,57	30,47	3,02	3,62	11,53
120	55	18	5	7,5	11,66	245,74	40,96	4,59	42,52	11,65	1,91	1,85	9,15
160	50	20	3	4,5	8,36	306,37	38,3	6,05	27,17	7,74	1,8	1,49	6,56
160	60	32	4	6	12,57	462,01	37,75	6,05	65,78	7,16	2,29	2,14	9,87
300	60	50	5	7,5	24,36	2861,55	190,77	10,84	125,61	30,42	2,27	1,87	19,12

Продолжение табл. 2.17

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
400	160	50	3	4,5	24,01	6073,68	303,68	15,91	884,54	80,83	6,07	5,06	18,85
400	160	60	4	10	32,27	8028,19	401,41	15,77	1219,71	113,92	6,15	5,29	25,33
410	65	30	4	6	22,95	4872,87	237,7	14,57	103,88	20,33	2,13	1,39	18,01
550	65	30	4	6	28,55	10258,72	373,04	18,96	110,32	20,64	1,97	1,16	22,41
100	60	15	3	4,5	6,91	111	22,4	4,03	32,4	15,2	2,17	2,13	5,43
160	80	25	3	4,5	10,43	424	53	6,39	90,1	32,4	2,94	2,78	8,19
			4	6	13,61	542	67,8	6,32	100	39,7	2,85	2,77	10,68
			5	7,5	16,64	649	81,1	6,26	125	45,4	2,75	2,75	13,06
200	60	15	6	4,5	9,91	568	56,9	7,58	40,6	26,5	2,03	1,53	7,78
250	100	30	3	4,5	14,63	1421	113,8	9,86	200	64,5	3,7	3,11	11,48
		30	4	6	19,28	1852	148,2	9,8	257	82,7	3,65	3,11	15,13
		30	5	7,5	23,64	2234	178,7	9,72	303	98,3	3,58	3,09	18,56
		36	3	4,5	14,99	1452	116,2	9,84	216	66,2	3,8	3,27	11,77
		41	4	6	20,09	1911	153	9,76	292	86,3	3,82	3,39	15,77
		45	5	7,5	25,14	2349	187,9	9,67	366	105	3,82	3,49	19,73

Примечания: 1. С-образные профили из углеродистой кипящей и полуспокойной стали изготовляют с радиусами кривизны не более 1,5*S*, а из углеродистой спокойной и низколегированной – не более 2,5*S*. 2. С-образные профили 65×32×8×1 и 65×32×8×1,6 мм изготовляют из холоднокатаной заготовки.

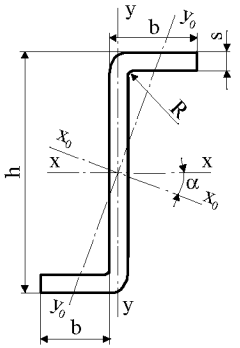


Таблица 2.18. Сортамент гнутых равнополочных зетовых профилей по ГОСТ 13229-78* из стали марок С235 и С245 по ГОСТ 27772-88*

h	b	s	R не более	tgα			Площадь поперечного сечения, см^2	Справочные значения для осей												Масса 1 м, кг
								$x-x$		$y-y$		x_0-x_0				y_0-y_0				
мм								J_x, см^4	i_x, см	J_y, см^4	i_y, см	J_{x_0}, см^4	W'_{x_0}, см^3	W''_{x_0}, см^3	i_{x_0}, см	J_{y_0}, см^4	W'_{y_0}, см^3	W''_{y_0}, см^3	i_{y_0}, см	
40	32	2	3	0,854	13,5	15	1,93	5,14	1,63	3,97	1,43	8,26	2,34	5,9	2,07	0,85	0,75	0,73	0,66	1,52
	55	4	6	0,554	11,25	5	5,41	14,37	1,63	39,72	2,71	3,16	0,72	2,51	0,76	50,93	13,26	65,3	3,07	4,24
76	60	4	6	0,842	12,5	14	7,25	68,9	3,08	52,07	2,68	109,72	16,21	41,25	3,89	11,25	5,36	5,14	1,23	5,68
80	40	3	4	0,434	11	22	4,48	43,51	3,12	11,43	1,6	50,95	9,67	15,68	3,37	3,99	1,92	2,64	0,94	3,52
		2	3	0,707	35	17,5	3,05	30,57	3,17	7,91	1,61	35,65	6,84	23,3	3,42	2,83	1,41	6,58	0,96	2,4
	50	3	4	0,536	14,3	22	5,08	52,41	3,21	22,83	2,12	68,57	11,44	21,98	3,67	6,67	2,95	3,49	1,15	3,99
135	75	6	9	0,51	20	17,5	15,76	440,23	5,28	149,55	3,08	542,98	57,64	104,02	5,87	46,81	12,97	16,6	1,72	12,36
200	60	5	7	0,206	9,6	35,2	15,09	816,09	7,35	63,58	2,05	849,3	77,21	96,4	7,5	30,36	7,87	14,81	1,42	11,81
	87	6	9	0,354	12	28,3	21,1	1253,99	7,71	237,45	3,35	1399,61	113,79	161,42	8,14	91,84	18,9	28,61	2,09	16,55
250	80	5	7	0,224	45,2	13,6	19,59	1713,64	9,35	155,41	2,81	1796,32	129,28	137,09	9,57	72,72	3,21	20,05	1,92	15,38
340	50	3	4	0,068	108,6	14,8	12,87	1742,54	11,68	229,03	4,33	1750,75	101,24	102,5	11,66	14,7	0,48	4,72	1,66	10,11

Примечание. Профили по этому сортаменту изготовляют из углеродистой кипящей и полуспокойной стали с временным сопротивлением разрыву не более 461 МПа (в том числе из марок С235 и С245 по ГОСТ 27772-88*).

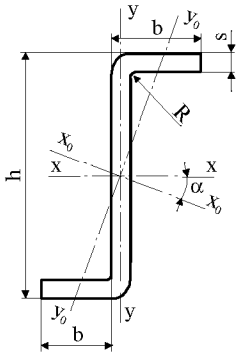


Таблица 2.19. Сортамент гнутых равнополочных зетовых профилей по ГОСТ 13229-78* из стали марок С255 и С 345 по ГОСТ 27772-88*

h	b	s	R не более	tgα			Площадь поперечного сечения, см^2	Справочные значения для осей												Масса 1 м, кг
								x–x		y–y		x_0–x_0				y_0–y_0				
мм								J_x, см^4	i_x, см	J_y, см^4	i_y, см	J_{x_0}, см^4	W'_{x_0}, см^3	W''_{x_0}, см^3	i_{x_0}, см	J_{y_0}, см^4	W'_{y_0}, см^3	W''_{y_0}, см^3	i_{y_0}, см	
40	32	2	5	0,871	12,5	13	1,9	4,99	1,62	3,98	1,45	8,18	2,37	6,06	2,08	0,79	0,72	0,72	0,64	1,49
	55	4	10	0,597	10,25	13	5,27	13,78	1,62	39,74	2,75	2,7	0,6	2,39	0,72	50,83	13,75	75,08	3,11	4,14
76	60	4	10	0,86	11,5	12	7,11	66,81	3,06	52,09	2,71	108,61	16	41,77	3,91	10,29	4,97	5,01	1,2	5,58
80	40	3	7	0,448	10	20	4,4	42,23	3,1	11,44	1,61	49,92	9,44	16,16	3,37	3,75	1,86	2,58	0,92	3,46
		2	5	0,698	33	16,5	3,02	30,01	3,15	7,92	1,62	35,19	6,74	24,78	3,42	2,73	1,41	8,27	0,95	2,37
	50	3	7	0,546	13,3	20	5	51,13	3,2	22,84	2,14	67,68	11,24	22,56	3,68	6,29	2,87	3,43	1,12	3,93
135	75	6	14	0,525	9,1	15,8	15,5	428,01	5,25	149,63	3,11	533,79	56,43	106,86	5,87	43,84	12,52	16,22	1,68	12,16
200	60	5	12	0,21	9	34	14,88	794,07	7,36	63,62	2,07	828,48	71,95	100,51	7,46	29,21	15,82	8,48	1,4	11,68
	87	6	14	0,361	11,1	34	20,84	1227,45	7,67	237,53	3,38	1376,68	111,38	169,96	8,03	88,3	18,44	28,33	2,06	16,38
250	80	5	12	0,224	43,2	12,6	19,37	1679,43	9,31	155,45	2,83	1764,18	126,76	134,35	9,64	70,69	3,1	20,05	1,91	15,21
340	50	3	7	0,069	106,6	13,3	12,8	1720,04	11,59	229,01	1,33	1728,39	99,92	101,17	11,61	14,55	0,47	4,72	1,06	10,04

Примечание. Профили по этому сортаменту изготовляют из углеродистой спокойной и низколегированной стали с временным сопротивлением разрыву более 461 МПа (в том числе из стали марок С255 и С345 по ГОСТ 27772-88*).

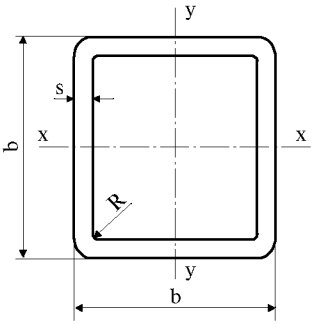


Таблица 2.20. Сортамент гнутых замкнутых сварных профилей квадратного сечения по ТУ 36-2287-80 (квадратные трубы)

b	s	Площадь поперечного сечения, см^2	Справочные значения для осей $x–x$ и $y–y$			Масса 1 м длины, кг
мм			$J_x = J_y$, см^4	$W_x = W_y$, см^3	$i_x = i_y$, см	
80	3	9,24	91,4	22,8	3,14	7,26
	4	12,16	117,3	29,3	3,10	9,54
	5	15	141,2	35,3	3,07	11,77
	6	17,76	163,1	40,7	3,03	13,94
100	3	11,64	182,7	36,5	3,96	9,13
	4	15,36	236,3	47,2	3,92	12,05
	5	19	286,5	57,3	3,89	14,92
	6	22,56	333,5	66,7	2,84	17,71
120	3	14,04	320,5	53,4	4,77	11,02
	4	18,56	416,7	69,4	4,74	14,57
	5	23	507,9	84,6	4,69	18,06
	6	27,36	594,2	99	4,66	21,48
140	4	21,76	671,3	95,9	5,55	17,08
	5	27	821,2	117,3	5,51	21,19
	6	32,16	964,3	137,7	5,48	25,24
	7	37,24	1100,9	157,2	5,44	29,23
	8	42,24	1231,1	175,8	5,39	33,16
160	4	24,96	1013	126,6	6,37	19,6
	5	31	1242,5	155,3	6,33	24,33
	6	36,96	1463,1	182,8	6,29	29,01
	7	42,84	1674,9	209,3	6,25	33,63
	8	48,64	1878,1	234,7	6,21	38,18
180	5	35,0	1787,9	198,6	7,15	27,47
	6	41,76	2109,7	234,4	7,11	32,78
	7	48,44	2420,2	268,9	7,07	38,02
	8	55,04	2719,7	302,1	7,03	43,21

Примечание. См. примечание к табл.2.21.

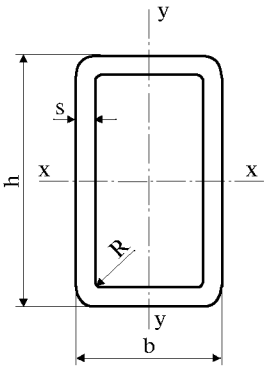


Таблица 2.21. Сортамент гнутых замкнутых сварных профилей прямоугольного сечения по ТУ 67-2287-80 (прямоугольные трубы)

h	b	s	Площадь поперечного сечения, см^2	Справочные значения для осей						Масса 1 м длины, кг
				x–x			y–y			
мм				J_x,, см^4	W_x,, см^3	i_x,, см	J_y,, см^4	W_y,, см^3	i_y,, см	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
100	60	3	9,24	126,2	25,2	3,69	56,6	18,9	2,47	7,25
		4	12,16	162,6	32,5	3,66	72,2	24,1	2,44	9,55
		5	15	196,2	39,2	3,62	86,2	28,7	2,4	11,78
		6	17,76	227,4	45,5	3,58	99	33	2,36	13,94
120	80	3	11,64	238,4	39,7	4,53	127	31,7	3,3	9,14
		4	15,36	309	51,5	4,48	164	41	3,27	12,06
		5	19	375,6	62,6	4,44	198	49,5	3,23	14,92
		6	22,56	438,2	73	4,4	229	57,2	3,19	17,71
140	60	4	15,36	375,3	53,6	4,94	97,3	16,2	2,52	12,06
		5	19	456,6	65,2	4,9	117	39	2,48	14,92
		6	22,56	533,1	76,2	4,86	134	44,7	2,43	17,71
140	100	4	18,56	523,4	74,8	5,31	310,1	62	4,09	14,57
		5	23	638,9	91,3	5,27	376,9	75,4	4,05	18,06
		6	27,36	748,7	106,9	5,23	439,7	88	4,01	21,48
		7	31,64	835,1	121,8	5,19	498,89	99,8	3,97	24,84
160	80	4	18,56	623,5	77,9	5,8	210	52,5	3,36	14,57
		5	23	761,9	95,2	5,75	253,9	63,5	3,32	18,06
		6	27,36	893,5	111,6	5,71	294,9	73,7	3,28	21,48
		7	31,64	1018,9	127,3	5,67	332,9	83,2	3,24	24,84
160	120	4	21,76	818,3	102,2	6,13	524,4	87,4	4,91	17,08
		5	27	1002,2	125,2	6,09	640,2	106,7	4,87	21,19
		6	32,16	1178,3	147,2	6,05	750,4	125,1	4,83	25,24
		7	37,24	1346,9	168,3	6,01	855	142,5	4,79	29,2
		8	42,24	1508,1	188,5	5,97	954,2	159	4,75	33,16
180	60	5	23	868,9	96,5	6,15	147	49	2,53	18,06
		6	27,36	1019,3	113,2	6,1	169,2	56,4	2,48	21,48
		7	31,64	1162,5	129,2	6,06	189,4	63,1	2,44	24,84

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
180	100	5	27	1175,2	130,6	6,6	467,2	93,4	4,16	21,19
		6	32,16	1382,8	153,6	6,55	545,9	109,2	4,12	25,24
		7	37,24	1581,7	175,7	6,51	620,1	124	4,08	29,2
		8	42,24	1772,3	196,9	6,48	690	138	4,04	33,16
180	140	5	31	1481,5	164,6	6,91	1003,6	143,4	5,69	24,3
		6	36,96	1746,2	194	6,87	1180	168,6	5,65	29,01
		7	42,84	2001	222,3	6,83	1348,8	192,7	5,61	33,63
		8	48,64	2246	249,5	6,79	1510,3	215,8	5,57	38,18
200	160	5	35	2092,9	209,3	7,73	1482,9	185,4	6,51	27,47
		6	41,76	2471,5	247,1	7,69	1747,8	218,5	6,47	32,78
		7	48,44	2837,5	283,7	7,65	2002,8	250,4	6,43	38
		8	55,04	3191,2	319,1	7,61	2248,1	281	6,39	43,2

Примечание. Применение профилей по сортаментам табл.2.20, и 2.21 в строительных стальных конструкциях, за исключением типовых конструкций, должно согласовываться с организациями и предприятиями-изготовителями конструкций.

2.9. Сортаменты горячекатаных профилей специального назначения

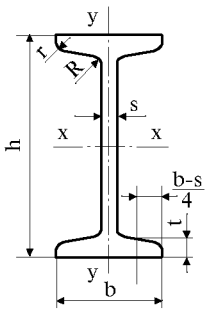


Таблица 2.22. Сортамент двутавровых балок М по ГОСТ 19425-74* для балок путей подвесного транспорта

Номер профиля	*h*	*b*	*s*	*t*	*R*	*r*	Площадь поперечного сечения, см^2	Масса 1 м, кг	Справочные значения для осей						
									x – x				*y – y*		
	мм								J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	S_x, см^3	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см
18М	180	90	7	12	9	3,5	32,9	25,8	1760	196	7,32	113	130	28,9	1,99
24М	240	110	8,2	14	10,5	4	48,7	38,3	4640	387	9,75	223	276	50,2	2,38
30М	300	130	9,0	15	12	6	64	50,2	9500	633	12,2	364	480	73,9	2,74
36М	360	130	9,5	16	14	6	73,8	57,9	15340	852	14,4	493	518	79,7	2,65
45М	450	150	10,5	18	16	7	98,8	77,6	31900	1420	18	821	892	119	3

Примечания. 1. Профили 30М, 36М и 45М поставляются также по техническим условиям ТУ 14-2-247-80. 2. Уклон внутренних граней полок не более 12%.

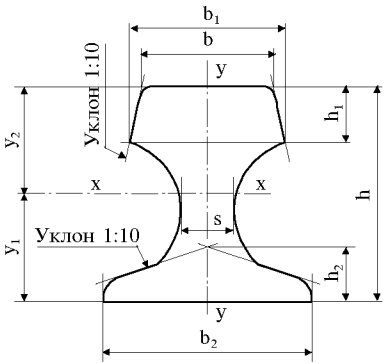
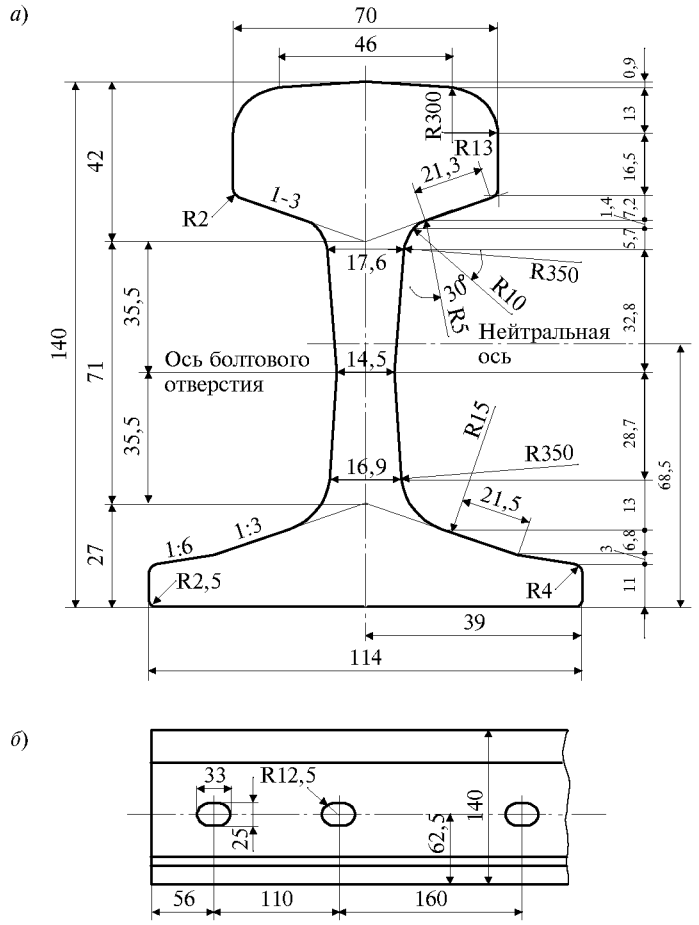


Таблица 2.23. Сортамент крановых рельсов по ГОСТ 4121-76*

Тип рельса	b	b_1	b_2	s	h	h_1	h_2	R	$R_А$	$R_Б$	r	r_1	r_2
	Размер рельса, мм												
КР 70	70	76,5	120	28	120	32,5	24	400	23	38	6	6	1,5
КР 80	80	87	130	32	130	35	26	400	26	44	8	6	1,5
КР 100	100	108	150	38	150	40	30	450	30	50	8	8	2
КР 120	120	129	170	44	170	45	35	500	34	56	8	8	2
КР 140	140	150	170	60	170	50	40	700	40	60	10	10	3

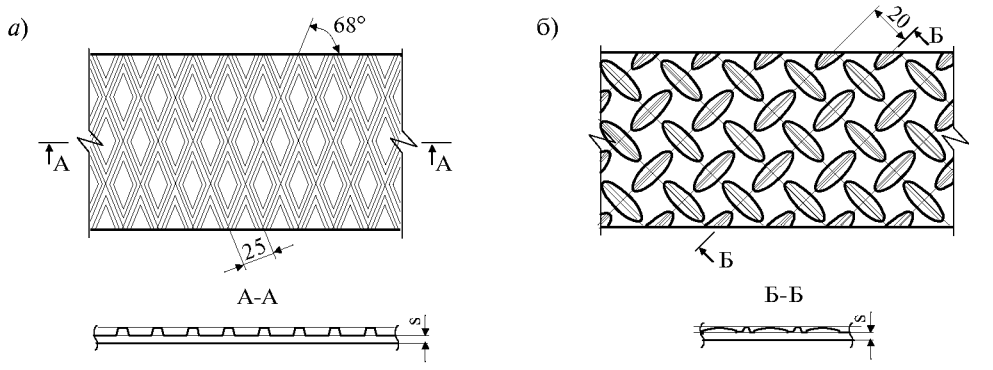
Тип рельса	Площадь поперечного сечения рельса, см^2	Справочные данные для осей x–x и y–y									Масса 1 м рельса, кг
		Расстояние до центра тяжести, см		Момент инерции, см^4			Момент сопротивления, см^3				
		y_1	y_2	J_x	J_y	J_p	$W_1 = \frac{J_x}{y_1}$	$W_2 = \frac{J_x}{y_2}$	$W_3 = \frac{J_y}{0{,}5b_2}$	W_p	
КР70	67,22	5,93	6,07	1083,25	319,68	1402,92	178,33	178,46	53,28	167,54	52,77
КР 80	81,84	6,47	6,53	1523,69	468,55	1992,24	233,37	233,34	72,08	218,71	64,24
КР 100	113,44	7,63	7,37	2805,88	919,52	3725,4	367,86	380,72	122,66	350,92	89,05
КР 120	150,69	8,69	8,31	4794,22	1671,96	6466,18	551,69	576,92	196,7	535,59	118,29
КР 140	187,24	8,75	8,25	5528,27	2608,71	8136,98	632,07	670,09	306,91	673,89	146,98

Таблица 2.24. Железнодорожный рельс типа Р43 по ГОСТ 7173-54*, используемый в качестве кранового рельса



Площадь поперечного сечения	57 см^2
Расстояние до центра тяжести:	
от низа подошвы	6,9 см
от верха головки	7,1 см
Момент инерции относительно осей:	
горизонтальной	1489 см^4
вертикальной	260 см^4
Момент сопротивления:	
по низу подошвы	217,3 см^3
по верху головки	208,3 см^3
по боковой грани подошвы	45 см^3
Теоретическая масса 1 м рельса (без отверстий)	44,65 кг

Таблица 2.25. Сортамент горячекатаных листов с ромбическим (*а*) и чечевичным (*б*) рифлением по ГОСТ 8568-77*

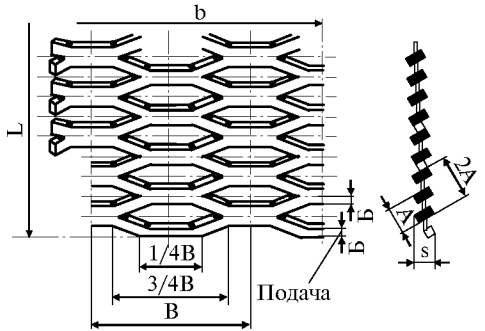


Толщина основания листа, мм	Ширина основания рифлей *b*, мм		Угол при вершине рифлей φ, град		Длина рифлей *l*, мм	Радиус закругл. рифлей *R*, мм	Расположение рифлей на плоскости листа φ_1, град	Масса 1 м² листа, кг	Предельное отклонение по массе, %
	номинальная	предельное отклонение	номинальный	предельное отклонение					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ромбическое рифление									
2,5	5	±0,15	28	±2	–	–	–	21	±10
3	5	±0,15	28	±2	–	–	–	25,1	±10
4	5	±0,15	28	±2	–	–	–	33,5	±8
5	5	±0,15	28	±2	–	–	–	41,8	±6
6	5	±0,15	28	±2	–	–	–	50	±5
8	5	±0,15	28	±2	–	–	–	66,8	±5
10	5	±0,15	28	±2	–	–	–	83	±3
12	5	±0,15	28	±2	–	–	–	99,3	±3
Чечевичное рифление									
2,5	3,6	±0,15	45	±1	24	30	45	20,1	±10
3	4	±0,15	45	±1	24	30	45	24,2	±10
4	4	±0,15	45	±1	24	30	45	32,2	±8
5	5	±0,15	45	±1	24	30	45	40,5	±6
6	5	±0,15	45	±1	24	30	45	48,5	±5
8	6	±0,15	45	±1	24	30	45	64,9	±5
10	6	±0,15	45	±1	24	30	45	80,9	±3
12	6	±0,15	45	±1	24	30	45	96,8	±3

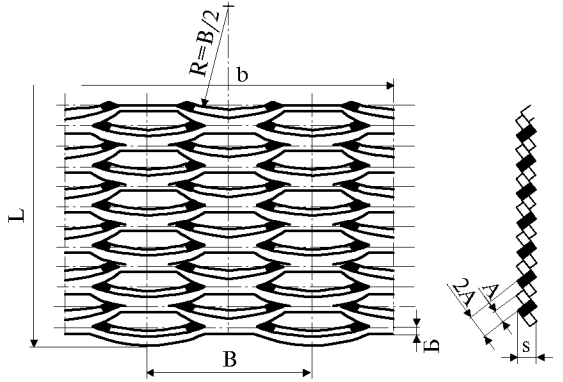
Примечание. Высота рифлей 0,2–0,3 толщины основания листа, но не менее 0,5 мм. По требованию потребителя листы толщиной основания 5 м и более должны иметь высоты рифлей не менее 1 мм (п.1.3. ГОСТ 8568–77).

Таблица 2.26. Сортамент просечно-вытяжных листов по ТУ 36.26.11-5-89 (размеры, мм)

а)



б)

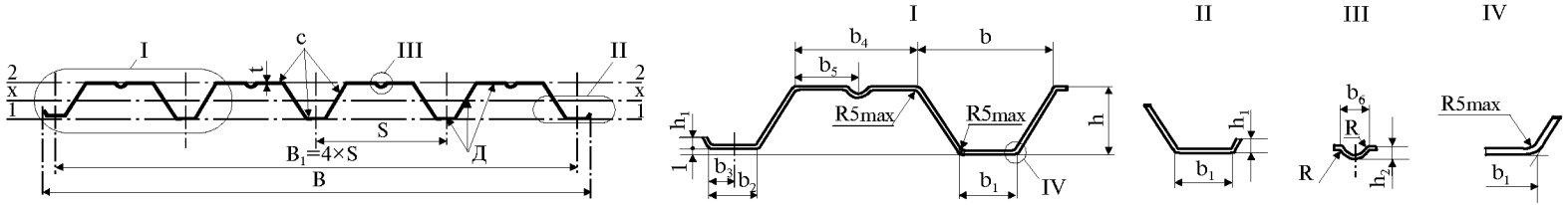


Номер листа	Толщина заготовки δ	Подача Б, мм	Шаг ячейки, *B*	Толщина листа s, (справочно)	Размер вытяжки за каждый ход штамповки A	Предельная нагрузка на 1 м длины, кг, при ширине листа, мм									Масса 1 м^2, кг
						500	600	700	800	900	1000	1100	1250	1400	
406	4	6	90	12,7	10	470	390	320	290	260	–	–	–	–	15,7
506	5	6	110	13	12,5	790	660	560	500	440	400	360	320	280	16,4
508	5	8	110	16,8	12,5	1370	1140	970	860	760	680	620	550	490	20,9
510	5	10	110	20,5	12,5	2160	1800	1520	1350	1200	1080	980	870	770	24,7
606	6	6	125	13,4	15	970	810	680	610	540	490	440	390	350	17,3
608	6	8	125	17,1	15	1910	1590	1340	1190	1060	950	870	760	680	21,9
610	6	10	125	20,8	15	2880	2400	2030	1800	1600	1440	1310	1150	1030	26

Примечания. 1. Просечно-вытяжные листы изготовляют из горячекатаного листового проката из стали марок Ст3кп, Ст3пс и Ст3сп по ГОСТ 380-88* (а также из стали марки С235 по ГОСТ 27772-88*). 2. Значения предельной нагрузки указаны для сосредоточенной по центральной линии нагрузки при защемленных концах. При равномерно распределенной нагрузке указанные в таблице значения увеличиваются в 2,2 раза. При свободном опирании предельные нагрузки уменьшаются соответственно вдвое.

2.10. Сортаменты гофрированных профилей (профилированных листов)

Таблица 2.27. Сортамент профилированных листов типа Н высотой 57 и 60 мм по ГОСТ 24045-94

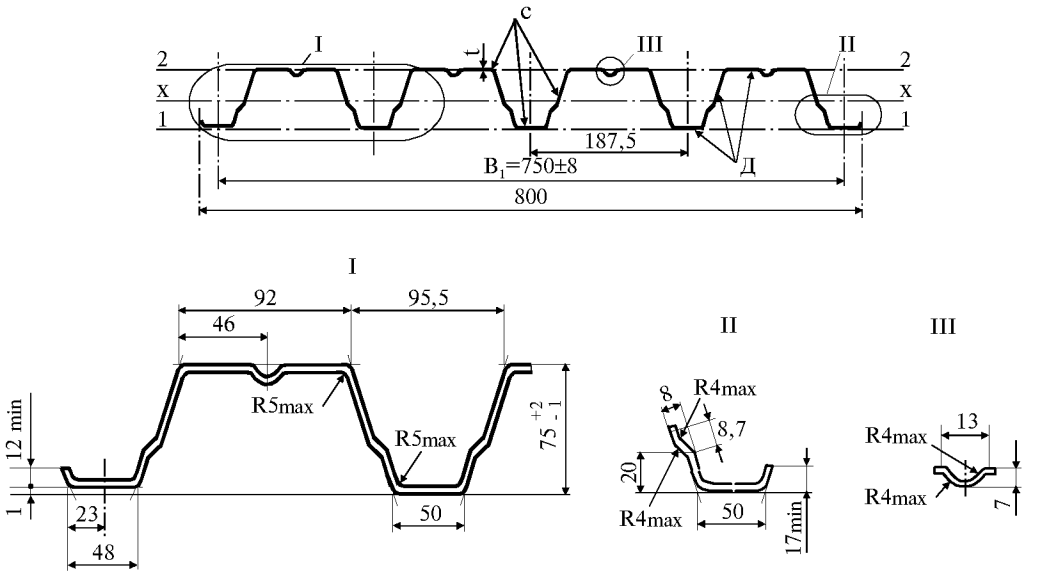


Обозначение профилированного листа	Размер сечения, мм														
	h	B_1	*t*	*B*	*b*	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	h_1, не менее	h_2	R_1, не более	*S*
Н57-750-0,7 Н57-750-0,8	57	750	0,7 0,8	801	94,5	44	42	20	93	46,5	18	10	7	4	187,5
Н60-845-0,7 Н60-845-0,8 Н60-845-0,9	60	845	0,7 0,8 0,9	902	89,5	50	47	22	122	61	16	14	5	3,5	211,2

Обозначение профилированного листа	Площадь сечения *A*, см^2	Масса 1 м длины, кг	Справочные значения на 1м ширины						Масса 1 м^2, кг	Ширина заготовки, мм
			При сжатых узких полках			При сжатых широких полках				
			момент инерции	момент сопротивления, см^3		момент инерции	момент сопротивления, см^3			
			J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}	J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}		
Н57-750-0,7	7,7	6,5	53,8	14,8	21,1	53,8	16,4	19,7	8,7	1100
Н57-750-0,8	8,8	7,4	61,2	17,9	24,4	61,2	18,9	24	9,8	
Н60-845-0,7	8,8	7,4	62,1	14,6	24,4	59,1	16,5	18,7	8,8	1250
Н60-845-0,8	10	8,4	70,6	17,7	28,1	69,9	19	22,7	9,9	
Н60-845-0,9	11,3	9,3	79	20,9	31,8	78,7	21,5	27	11,1	

Примечания. 1. Листы типа Н предназначены для настилов покрытий. 2. Листы изготовляют из тонколистовой оцинкованной стали по ГОСТ 14918-80* или из тонколистовой оцинкованной стали с повышенными прочностными свойствами по ТУ 14-1-3432-82 и ТУ 14-1-3584-83. 3. По требованию потребителя листы изготовляют с защитно-декоративным лакокрасочным покрытием.

Таблица 2.28. Сортамент профилированных листов типа Н высотой 75 мм по ГОСТ 24045-94

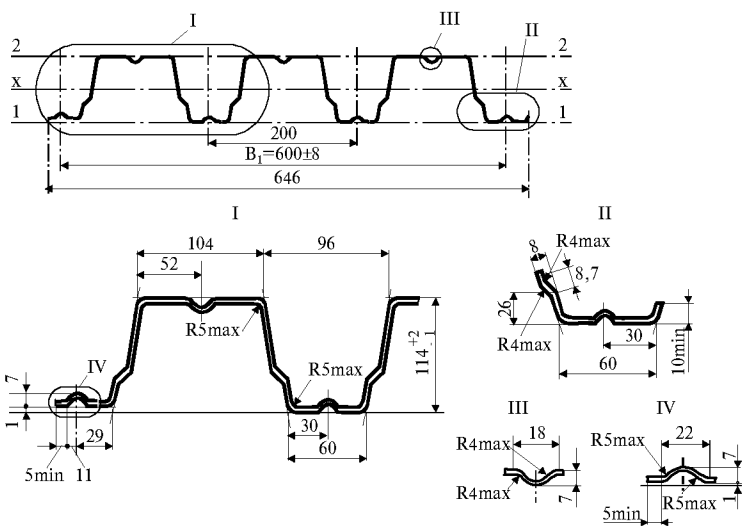


Обозначение профилированного листа	t, мм	Площадь сечения A, см^2	Масса 1 м длины, кг	Справочные значения на 1м ширины						Масса 1 м^2, кг	Ширина заготовки, мм
				При сжатых узких полках			При сжатых широких полках				
				момент инерции	момент сопротивления, см^3		момент инерции	момент сопротивления, см^3			
				J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}	J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}		
Н75-750-0,8	0,8	10	8,4	114,9	25,8	32,2	114,9	28,5	33,1	11,2	1250
Н75-750-0,9	0,9	11,3	9,3	129,6	30,2	37,6	129,6	31,6	38	12,5	

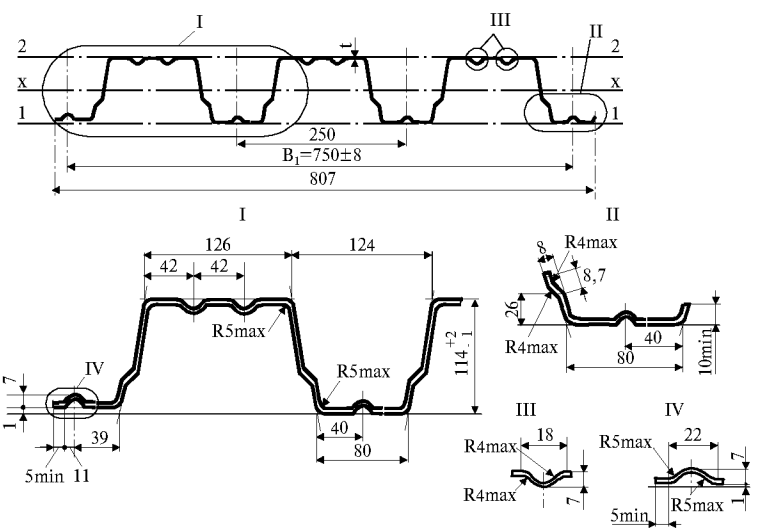
Примечание. См. примечания к табл. 2.27

Таблица 2.29. Сортамент профилированных листов типа Н высотой 114 мм, шириной 600 и 750 мм по ГОСТ 24045-94

а)



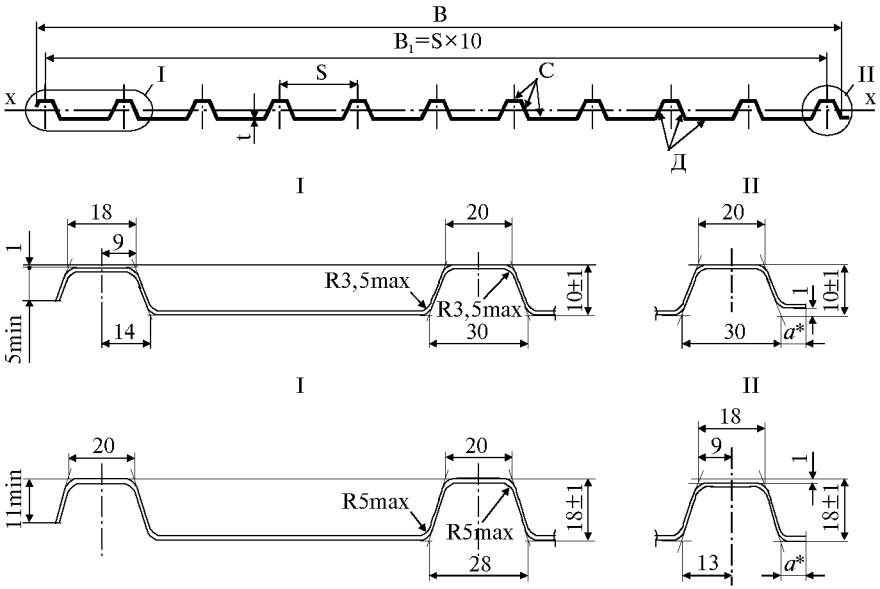
б)



Обозначение профилированного листа	*t*, мм	Площадь сечения *A*, см^2	Масса 1 м длины, кг	Справочные значения на 1м ширины						Масса 1 м^2, кг	Ширина заготовки, мм
				При сжатых узких полках			При сжатых широких полках				
				момент инерции	момент сопротивления, см^3		момент инерции	момент сопротивления, см^3			
				J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}	J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}		
Н114-600-0,8	0,8	10	8,4	320,9	53,3	59,7	320,9	52,4	55,8	14	1250
Н114-600-0,9	0,9	11,3	9,3	361	60	67,2	361	59,6	65,9	15,6	
Н114-600-1	1	12,5	10,3	405,4	67,6	75	405,4	67,6	75	17,2	
Н114-750-0,8	0,8	11,2	9,4	307,9	51,2	57,1	307,9	51,2	57,1	12,5	1400
Н114-750-0,9	0,9	12,6	10,5	345,2	57,4	64	345,2	57,4	64	14	
Н114-750-1	1	14	11,7	383,6	63,8	71,1	383,6	63,8	71,1	15,4	

Примечание. См. примечания к табл. 2.27

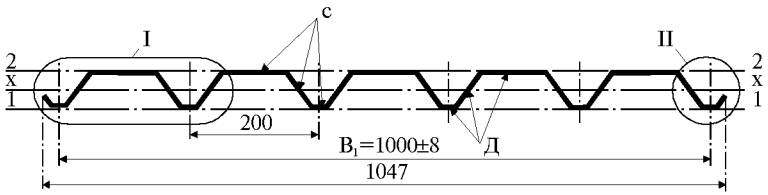
Таблица 2.30. Сортамент профилированных листов типа С высотой 10 и 18 мм по ГОСТ 24045-94

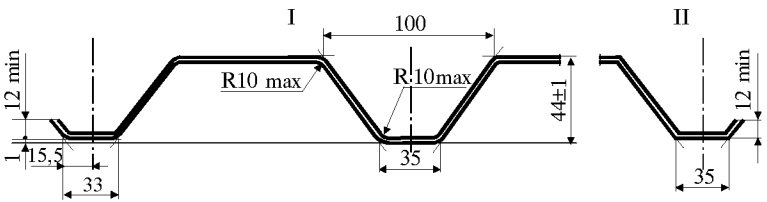


Обозначение профилированного листа	Размер сечения, мм				Площадь сечения A, см^2	Масса 1 м длины, кг	Справочное значение – момент инерции на 1 м ширины при сжатых широких полках J_x, см^4	Масса 1 м^2, кг	Ширина заготовки, мм
	B	B_1	t	Число гофров, n					
С10-899-0,6	918	899	0,6	9	6	5,1	0,81	5,7	1000
С10-899-0,7			0,7		7	5,9	0,97	6,6	
С10-1000-0,6	1022	1000	0,6	10	6,6	5,6	0,8	5,6	1100
С10-1000-0,7			0,7		7,7	6,5	0,98	6,5	
С18-1000-0,6	1023	1000	0,6	10	7,5	6,4	3,04	6,4	1250
С18-1000-0,7			0,7		8,8	7,4	3,59	7,4	

Примечания. 1. Листы типа С предназначены для обшивки стен. 2. См. примечания 2, 3 к табл. 2.27; * – технологический размер $a \geq 0$.

Таблица 2.31. Сортамент профилированных листов типа С высотой 44 мм по ГОСТ 24045-94





Обозначение профилированного листа	t, мм	Площадь сечения A, см^2	Масса 1 м длины, кг	Справочные значения на 1м ширины						Масса 1 м^2, кг	Ширина заготовки, мм
				При сжатых узких полках			При сжатых широких полках				
				момент инерции	момент сопротивления, см^3		момент инерции	момент сопротивления, см^3			
				J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}	J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}		
С44-1000-0,7	0,7	8,8	7,4	25,4	9,3	15,2	20,7	8,3	8,5	7,4	1250
С44-1000-0,8	0,8	10	8,4	29	10,6	17,4	23,7	9,5	9,7	8,4	

Примечания. 1. Листы типа С предназначены для обшивки стен. 2. См. примечания 2, 3 к табл.2.27.

Таблица 2.32. Сортамент профилированных листов типа НС высотой 40 и 44 мм по ГОСТ 24045-94

Обозначение профилированного листа	Размер сечения, мм				Площадь сечения А, см^2	Масса 1 м длины, кг	Справочные значения на 1 м ширины						Масса 1 м^2, кг	Ширина заготовки, мм
							При сжатых узких полках			При сжатых широких полках				
	h	B	B_1	t			момент инерции	момент сопротивления, см^3		момент инерции	момент сопротивления, см^3			
							J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}	J_x, см^4	W_{x1}	W_{x2}		
НС40-800-0,6	40	852	800	0,6	6,6	5,6	23,3	10,5	13	22,3	9,8	9,4	7,1	1100
НС40-800-0,7				0,7	7,7	6,5	27,1	12,2	15,1	27,1	11,8	12,1	8,1	
НС44-1000-0,7	44	1052	1000	0,7	9,8	8,3	32,9	13,4	16,8	32,9	13	13,6	8,3	1400

Примечания. 1. Листы типа НС предназначены для настилов покрытий и обшивки стен. 2. См. примечания 2, 3 к табл.2.27.

Таблица 2.33. Сортамент профилированных листов из атмосферостойкой низколегированной стали по ТУ 67-18-152-89

Обозначение профилированного листа	Рисунок к таблицам	Масса 1 м длины, кг	Масса 1 м^2, кг
Н57–750–0,7	2.27	6,5	8,7
Н57–750–0,8	2.27	7,4	9,8
Н60–845–0,7	2.27	7,4	8,8
Н60–845–0,8	2.27	8,4	9,9
Н60–845–0,9	2.27	9,3	11,1
Н75–750–0,8	2.28	8,4	11,2
Н75–750–0,9	2.28	9,3	12,5
НС40–800–0,7	2.32	6,5	8,1
НС44–1000–0,7	2.32	8,3	8,3
С18–1000–0,7	2.30	7,4	7,4
С44-1000–0,7	2.31	7,4	7,4

Примечание. Профилированные листы изготовляют из рулонной холоднокатаной низколегированной атмосферостойкой стали марок 10ХНДП категории 3 по ГОСТ 17066-94 и 10 ХДП по ТУ 14-1-1217-75.

2.11. Сортамент электросварных труб



Таблица 2.34. Ограниченный сортамент электросварных прямошовных труб по ГОСТ 10704-91

Наружный диаметр трубы	Толщина стенки трубы	Площадь сечения, см^2	Радиус инерции, см	Масса 1 м трубы, кг
мм				
1	2	3	4	5
83	3	7,54	2,84	5,92
	3,5	8,74	2,82	6,86
	4	9,92	2,80	7,79
	4,5	11,1	2,78	8,71
	5	12,3	2,76	9,62
89	3	8,10	3,04	6,36
	3,5	9,40	3,03	7,38
	4	10,7	3,01	8,38
	4,5	11,9	2,99	9,38
	5	13,2	2,97	10,36
102	2,5	7,81	3,52	6,13
	3	9,32	3,50	7,32
	3,5	10,8	3,49	8,50
	4	12,3	3,47	9,67
	4,5	13,8	2,46	10,82
	5	15,2	3,44	11,96
114	3	10,5	3,93	8,21
	3,5	12,2	3,91	9,54
	4	13,8	3,89	10,85
	4,5	15,5	3,88	12,15
	5	17,1	3,86	13,44

Продолжение табл.2.34

1	2	3	4	5
127	3	11,7	4,39	9,17
	3,5	13,6	4,37	10,66
	4	15,5	4,35	12,13
	4,5	17,3	4,34	13,59
	5	19,2	4,32	15,04
	5,5	21	4,3	16,48
140	3,5	15	4,83	11,78
	4	17,1	4,82	13,42
	4,5	19,2	4,80	15,04
	5	21,2	4,78	16,65
	5,5	23,2	4,76	18,24
152	3,5	16,3	5,26	12,82
	4	18,6	5,24	14,6
	4,5	20,8	5,22	16,37
	5	23,1	5,2	18,13
	5,5	25,3	5,19	19,87
159	3,5	17,1	5,5	13,42
	4	19,5	5,48	15,29
	4,5	21,8	5,47	17,15
	5	24,2	5,45	18,99
	6	28,8	5,42	22,64
	7	33,4	5,38	26,24
168	4	20,6	5,8	16,18
	4,5	23,1	5,78	18,14
	5	25,6	5,77	20,1
	6	30,5	5,74	23,97
	7	35,4	5,7	27,79
	8	40,2	5,66	31,57
203	4	25	7,04	19,63
	5	31,1	7,01	24,41
	6	37,1	6,97	29,14
	7	43,1	6,94	33,83
	8	49,1	6,91	38,47
219	4	27	7,6	21,21
	4,5	30,3	7,59	23,8
	5	33,6	7,57	26,39
	5,5	36,9	7,55	28,96
	6	40,2	7,54	31,52
	7	46,6	7,51	36,6
	8	53	7,47	41,63
273	4,5	38	9,5	29,8
	5	42,1	9,48	33,04
	5,5	46,2	9,46	36,28
	6	50,3	9,45	39,51
	7	58,5	9,42	45,92
	8	66,6	9,38	52,82
325	5	50,3	11,3	39,46
	6	60,1	11,3	47,2
	7	69,9	11,2	54,89
	8	79,6	11,2	62,54
426	5	66,1	14,9	51,91
	6	79,2	14,9	62,14
	7	92,1	14,8	72,33
	8	105	14,8	82,46
	9	118	14,8	92,56

2.12. Стальные канаты

Канаты используют в элементах конструкций, воспринимающих исключительно растягивающие усилия. При этом не требуется развитие сечений по условиям устойчивости и создается возможность эффективного применения сталей высокой прочности с полным использованием несущей способности материала, снижением расхода металла и уменьшением собственного веса конструкций. Вместе с тем, из-за малого диаметра элементов, образующих канат, особое внимание должно быть обращено на защиту от коррозии.

2.12.1. Канатная проволока. Канаты формируют из *высокопрочной стальной проволоки* с размером сечения до 5–7 мм, получаемой из заготовок диаметром до 10-12 мм путем прокатки и многократного волочения через фильеры (отверстия в пластинках из твердого сплава) с применением термической обработки. В процессе изготовления проволоки предел прочности повышается в 2–4 раза, однако пластические свойства существенно снижаются.

По форме поперечного сечения различают *канатную проволоку* круглого и фасонного (зетобразного, иксобразного или трапециевидного) сечений.

По виду поверхности различают проволоку: светлую (без покрытия) и оцинкованную трех групп в зависимости от поверхностной плотности цинка: с толстым слоем цинка для особо жестких в коррозионном отношении условий работы (ОЖ), со слоем цинка средней толщины для жестких условий работы (Ж), со слоем цинка небольшой толщины для средних условий работы (С). По специальным техническим условиям готовят проволоку с покрытием слоем алюминия или полимерных материалов.

Временное сопротивление разрыву проволоки характеризуется маркировочной группой 1078-2352 МПа.

Механические свойства проволоки по однородности и пластическим свойствам характеризуются марками ВК (высокого качества), В и I, которые отличаются заданным разбегом временного сопротивления проволок, числом перегибов и скручиваний проволоки до разрушения – наибольшими для группы ВК и меньшими – для групп В и I.

2.12.2. Классификация канатов. *По конструкции* различают канаты (пучки) из параллельных проволок и витые канаты. В нашей стране изготовляются только витые канаты; канаты из параллельных проволок готовят только при строительстве отдельных крупных объектов (преимущественно мостов) непосредственно на монтаже или на припостроечном полигоне.

По виду поперечного сечения различают круглые и плоские витые канаты.

По типу свивки круглые витые канаты разделяются на следующие типы: канаты одинарной свивки (спиральные) с расположением проволок в концентрических кольцевых слоях, двойной и тройной свивки (многопрядные). Канаты двойной свивки образованы из спиральных канатов (прядей); одна прядь (сердечник) располагается в центре, а остальные – в концентрических слоях по спиральным линиям. Канаты тройной свивки состоят из свитых канатов двойной свивки (стренг).

По точности изготовления различают канаты нормальной (без обозначения) и повышенной (Т) точности.

Спиральные канаты могут быть образованы только из круглых проволок; *закрытые* спиральные канаты отличаются использованием в одном или нескольких внешних слоях фасонных проволок зетобразного, трапециевидного или иксобразного сечений.

По виду сердечника различают витые канаты с металлическим (мс) и органическим (ос) сердечником, а также с сердечником из искусственных материалов (ис) и из металлической проволоки малой прочности (мсм).

По типу свивки канатов одинарной свивки (в том числе прядей) различают канаты с точечным касанием проволоки между слоями (ТК) и с линейным касанием (ЛК), а также различные модификации с одинаковым (ЛК-О) и разным (ЛК-Р) диаметром проволок по слоям, с проволоками заполнения (ЛК-З), с сочетанием слоев проволок одинаковых и разных диаметров (ЛК-РО), с комбинированным точечно-линейным касанием (ТЛК)

По направлению свивки различают канаты правой (без обозначения) и левой (Л) свивки. По сочетанию направлений свивки многопрядных канатов и их элементов различают канаты крестовой свивки (без обозначения), в которых направления свивки каната и составляющих его прядей и стренг противоположны; канаты односторонней свивки (О), в которых одинаковы направления свивки каната и наружных слоев прядей; канаты комбинированной свивки (К) с чередующимися направлениями свивки прядей.

По способу свивки различают: канаты нераскручивающиеся (Н), в которых пряди (для многопрядных канатов) или проволоки (для спиральных канатов) сохраняют свое положение после снятия перевязок или заварки с конца каната; канаты раскручивающиеся (Р), не обладающие указанными выше качествами.

По степени крутимости различают канаты крутящиеся (без обозначения) с одинаковым направлением всех прядей и стренг и малокрутящиеся (МК) – многослойные канаты с противоположным направлением свивки в слоях. По временному сопротивлению разрыву (маркировочной группе), механическим свойствам (групп ВК, В и I) и виду покрытия проволок канаты различают по соответствующим характеристикам канатной проволоки, из которой образован канат (см.выше).

По назначению различают канаты грузолюдские (ГЛ) только марки В, а также грузовые. Конструкция, основные характеристики и диаметры канатов приведены в соответствующих стандартах на сортамент канатов; имеются стандарты – технические условия на канаты и на канатную проволоку.

Условное обозначение каната должно отвечать требованиям соответствующего сортаментного стандарта и включать: диаметр каната, назначение, марку, вид покрытия, направление свивки, сочетание направлений свивки, способ свивки, степень крутимости, маркировочную группу, номер стандарта на сортамент. Стандартами–техническими условиями предусмотрена возможность предъявления потребителем некоторых дополнительных требований.

В процессе изготовления проволока, пряди и канаты покрываются *смазкой* в определенной степени способствующей антикоррозионной защите. Могут быть предъявлены требования по типу смазки, по поставке канатов со смазанной или несмазанной наружной поверхностью. Может быть регламентирован *шаг свивки* проволок в прядях и прядей в канате; шаг свивки численно характеризуется кратностью – отношением длины шага свивки проволоки (пряди) к диаметру пряди (каната). Потребителем устанавливается и длина каната.

2.12.3. Рекомендации по выбору типов канатов и их параметров. При выборе типов и параметров канатов, в первую очередь, необходимо учитывать требования эксплуатации сооружения; должны быть учтены также условия возведения и экономические требования. По условиям защиты от коррозии в металлических конструкциях постоянных сооружений не следует применять канаты с проволокой диаметром менее 2,4 мм (в мостах – 2,6 мм); это ограничение не относится к проволокам заполнения и сердечника. Во всех случаях следует использовать канаты из проволоки максимально возможного диаметра.

В конструкциях следует применять только канаты с проволокой, имеющей металлическое (цинковое или алюминиевое) покрытие; применение светлой (неоцинкованной) проволоки для металлических конструкций постоянных сооружений не допускается.

Выбор типа металлического покрытия по толщине (ОЖ, Ж или С) производится в зависимости от степени агрессивного воздействия по СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии», обязательное приложение II. При высокой степени агрессивности предусматривают дополнительную защиту канатов лакокрасочными покрытиями или полимерными пленками, которые, как правило, наносят на монтаже.

В целях экономии металла следует использовать канаты максимальных по прочности маркировочных групп сортаментного стандарта, но не более 1764 МПа, поскольку оцинкованная проволока высокой прочности при агрессивных воздействиях среды может проявлять склонность к хрупкому коррозионному разрушению под напряжением («водородная хрупкость»).

Канаты из параллельных проволок отличаются высокой прочностью, продольной жесткостью (модуль упругости каната близок к модулю упругости проволоки). Ползучесть при эксплуатации практически отсутствует, поэтому нет необходимости в предварительной вытяжке. К недостаткам этих канатов можно отнести повышенную изгибную жесткость, осложняющую перевозку, монтаж и устройство перегибов в опорных узлах. Из-за отсутствия в стране налаженного промышленного производства канаты из параллельных проволок могут быть рекомендованы лишь для особо ответственных сооружений с большим объемом потребления (свыше 500–1000 т), с получением по импорту или с изготовлением на месте монтажа.

В остальных случаях в строительных конструкциях применяют круглые *витые* канаты грузовые (Г) одинарной (спиральные) и двойной свивки нормальной точности. Канаты тройной свивки из-за повышенной деформативности мало пригодны для использования в качестве несущих элементов.

Из-за неравномерного распределения усилий между проволоками и их взаимного проскальзывания разрывное усилие витого каната в целом (определенное при испытаниях образцов каната на разрывной машине) ниже суммарного разрывного усилия проволок, составляющих канат; по той же причине модуль упругости каната значительно ниже модуля упругости материала проволок.

Это снижение для спиральных канатов невелико (порядка 5 % – по прочности и 15 %–по жесткости). Поэтому *спиральные* канаты лучше отвечают условиям эксплуатации в строительных конструкциях. Необходимо учитывать, что диаметр спиральных оцинкованных канатов из круглых проволок, выпускаемых в стране, не превышает 18,5 мм.

Закрытые спиральные канаты обладают повышенной коррозионной стойкостью благодаря наличию фасонных проволок во внешних слоях и могут быть рекомендованы для широкого применения в строительных конструкциях, особенно при необходимости сформирования элементов с большими расчетными усилиями (50 т и более) и при отсутствии промежуточных перегибов по длине каната Необходимо учитывать, однако, повышенную по сравнению с многопрядными канатами сложность выполнения работ по устройству концевых закреплений и по монтажу. Вопросы поставки закрытых канатов из оцинкованной проволоки должны быть согласованы с изготовителем.

Канаты двойной свивки для элементов постоянных сооружений следует применять только из круглых прядей с металлическим сердечником, поскольку наличие органического сердечника ведет к снижению продольной жесткости и коррозионной стойкости каната. Снижение разрывного усилия каната в целом по сравнению с суммарным разрывным усилием всех проволок достигает 15–20 %, а уменьшение модуля упругости каната по сравнению с модулем упругости проволок – 25–35 %.

Предпочтительно использование канатов с линейным касанием проволок (ЛК) и их модификаций, в которых уменьшены контактные напряжения между прово-

локами и деформации ползучести по сравнению с канатами, имеющими точечное (ТК) касание проволок.

Нераскручивающиеся канаты (Н) удобнее при изготовлении канатных элементов и монтаже, чем раскручивающиеся. Некоторые специалисты отмечают снижение агрегатной прочности нераскручивающихся канатов по сравнению с раскручивающимися, однако это снижение не имеет практического значения, тем более, что имеются данные о повышенной выносливости нераскручивающихся канатов. В случае применения раскручивающихся канатов необходимо предусматривать удлиненные обвязки мягкой проволокой по концам канатов у анкеров.

Как правило, не имеют значения для канатов в строительных конструкциях направления свивки и их сочетания. В тех случаях, когда анкерные закрепления не могут воспринимать крутящие моменты, следует использовать канаты крестовой или комбинированной (К) свивки, малокрутящиеся (МК).

Элементы конструкции в виде пучков или групп канатов следует формировать из равного числа канатов правой и левой свивки.

Для элементов конструкций, воспринимающих вибрационные и динамические воздействия, а также для статически нагруженных элементов особо ответственных сооружений следует применять канаты марок ВК и В по механическим свойствам; в остальных случаях могут быть использованы канаты марки I.

Для повышения продольной жесткости и уменьшения деформации ползучести следует предусматривать канаты с максимальными величинами кратности свивки, что должно быть согласовано с изготовителем. Некоторые технические условия на канаты, специально предназначенные для строительных конструкций, содержат прямые указания об изготовлении канатов с увеличенной кратностью свивки.

При эксплуатации сооружений в районах с низкими расчетными температурами (ниже -40 °С), либо в районах с высокими летними расчетными температурами следует предусматривать по согласованию с поставщиком применение соответственно морозостойких и тугоплавких канатных смазок.

Требования к канатам для оттяжек антенных сооружений и элементов антенных полотен регламентированы. При назначении групп покрытий необходимо учитывать новые обозначения групп покрытия – ОЖ вместо ЖС, Ж вместо СС. Требования к канатам для стальных конструкций мостов регламентированы п.4.4 СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы».

При использовании в конструкциях небольших количеств канатов (до 15–20 т) необходимо учитывать возможность варьирования типов канатов по требованиям изготовителя. Требования к канатам для особо ответственных сооружений при большом объеме применения должны быть согласованы с изготовителем.

В некоторых случаях целесообразна разработка специальных технических условий для канатов конкретных объектов с учетом специфических условий эксплуатации и строительства; такие технические условия были составлены, например для канатов Останкинской телебашни, мостов через р. Амударью у Сазакино и Келифа, Шексну в Череповце, Южного моста через Днепр в Киеве и др. При этом могут быть предъявлены требования к канатам, выходящие за рамки указаний соответствующих стандартов.

При составлении заказа на канаты следует учитывать возможность раскроя на элементы требуемой длины с запасом по 1–3 м на каждый конец элемента. Необходимо учитывать ограничения длины каната на транспортном барабане, приведенные в соответствующих стандартах, а также приплаты за мерность, предусмотренные в прейскурантах.

Ниже приведен перечень действующих стандартов и технических условий на канаты, рекомендуемые для использования в строительных металлических конст-

рукциях, а также сокращенный сортамент канатов для мачтовых сооружений объектов связи.

Таблица 2.35. Сокращенный сортамент стальных оцинкованных канатов для мачтовых сооружений объектов связи

Диаметр	Расчетная площадь проволок, мм^2	Масса 1000 м каната, кг	Временное сопротивление проволок, МПа				ГОСТ, ТУ
			120	140	160	170	
			Разрывное усилие каната в целом, кН				
8	29,68	272,5	–	–	39450	41950	14954-80*
9,7	42,30	388	–	–	56300	59820	14954-80*
11	53,58	491,5	–	–	71350	75800	14954-80*
12	61,92	568	–	–	82500	87650	14954-80*
14	86,36	792	–	–	114500	122000	14954-80*
16,5	121,24	1115	–	–	161000	171500	14954-80*
18	143,99	1320	–	167500	191500	203500	14954-80*
20,5	191,11	1765	–	223500	255500	271500	14954-80*
22	217,06	1990	–	252500	289000	307000	14954-80*
25	279,27	2560	–	325000	371500	395000	14954-80*
27	337,27	3900	–	392500	449000	477000	14954-80*
30	420,57	3679	–	530000	605500	–	ТУ14-4-90-78
33	497,70	4565	–	580000	–	–	14954-80*
36	589,81	5410	–	687000	–	–	14954-80*
38	704,6	6164	–	888000	–	–	ТУ14-4-90-78
40	788,09	6894	–	995000	–	–	ТУ14-4-90-78
42	856,48	7493	–	1080000	–	–	ТУ14-4-90-78
45	988,85	8651	–	1245000	–	–	ТУ14-4-90-78
48,5	1162,85	10170	–	1465000	–	–	ТУ14-4-90-78
52	1347,99	11790	–	1685000	–	–	ТУ14-4-90-78
61,5	1782,25	16250	167000	1955000	–	–	7669-80*
64	1880,27	17148	176000	2055000	–	–	7669-80*
68	2058,71	18775	193500	2250000	–	–	7669-80*

Примечание. В пределах настоящего сортамента по согласованию с проектной организацией допустимы замены на ГОСТы 3063-80*, 3064-80*, 3068-88*, 3081-80*, 7669-80*, 7667-80*, 14954-80*.

В табл.2.36–2.41 приведен сокращенный сортамент стальных оцинкованных канатов, рекомендуемых для применения в металлических строительных конструкциях. В табл.2.39–2.41 расчетное разрывное усилие соответствует суммарному разрывному усилию всех проволок каната.

Таблица 2.36

Диаметр каната, мм	Расчетная площадь сечения всех проволок, мм^2	Расчетная масса 100 м смазанного каната, кг	Расчетное разрывное усилие, кН, не менее, для маркировочных групп (временного сопротивления проволок), Н/мм^2				
			1180	1270	1370	1470	1570
ГОСТ 18901-73*							
38,5	1003,01	858,1	1175	1270	1370	1470	1565
40,5	1089,44	931,89	1275	1385	1490	1595	1705
42,5	1213,89	1038,4	1425	1540	1660	1780	1900
45	1336,46	1142,72	1565	1700	1830	1960	2090
47	1478,89	1264,56	1730	1880	2025	2170	2315
51	1711,89	1463,53	2005	2180	2345	2510	2680
54	1950,11	1667,91	2290	2480	2675	2865	3065

Таблица 2.37

Диаметр каната, мм	Расчетная площадь сечения всех проволок, мм^2	Ориентировочная масса 1000 м смазанного каната, кг	Маркировочная группа (временное сопротивление проволок), Н/мм^2	
			1370	1570
			Разрывное усилие каната в целом, Н, не менее	
ТУ 14-4-902-78				
30	420,57	3679	519400	593390
38	704,6	6164	870240	–
40	788,09	6894	975100	–
42	856,48	7493	1058400	–
45	988,85	8651	1220100	–
48,5	1162,85	10170	1435700	–
52	1347,99	11790	1651300	–

Таблица 2.38

Диаметр каната, мм	Расчетная площадь сечения всех проволок, мм^2	Расчетная масса 100 м смазанного каната, кг	Расчетное разрывное усилие, кН, не менее, для маркировочных групп (временного сопротивления проволок), Н/мм^2					
			1180	1270	1370	1470	1570	1670
ГОСТ 3090-73*								
30,5	616,59	524,98	724,5	785	845,5	906	966,5	1020
32	673,9	573,71	792	858	924	989,5	1050	1120
34	740,18	630,06	870	942,5	1010	1085	1155	1225
35,5	800,12	681,03	940,5	1015	1095	1175	1250	1330
ГОСТ 7675-73*								
38,5	1015,9	869,8	1190	1290	1390	1485	1590	1690
40,5	1127,69	964,81	1320	1435	1540	1655	1760	1875
42,5	1223,84	1046,84	1435	1555	1675	1795	1915	2035
45	1358,76	1162,01	1595	1725	1860	1990	2125	2255
47	1476,62	1262,58	1730	1875	2020	2165	2310	2455
51	1702,89	1455,7	1995	2165	2330	2495	2665	2830
ГОСТ 7676-73*								
50	1713,8	1469,51	2010	2180	2345	2515	2685	2850
52	1846,16	1582,83	2170	2350	2525	2705	2890	3070
54	1988,1	1704,37	2335	2525	2720	2920	3115	3305
55	2016,33	1728,06	2365	2565	2760	2955	3160	3355
60	2408,69	2063,6	2830	3065	3300	3535	3770	4005
65	2763,97	2367,31	3245	3515	3785	4060	4330	4600
70	3231,84	2767,12	3795	4115	4425	4745	5065	5380

Таблица 2.39

Диаметр каната, мм	Расчетная площадь сечения всех проволок, мм^2	Ориентировочная масса 1000 м смазанного каната, кг	Суммарное разрывное усилие всех проволок в канате, Н, не менее
ТУ 14-4-1216-82			
32	688,9	6057	981969
42	1227,9	10862	1667960
52	1902,4	16848	2527420
62	2703,5	23850	3548580
72	3631	32088	4729480

Таблица 2.40

Диаметр, мм		Расчетная площадь сечения всех проволок, мм^2	Ориентировочная масса 1000 м смазанного каната, кг	Маркировочная группа (временное сопротивление проволок), Н/мм^2			
каната	проволоки в наружном слое			1180	1270	1370	1470
				Разрывное усилие каната в целом, Н, не менее			
1	2	3	4	5	6	7	8
ГОСТ 3062-80*							
6,2	2	22,65	197	–	–	28550	30600
6,8	2,2	27,33	238	–	–	34400	36900
7,4	2,4	32,45	282,6	–	–	40850	43900
8	2,6	38,01	330,5	–	–	47950	51400
8,6	2,8	44,01	382,1	–	–	55500	–
9,2	3	50,45	438,5	–	–	63650	–
9,8	3,2	57,33	498,5	–	–	72300	–
ГОСТ 3063-80*							
10	2	60,35	519	–	69220	74450	79800
11	2,2	72,95	627,4	77150	83550	89950	96100
12	2,4	86,74	746	91700	98950	106000	114500
13	2,6	101,72	873	107000	116000	124500	134000
14	2,8	117,9	1050	123500	134500	145500	–
15	3	135,28	1160	142500	151000	166500	–
16	3,2	153,84	1320	162000	175500	189500	–
17	3,4	173,6	1490	183000	–	–	–
19	3,8	216,7	1855	220000	–	–	–
ГОСТ 3064-80*							
14	2	116,89	993,6	–	125500	135500	145500
15,5	2,2	141,37	1200	141000	152000	164000	176000
17	2,4	168,17	1425	167500	181500	195500	209500
18,5	2,6	197,29	1685	196500	213000	229500	245500
20	2,8	228,74	1955	227500	246500	266500	–
21	3	262,51	2240	262000	283500	305500	–
22,5	3,2	298,52	2550	297500	322500	347000	–
24	3,4	337,03	2875	336000	–	–	–
27	3,8	420,84	3590	420000	–	–	–
ГОСТ 3066-80*							
18,5	2	158,55	1441	–	–	184000	197000
20	2,2	191,32	1739	–	–	222000	238500
22	2,4	227,17	2065	–	–	264500	283000
24	2,6	266,09	2420	–	–	310000	332000
26	2,8	308,1	2800	–	–	358500	–
27,5	3	353,17	3210	–	–	411000	–
ГОСТ 7667-80*							
31	2	439,31	4030	–	–	512000	548000
34	2,2	529,72	4860	–	–	617000	661500
37	2,4	625,74	5740	–	–	729500	781500
41	2,6	744,88	6835	–	–	866000	928500
44	2,8	864,16	7930	–	–	999500	–
47	3	989,23	9080	–	–	1145000	–

Продолжение табл. 2.40

1	2	3	4	5	6	7	8
ГОСТ 7669-80*							
35,5	2	580,11	5290	–	–	636500	682000
36,5	2,1	646,37	5895	–	–	709000	759500
39	2,2	716,29	6530	–	–	785500	842000
41	2,3	796,83	7265	–	–	874000	936500
42	2,4	843,9	7965	–	–	925000	989500
45,5	2,6	991,84	9045	–	–	1080000	–
49	2,8	1163,04	10600	–	–	1270000	–
52	3	1304,05	11850	–	–	1430000	–

Таблица 2.41

Диаметр, мм		Расчетная площадь сечения всех проволок, мм^2	Ориентировочная масса 1000 м смазанного каната, кг	Маркировочная группа (временное сопротивление проволок), Н/мм^2			
каната	проволоки в наружном слое			1370	1470	1570	1670
				Разрывное усилие каната в целом, Н, не менее			
ГОСТ 14954-80*							
27	2	337,27	3090	392500	420500	449000	477000
29,5	2,2	404,55	3705	471000	505000	–	–
31	2,3	449,85	4125	524000	561500	–	–
33	2,4	497,7	4565	580000	621500	–	–
36	2,6	589,81	5410	687000	736000	–	–
38,5	2,8	674,88	6190	786000	841000	–	–
41	3	768,45	7050	899500	–	–	–
46,5	3,4	988,71	9065	1150000	–	–	–

Примечание. Канаты, данные о которых приведены над пунктирной чертой (для каждого ГОСТа), не следует применять для ответственных сооружений из-за малого диаметра проволоки.

ПЕРЕЧЕНЬ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ НА СТАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ, ЛИСТОВОЙ ПРОКАТ И ТРУБЫ

1. ГОСТ 82-70*. Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный. Сортамент.
2. ГОСТ 103-76*. Полоса стальная горячекатаная. Сортамент.
3. ГОСТ 380-88*. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки.
4. ГОСТ 535-88*. Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические требования.
5. ГОСТ 1050-88*. Прокат сортовой, калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические требования.
6. ГОСТ 2590-88. Прокат стальной горячекатаный круглый. Сортамент.
7. ГОСТ 2591-88. Прокат стальной горячекатаный квадратный. Сортамент.
8. ГОСТ 4121-76*. Рельсы крановые.
9. ГОСТ 7173-54*. Рельсы железнодорожные типа Р43 для путей промышленного транспорта. Конструкция и размеры.
10. ГОСТ 8239-89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент.
11. ГОСТ 8240-89. Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент.
12. ГОСТ 8278-83*. Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент.

13. ГОСТ 8282-83*. Профили стальные гнутые С-образные равнополочные. Сортамент.
14. ГОСТ 8509-93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент.
15. ГОСТ 8510-86*. Уголки стальные горячекатаные неравнополочные. Сортамент.
16. ГОСТ 8568-77*. Листы стальные с ромбическим и чечевичным рифлением. Технические условия.
17. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент.
18. ГОСТ 13229-78*. Профили стальные гнутые зетовые. Сортамент.
19. ГОСТ 14637-89*. Прокат толстолистовой из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия.
20. ГОСТ 14918-80*. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. Технические условия.
21. ГОСТ 16523-89*. Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия.
22. ГОСТ 17066-94. Прокат тонколистовой из конструкционной низколегированной стали. Технические условия.
23. ГОСТ 19281-89*. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия.
24. ГОСТ 19425-74*. Балки двутавровые и швеллеры стальные специальные. Сортамент.
25. ГОСТ 19903-74*. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент .
26. ГОСТ 19904-90. Прокат листовой холоднокатаный. Сортамент .
27. ГОСТ 24045-94. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Технические условия.
28. ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент.
29. ГОСТ 27772-88*. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия.

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИЮ

1. ТУ 14-1-1217-75. Сталь листовая низколегированная марок 10ХНДП и 10ХДП.
2. ТУ 14-1-3432-82. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий с повышенными прочностными свойствами.
3. ТУ 14-1-3584-83. Сталь холоднокатаная термически упрочненная оцинкованная с непрерывных линий. Опытная партия.
4. ТУ 14-2-204-76. Сталь горячекатаная. Швеллеры тонкостенные с узкими параллельными полками. Сортамент.
5. ТУ 14-2-205-76. Сталь горячекатаная. Двутавры тонкостенные с узкими параллельными полками. Сортамент.
6. ТУ 14-2-427-80. Сталь горячекатаная. Двутавры специальные повышенной точности.
7. ТУ 14-2-685-86. Тавры с параллельными гранями полки. Опытно-промышленная партия.
8. ТУ 14-3-567-76. Трубы стальные электросварные из низколегированной стали марки 16Г2АФ для строительных конструкций.
9. ТУ 36-2287-80. Профили гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные. Технические условия.
10. ТУ 36.26.11-5-89. Листы стальные просечно-вытяжные. Технические условия.
11. ТУ 67-18-152-89. Профили гнутые с трапециевидными гофрами из тонколистового холоднокатаного проката из атмосферостойкой низколегированной стали.
12. ТУ 67-559-83. Профили стальные гнутые С-образные равнополочные.

Перечень стандартов и технических условий на стальные канаты, рекомендуемые для применения в металлических конструкциях

Номер стандарта, ТУ	Наименование стандарта или ТУ	Диаметры канатов, мм	Примечание
ГОСТ 3241-91	Канаты стальные. Технические условия	–	ТУ на канаты всех типов из круглой проволоки
ГОСТ 7372-79*	Проволока стальная канатная. Технические условия	–	ТУ на круглую канатную проволоку
ГОСТ 3062-80*	Канат одинарной свивки типа ЛК-О конструкции 1×7 (1+6). Сортамент	6,2–9,8	–
ГОСТ 3063-80*	Канат одинарной свивки типа ТК конструкции 1×19 (1+6+12)	10–13	–
ГОСТ 3064-80*	Канат одинарной свивки типа Т12 конструкции 1×37 (1+6+12+18). Сортамент	14–18,5	–
ГОСТ 3066-80*	Канат двойной свивки типа ЛК-О конструкции 6×7 (1+6)+1×7× (1+6). Сортамент	18,5–24	–
ГОСТ 7667-80*	Канат двойной свивки типа ЛК-3 конструкции 6×25 (1+6; 6+12)+7×7(1+6)	31–47	–
ГОСТ 7669-80*	Канат стальной двойной свивки типа ДК-РО конструкции 6×36×(1+7+7/7+14)+7×7(1+6). Сортамент	41–52	–
ГОСТ 14954-80*	Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции 6×19(1+6+6/6)+7×7(1+6). Сортамент	27–46,5	–
ГОСТ 10505-76*	Канаты стальные закрытые подъемные. Технические условия	–	ТУ на закрытые канаты
ГОСТ 18899-73*	Канаты стальные. Канаты закрытые несущие. Технические условия		–
ГОСТ 3090-73*	Канаты стальные. Канат закрытый несущий с одним слоем зетобразной проволоки и сердечником типа ТК. Сортамент	30,5–35,5	ТУ на закрытые канаты
ГОСТ 7675-73*	Канаты стальные. Канат закрытый несущий с одним слоем клиновидной и одним слоем зетобразной проволоки типа ТК. Сортамент	38,5–51	–
ГОСТ 7676-73*	Канаты стальные. Канат закрытый несущий с двумя слоями клиновидной и одним слоем зетобразной проволоки и сердечником типа ТК. Сортамент	50–70	–
ГОСТ 10506-76*	Канаты стальные закрытые подъемные. Сортамент	20–50	–
ГОСТ 18901-73*	Канаты стальные. Канат закрытый несущий с двумя слоями зетобразной проволоки и сердечником типа ТК	38,5–54	–
ТУ 19-4-902-78	Канаты стальные. Канат двойной свивки типа ЛК-РО конструкции 6×36(1+7+7/7+14)+1×36(1+7+7/7+14)	40–52	Канаты для несущих элементов строительных конструкций с увеличенным шагом свивки
ТУ 14-4-1216-82	Канаты стальные оцинкованные спиральные закрытой конструкции	32–72	То же

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вахуркин В.М.** Вопросы теории построения сортаментов прокатных профилей. – Вестник инженеров и техников. – 1952. – № 2.
2. **Каплун Я.А.** О методике оценки экономичности прокатных профилей. Некоторые вопросы теории сортамента. Сер.VII. Вып. 5(13). – М.: 1969.
3. **Каплун Я.А.** Эффективность применения тонкостенных двутавров и швеллеров в строительных конструкциях. Промышленное строительство. – 1976. – № 10.
4. **Каплун Я.А.** Отечественные широкополочные двутавры. – В кн.: Развитие металлических конструкций. Работы школы Н.С.Стрелецкого. – М.: Стройиздат, 1987.
5. **Михайлов Б.П.** Индустриализация металлического строительства. – М.: Стройиздат, 1939.
6. **Папкович П.Ф.** Строительная механика корабля. Ч.I. Балки, рамки, перекрестные связи. – Л.: 1931.
7. Тришевский И.С., Клепанда В.В., Хижняков Я.В. Холодногнутые гофрированные профили проката. – Киев, 1973.

ГЛАВА 3

СОЕДИНЕНИЯ

3.1. Виды соединений

Соединения строительных металлоконструкций включают в себя следующие виды: сварные, болтовые (фланцевые, срезные, фрикционные, фрикционно-срезные, клееболтовые) и специальные (дюбельные, на самонарезающих или самосверлящих болтах, комбинированных заклепках и др.). Основным видом соединений металлоконструкций являются сварные соединения. По месту выполнения соединения разделяются на заводские и монтажные. К заводским относятся соединения, выполняемые при изготовлении металлоконструкций на специализированных заводах, к монтажным – соединения, выполняемые при монтажной сборке металлоконструкций на местах строительства зданий и сооружений.

При проектировании соединений стальных конструкций необходимо руководствоваться следующими общими требованиями:

- предусматривать монтажные соединения элементов, обеспечивающие возможность их легкой сборки и удобство выполнения при монтаже конструкции, а также быстроту выверки конструкции;
- назначать монтажные соединения элементов преимущественно болтовыми, предпочтительнее на болтах грубой и нормальной точности с передачей значительных вертикальных усилий на опорные столики, устраняющие работу болтов на срез; при наличии в соединениях изгибающих моментов использовать работу болтов грубой и нормальной точности на растяжение;
- осуществлять соединения с фрезерованными торцами для мощных сжатых и внецентренно сжатых элементов при отсутствии значительных краевых растягивающих напряжений;
- сварные стыки балок, колонн и т.д. выполнять без накладок, прямыми встык, с двусторонней сваркой и полным проплавлением, либо односторонней сваркой с подваркой корня шва;

- как правило, следует проектировать соединения по несущей способности соединяемых элементов;
- соединения с накладкой выполнять с симметричным расположением накладок;
- группы болтов, заклепок или сварных швов в соединении располагать так, чтобы их центр тяжести совпадал с центром тяжести сечения соединяемых элементов, а при наличии эксцентриситетов необходимо учитывать вызванное ими напряженное состояние соединения;
- при проектировании сварных соединений принимать меры против возможного хрупкого разрушения этих конструкций в процессе монтажа и эксплуатации.

В конструкциях со сварными соединениями следует:

- предусматривать применение высокопроизводительных механизированных способов сварки;
- предусматривать такое расположение сварных швов, при котором максимально сокращается необходимость кантовки конструкций при их изготовлении;
- обеспечивать свободный доступ к местам наложения швов с учетом выбранного способа и технологии сварки;
- назначать толщины и взаимное расположение швов, а также способы сварки, при которых в конструкциях возникало бы возможно меньше собственных напряжений и деформаций от сварки;
- избегать сосредоточения большого количества швов в одном месте (в особенности на участках с высокими местными напряжениями) и ориентированных поперек направления действующих растягивающих напряжений;
- принимать минимально необходимое число и минимальные размеры угловых швов, оговоренных в СНиП II-23-81* (табл. 38*);
- размеры и форму сварных угловых швов следует принимать в соответствии с требованиями п.12.8 СНиП II-23-81*
- в нахлесточных соединениях принимать размер напуска не менее пяти толщин наиболее тонкого из свариваемых элементов.

В конструкциях, воспринимающих динамические и вибрационные нагрузки, а также в конструкциях, возводимых в районах с расчетными зимними температурами ниже -40 °С, и в конструкциях из стали с расчетным значением предела текучести $R_y \geq 400$ МПа, следует:

- угловые швы выполнять с плавным переходом к основному металлу;
- фланговые швы, воспринимающие продольные силы, допускается выполнять с плоской поверхностью;
- соотношение размеров катетов лобовых швов рекомендуется принимать 1:1,5;
- принимать такие конструктивные формы сварных соединений, которые обеспечивали бы наиболее равномерную эпюру напряжений в элементах и деталях, а также наименьшие собственные напряжения от сварки. Для этого необходимо:
  - избегать резких концентраторов напряжений (входящих углов, перепадов сечений и т.д.), особенно расположенных на участках с высокими местными или остаточными напряжениями;
  - не допускать устройства стыков с неполным перекрытием сечения (например, стык поясов при отсутствии стыка стенки);
  - предусматривать полную обварку ребер жесткости и выведение угловых швов на малонагруженные элементы;
  - избегать применения пакетов листов в поясах балок и пр.

3.2. Сварные соединения

3.2.1. Классификация и требования к сварных швам и соединениям. При изготовлении и монтаже строительных металлоконструкций преимущественно применяется электродуговая сварка. В зависимости от условий изготовления и монтажа, конструктивных особенностей узлов и элементов металлоконструкций, основных конструкционных материалов могут применяться следующие способы электродуговой сварки: автоматическая, полуавтоматическая и ручная.

Основные типы и конструктивные элементы сварных швов и соединений, выполняемых электродуговой сваркой, регламентируются государственными стандартами, приведенными в табл.3.1.

Таблица 3.1. Государственные стандарты на основные типы швов сварных соединений, их конструктивные элементы и область применения

ГОСТ	Наименование	Область применения
5264-80*	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Соединения сталей, сплавов на железоникелевой и никелевой основах
11534-75*	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Соединения из углеродистых и низколегированных сталей
8713-79*	Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Соединения из сталей, сплавов на железоникелевой и никелевой основах
22533-75	Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Соединения из углеродистых и низколегированных сталей
14771-76*	Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Соединения из углеродистых и низколегированных сталей
23518-79	Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Соединения из углеродистых и низколегированных сталей
16098-80*	Соединения сварные из двухслойной коррозионностойкой стали. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Соединения из двухслойной коррозионностойкой стали
16037-80*	Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Соединения трубопроводов из сталей. Стандарт не распространяется на сварные соединения, применяемые для изготовления труб из листового и полосового металла
14806-80*	Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Соединения из алюминия и алюминиевых деформируемых термически не упрочняемых сплавов при толщине свариваемого металла 0,8–60 мм
14776-79	Дуговая сварка. Соединения точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры	Точечные соединения из сталей, медных, алюминиевых и никелевых сплавов

Стандарты, приведенные в табл.3.1, определяют не только конструктивные элементы подготовленных под сварку кромок и возможные отклонения их основных размеров, но устанавливают и размеры выполненных швов, а также предельные отклонения их геометрических параметров.

Кроме электродуговой в практике металлостроительства применяются электрошлаковая и реже контактная сварки. Основные конструктивные элементы и размеры сварных соединений и швов для электрошлаковой сварки регламентируются ГОСТ 15164-78*, а для контактной – ГОСТ 15878-79.

Стандартами на электродуговую сварку предусмотрены следующие типы сварных соединений металлоконструкций: стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные, на прорезных швах и электрозаклепках. Наиболее часто встречающиеся типы сварных соединений и сварных швов представлены в табл.3.2. Швы сварных соединений разделяют: по месту выполнения – заводские и монтажные; по технологическому исполнению – односторонние и двусторонние, с полным или неполным проплавлением (рис.3.1); по расположению швов относительно действующих усилий – фланговые и лобовые (рис.3.2); по расположению швов в пространстве во время сварки – нижние, вертикальные, потолочные, горизонтальные на вертикальной плоскости, в лодочку (рис.3.3), по форме подготовки кромок под сварку и другим признакам.

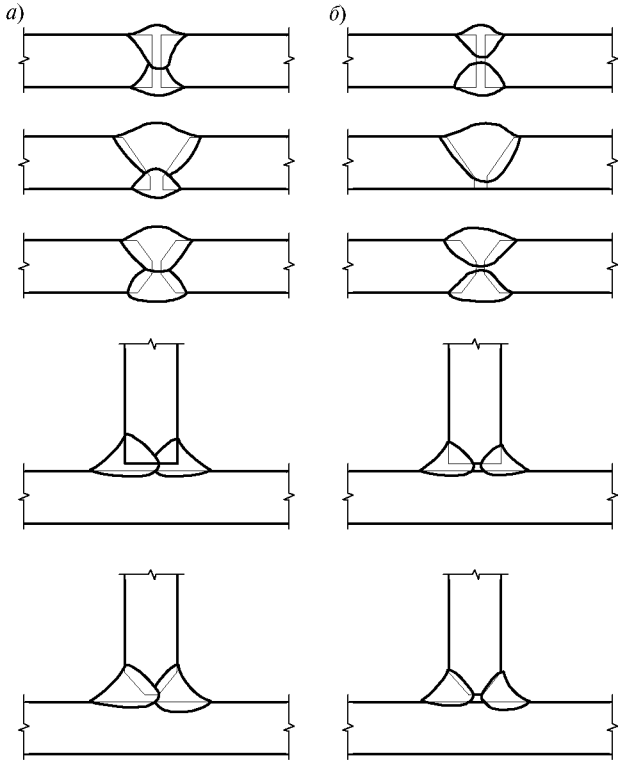


Рис.3.1. Сварные соединения
а – с полным проваром; *б* – с неполным проваром

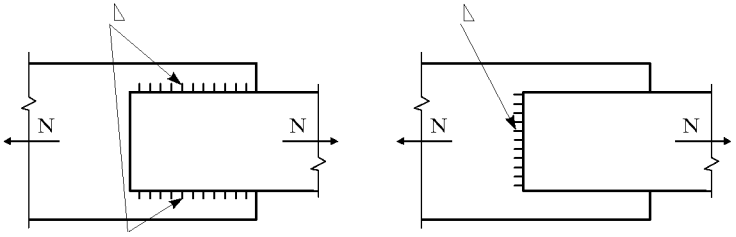
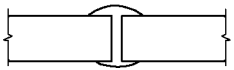
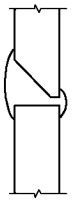
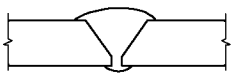
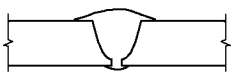
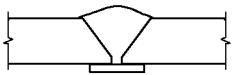
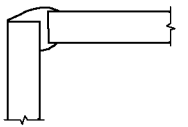
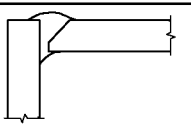
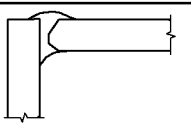
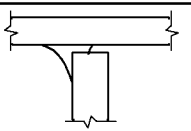
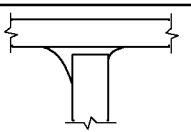


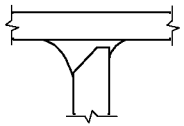
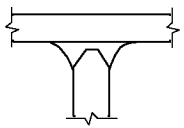
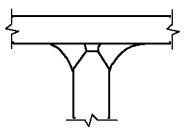
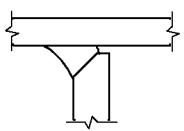
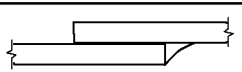
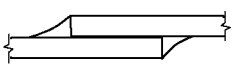
Рис.3.2. Нахлесточные соединения
а – фланговые швы; *б* – лобовой шов

Таблица 3.2. Сварные соединения, наиболее часто применяемые при изготовлении и монтаже металлоконструкций

Вид соединения	Форма подготовки кромок	Характер выполненного шва	Эскиз	Условные обозначения сварных соединений, способов сварки, пределы толщин элементов свариваемых		
				автоматической и полуавтоматической сваркой, ГОСТ 8713-79*	сваркой в защитных газах ГОСТ 14771-76*	ручной сваркой ГОСТ 5264-80*
1	2	3	4	5	6	7
Стыковое	Без скоса кромок	Двусторонний		$\frac{С29 - АФ_ф}{2 - 22}$	$\frac{С7 - УП}{3 - 12}$	$\frac{С7}{2 - 5}$
	Со скосом одной кромки	То же		$\frac{С9 - АФ_к}{8 - 20}$	$\frac{С12 - УП}{3 - 60}$	$\frac{С12}{3 - 60}$
	С двумя симметричными скосами одной кромки	То же		$\frac{С15 - АФ}{20 - 30}$	$\frac{С15 - УП}{8 - 100}$	$\frac{С15}{8 - 100}$
	Со скосами двух кромок	Двусторонний		$\frac{С21 - АФ\ ПФ}{14 - 30}$	$\frac{С21 - УП}{3 - 60}$	$\frac{С21}{3 - 60}$
	С криволинейными скосами двух кромок	То же		$\frac{С23 - АФ}{24 - 160}$	$\frac{С23 - УП}{24 - 100}$	$\frac{С23}{15 - 100}$

1	2	3	4	5	6	7
Стыковое	Со скосами двух кромок	Односторонний на остающейся подкладке		$\frac{\text{С19} - \text{АФ}_\text{о}\text{ПФ}_\text{о}}{8 - 30}$	$\frac{\text{С19} - \text{УП}}{3 - 60}$	$\frac{\text{С19}}{6 - 100}$
	С двумя симметричными скосами двух кромок	Двусторонний		$\frac{\text{С25} - \text{АФПФ}}{18 - 60}$	$\frac{\text{С25} - \text{УП}}{6 - 120}$	$\frac{\text{С25}}{8 - 120}$
	С двумя несимметричными скосами двух кромок	То же		$\frac{\text{С39} - \text{АФшПФш}}{16 - 60}$	—	$\frac{\text{С39}}{12 - 120}$
Угловое	Без скоса кромок	То же		$\frac{\text{У5} - \text{АФшПФш}}{4 - 14}$	$\frac{\text{У5} - \text{УП}}{8 - 30}$	$\frac{\text{У5}}{2 - 30}$
	Со скосом одной кромки	То же		$\frac{\text{У7} - \text{АФшПФш}}{8 - 20}$	$\frac{\text{У7} - \text{УП}}{6 - 60}$	$\frac{\text{У7}}{3 - 60}$
	С двумя несимметричными скосами одной кромки	То же		$\frac{\text{У3} - \text{АФшПФш}}{20 - 40}$	—	—
Тавровое	Без скоса кромок	Односторонний		$\frac{\text{Т1} - \text{АФ, ПФ}}{3 - 40}$	$\frac{\text{Т1} - \text{УП}}{0{,}8 - 40}$	$\frac{\text{Т1}}{2 - 40}$
	То же	Двусторонний		$\frac{\text{Т3} - \text{АФшПФш}}{3 - 20}$	$\frac{\text{Т3} - \text{УП}}{0{,}8 - 40}$	$\frac{\text{Т3}}{2 - 40}$

Продолжение табл.3.2

1	2	3	4	5	6	7
Тавровое	Со скосом одной кромки	То же		$\frac{\text{Т7 – АФшПФш}}{8 – 30}$	$\frac{\text{Т7 – УП}}{3 – 60}$	$\frac{\text{Т7}}{3 – 60}$
	С двумя симметричными скосами кромки с полным проваром	То же		$\frac{\text{Т8 – АФ ПФ}}{16 – 40}$	$\frac{\text{Т8 – УП}}{6 – 80}$	$\frac{\text{Т8}}{8 – 100}$
	С двумя симметричными скосами кромки с неполным проваром	То же		—	$\frac{\text{Т9 – УП}}{12 – 100}$	$\frac{\text{Т9}}{12 – 100}$
	Со скосом одной кромки	Односторонний		—	$\frac{\text{Т6 – УП}}{3 – 60}$	$\frac{\text{Т6}}{3 – 60}$
Нахлесточное	Без скоса кромок	То же		$\frac{\text{Н1 – АФ ПФ}}{1 – 20}$	$\frac{\text{Н1 – УП}}{0,8 – 60}$	$\frac{\text{Н1}}{2 – 60}$
	То же	Двусторонний		$\frac{\text{Н7 – АФ ПФ}}{1 – 20}$	$\frac{\text{Н2 – УП}}{0,8 – 60}$	$\frac{\text{Н2}}{2 – 60}$

Примечание. В табл.3.2 приняты следующие обозначения способов сварки: АФ – автоматическая на весу; $АФ_ф$ – автоматическая на флюсовой подушке; $АФ_о$ – автоматическая на остающейся подкладке; АФш – автоматическая с предварительным наложением подварочного шва; АФк – автоматическая с предварительной подваркой корня шва; ПФ – полуавтоматическая на весу; $ПФ_о$ – полуавтоматическая на остающейся подкладке; ПФш – полуавтоматическая с предварительным наложением подварочного шва; УП – в углекислом газе или его смеси с кислородом плавящимся электродом.

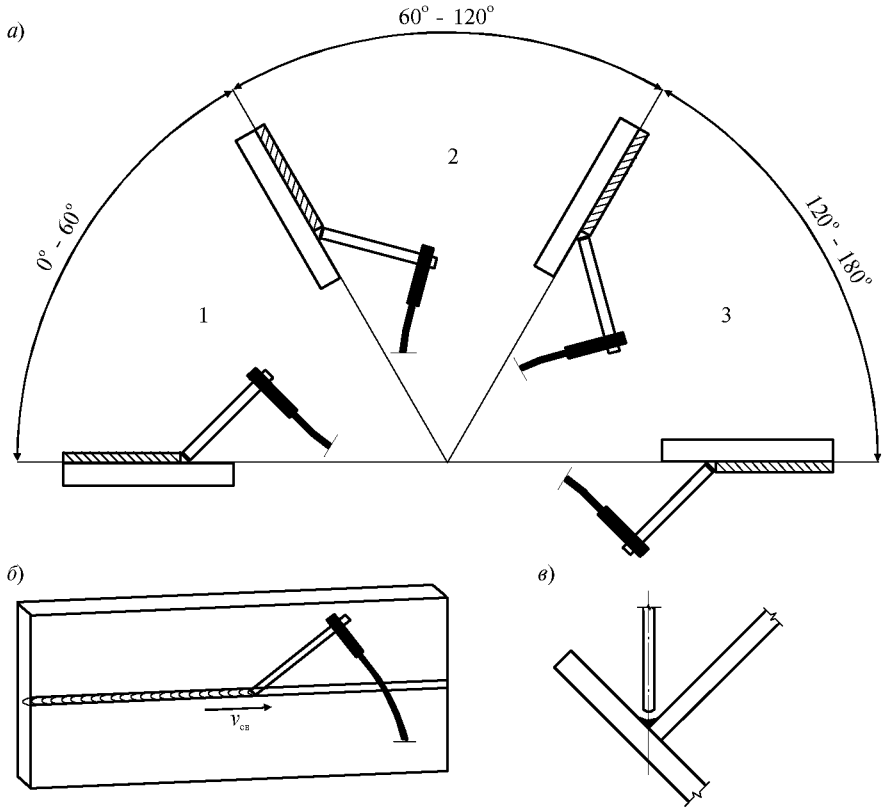


Рис.3.3. Положения сварных швов в пространстве

а – расположение: *1* – нижнее; *2* – вертикальное; *3* – потолочное; *б* – то же, горизонтальное на вертикальной плоскости; *в* – положение элементов при сварке “в лодочку”

При проектировании металлоконструкций типы сварных швов назначаются с учетом методов сварки, толщины свариваемых элементов, положения в пространстве и технологии сварки.

Стыковые сварные соединения находят широкое применение в конструкциях различного назначения: резервуарах и газгольдерах, корпусах доменных печей, воздухонагревателей и атомных реакторов, бункерах и силосах, различного рода оболочках, колоннах и подкрановых балках промышленных зданий, магистральных и технологических трубопроводах и т.д.

Стыковые соединения особенно целесообразны в сосудах различного назначения, так как хорошо обеспечивают плотность швов, удобны для выполнения неразрушающих методов контроля качества, экономичны, характеризуются менее резким изменением геометрической формы и меньшей концентрацией напряжений.

При выборе стыковых швов следует учитывать, что площадь поперечного сечения шва с двумя симметричными скосами двух кромок (тип соединения С25, ГОСТ 8713-79*, ГОСТ 5264-80*) примерно в 2 раза меньше площади сечения шва со скосом одной кромки (тип соединения С21). Второе преимущество шва с двумя скосами двух кромок – симметричность сечения, что уменьшает деформации при сварке.

Для сварных соединений при толщине деталей более 30 мм применяют главным образом швы с криволинейным скосом двух кромок (тип соединения С23). Некоторое повышение трудоемкости обработки кромок в этом случае компенсиру-

ется значительным уменьшением объемов сварочных работ и количества наплавленного металла.

Тавровые соединения применяются для прикрепления взаимно перпендикулярно расположенных элементов, например в колоннах, балках, фермах и других конструкциях.

При воздействии статических нагрузок тавровые соединения выполняют, как правило, без разделки кромок, с предусмотренным конструктивным непроваром. Обеспечение полного проплавления тавровых соединений усложняет процесс сварки, удорожает изготовление конструкции и поэтому может применяться только в обоснованных случаях, например при проектировании поясных швов балок под подвижную нагрузку, так как непровар в корне шва приводит к заметному снижению усталостной прочности.

Односторонние угловые швы в соответствии со СНиП II-23-81* допускается применять в тавровых соединениях конструкций группы 4 (пп.7.2, 7.3, 13.12, 13.26), при этом катеты сварных швов следует принимать по табл.38* указанного СНиП.

В настоящее время значительно расширена область применения односторонних угловых швов в колоннах и балках для сооружений, строящихся в климатических районах II_4 и II_5, а также для конструкций, находящихся в отапливаемых зданиях, независимо от района их строительства, эксплуатируемых в неагрессивной или слабоагрессивной средах.

Односторонние угловые швы, помимо конструкции группы 4, рекомендуется применять:

- при выполнении поясных швов центрально сжатых, внецентренно сжатых и сжато-изгибаемых колонн конструкции группы 3 с толщиной стенки до 12 мм;
- при выполнении механизированной сваркой поясных швов балок с толщиной стенок до 10 мм конструкции группы 2 (за исключением балок с гибкими стенками), нагрузка на которые передается через ребра жесткости или настил, опирающихся на пояса балок, симметрично относительно *ее* поперечного сечения;
- для прикрепления промежуточных ребер жесткости (в том числе односторонних) и диафрагм в конструкциях групп 2 и 3;
- для приварки промежуточных ребер жесткости (в том числе односторонних) и диафрагм в конструкциях группы 1, за исключением подкрановых балок, рассчитываемых на выносливость с количеством циклов нагружения $2 \cdot 10^6$ и более.

При применении односторонних поясных швов в колоннах и балках минимальные катеты швов должны соответствовать требованиям табл.38 СНиП II-23-81*.

В сварных двутаврах с односторонними поясными швами в узлах крепления связей, балок, распорок и других элементов, передающих усилия в плоскостях стенок двутавров, следует применять двусторонние поясные швы, выходящие за контуры прикрепляемых элементов (узлов) на длину $30K_f$ с каждой стороны (K_f по п.12.9, табл.38*, СНиП II-23-81*).

В монтажных условиях допускается односторонняя сварка с подваркой и выборкой корня шва или сварка на остающейся подкладке. Применение прерывистых швов, а также электрозаклепок, выполняемых ручной сваркой с предварительным сверлением отверстий, допускается только в конструкциях группы 4. Расстояния в свету между участками прерывистых швов должны быть не более 15 S в сжатых элементах и не более 30 S – в растянутых и неработающих элементах (S – наименьшая толщина соединяемых элементов).

Нахлесточные соединения применяются при сварке ферм, днищ и щитков кровли резервуаров, настилов технологических площадок и т.д. Для соединений этого типа допустима меньшая точность выполнения технологических операций. В

отличие от стыковых соединений нахлесточные имеют более высокую концентрацию напряжений и низкую усталостную прочность.

Качество всех выполненных сварных швов определяется внешним осмотром по всей их длине с целью выявления трещин, прожогов, незаваренных кратеров, свищей, сужений, усадочных раковин, пор, шлаковых и неметаллических включений, выходящих на поверхность. Подрезы основного металла, если в проекте нет дополнительных требований, допускаются глубиной не более 0,5 мм при толщине металла 4–10 мм и не более 1 мм при толщине свыше 10 мм.

Выбор методов и объемов неразрушающего контроля качества сварных соединений осуществляется проектной организацией, которая указывает их в конструкторской документации, согласованной с заводом-изготовителем и монтажной организацией. Контроль неразрушающими методами следует проводить по государственным стандартам на соответствующие методы контроля или по отраслевым стандартам, а при их отсутствии по методическим инструкциям, действующим в отрасли промышленности, для которой разрабатывается данный проект сооружения.

При изготовлении и монтаже металлоконструкции не рекомендуется применение комбинированных соединений, в которых часть усилий воспринимается сварными швами, а часть – болтами.

Жесткие сварные узлы из обычных строительных сталей, в которых действующие усилия передаются в направлении толщины проката листовых элементов (рис.3.4) склонны к образованию трещин. Последние могут выходить на поверхность металла в околошовной зоне соединения или по линии сплавления. Для предупреждения этих трещин при проектировании указанных узлов следует применять стали с гарантированными z-свойствами или стали электрошлакового переплава. В тех случаях, когда это невозможно, следует отдавать предпочтение тавровым и угловым соединениям, свариваемым с неполным проплавлением; сварку этих соединений следует выполнять на малой погонной энергии за несколько проходов.

Электродуговая сварка встык деталей неодинаковой толщины, из углеродистых и низколегированных строительных сталей с пределом текучести до 400 МПа при разнице толщин, не превышающей значений, указанных в табл.3.3, производится так же, как деталей одинаковой толщины. Конструктивные элементы подготовленных под сварку кромок следует выбирать по большей толщине.

Допускаемая разность толщин деталей, свариваемых из сталей с пределом текучести более 400 МПа, должна быть не менее 1/12 толщины более тонкого листа и не превышать 2,5 мм. При этом скос кромок следует выполнять механическим способом.

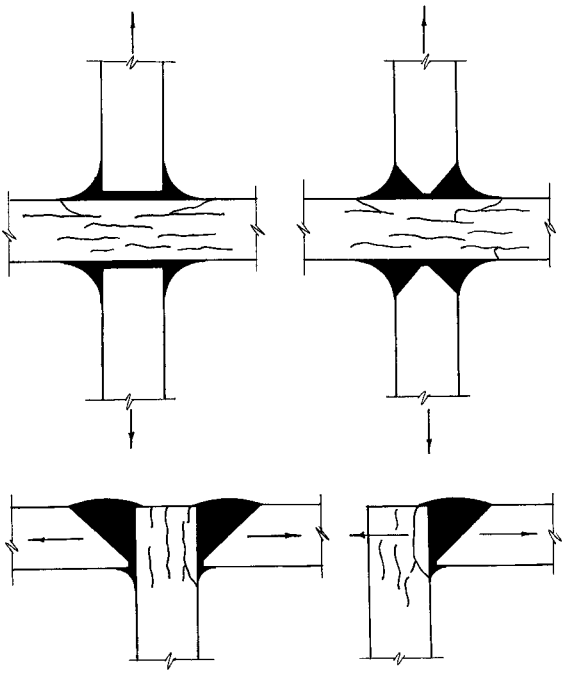


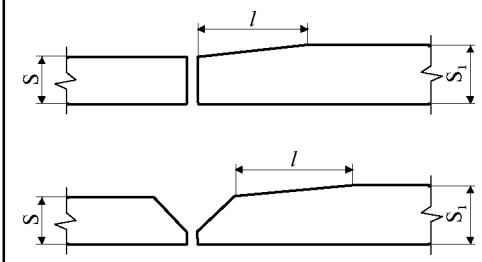
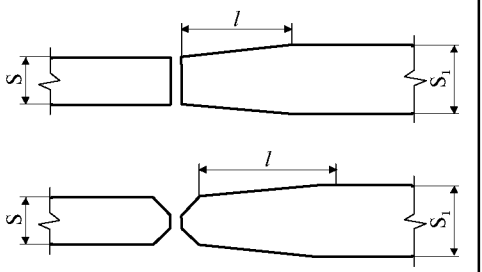
Рис.3.4. Сварные соединения, склонные к расслоению металла

Таблица 3.3. Допустимая наибольшая разность толщин деталей, свариваемых встык без скоса кромок

ГОСТ	Толщина тонкой детали, мм	Разность толщин деталей, мм
5264-80*	1–4 5–20 21–30 Св.30	1 2 3 4
8713-79*	2–4 5–30 31–40 Св.40	1 2 4 6
14771-76*	2–3 4–30 31–40 Св.40	1 2 4 6

При разности в толщине свариваемых деталей свыше значений, указанных в табл.3.3, на детали, имеющие бóльшую толщину, должен быть сделан скос 1:5 с одной стороны или с двух сторон до толщины тонкой детали (табл.3.4). При этом конструктивные элементы подготовленных кромок и размеры сварного шва следует выбирать по меньшей толщине.

Таблица 3.4. Величины скосов деталей, имеющих большие толщины в стыковых соединениях

Односторонний скос	Двусторонний скос
	
$l = 5\,(S_1\text{-}S)$	$l = 2{,}5\,(S_1\text{-}S)$

При сварке стыковых соединений в заводских и монтажных условиях в соответствии с требованиями ГОСТ 5264-80*, ГОСТ 8713-79*, ГОСТ 14771-76* допускаются следующие смещения свариваемых кромок одна относительно другой:

Толщина детали, мм	Смещение, мм
До 4	0,5
4-10	2
10-100	$0{,}1\,S_1$, но не более 3 мм
Свыше 100	$0{,}01\,S_1$, но не более 4 мм

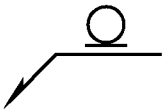
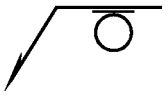
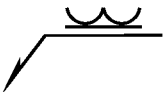
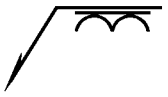
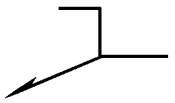
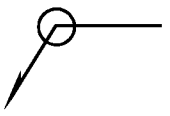
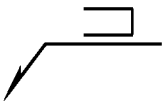
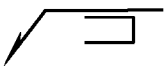
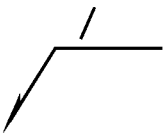
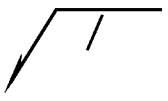
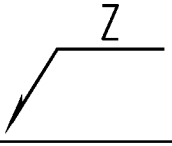
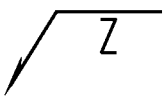
3.2.2. Обозначения швов сварных соединений. Основные и дополнительные обозначения швов сварных соединений выполняются в соответствии с ГОСТ 2.312-72* над или под полками линий-выносок, которые заканчиваются односторонними стрелками (рис.3.5). Видимые швы обозначают над полками, а невидимые – под полками. Независимо от способа сварки видимые швы на чертежах изображают сплошными линиями, а невидимые – штриховыми. Стандартом определены вспо-

могательные знаки для обозначения сварных швов, наиболее часто используемые из них приведены в табл.3.5. ГОСТ 2.312-72* удобен для обозначения сварных швов в чертежах машиностроительных конструкций.



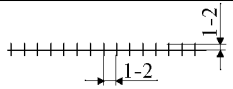
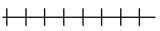
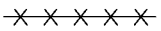
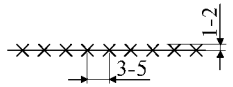
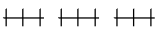
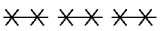
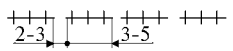
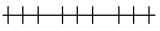
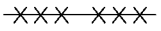
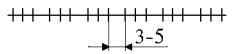
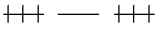
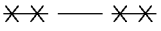
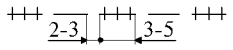
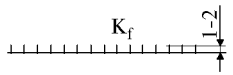
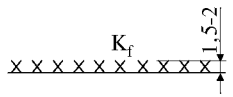
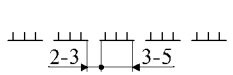
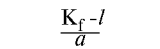
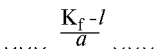
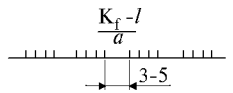
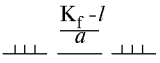
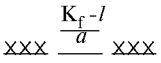
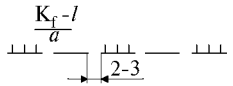
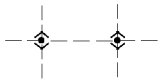
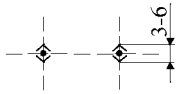
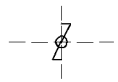
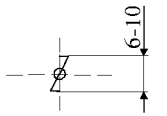
Рис.3.5. Линии-выноски для обозначения швов сварных соединений

Таблица 3.5. Вспомогательные знаки для обозначения швов сварных соединений

Вспомогательный знак	Значение вспомогательного знака	Расположение вспомогательного знака относительно полки линии выноски и изображения шва	
		с лицевой стороны	с обратной стороны
	Усиление шва снять		
	Неровности шва обработать с плавным переходом к основному металлу		
	Шов выполнить при монтажной сборке конструкции		
	Шов по замкнутому контуру		
	Шов по незамкнутому контуру		
	Шов прерывистый или точечный с цепным расположением		
	Шов прерывистый или точечный с шахматным расположением		

При разработке чертежей КМ стальных конструкций, вследствие специфических требований проектирования, обозначения швов сварных соединений рекомендуется выполнять в соответствии с СН 460-74 (разд.5), условные изображения швов сварных соединений представлены в табл.3.6. Обозначения швов сварных соединений по указанному документу в этом случае допускается использовать без выносных линий, помещая их непосредственно над или под изображением соответствующего сварного шва вне зависимости от того, является ли сварной шов видимым или невидимым.

Таблица 3.6. Условные изображения швов сварных соединений, применяемых при проектировании строительных металлоконструкций

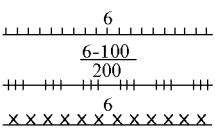
Наименование	Изображение шва		Размер изображений, мм
	заводского	монтажного	
Шов стыкового сварного соединения, сплошной:			
с видимой стороны			
с невидимой стороны			
То же, прерывистый:			
с видимой стороны			
с невидимой стороны			
Шов таврового углового или нахлесточного соединения, сплошной:			
с видимой стороны			
с невидимой стороны			
То же, прерывистый:			
с видимой стороны			
с невидимой стороны			
Нахлесточное точечное соединение, точки выполнены контактной сваркой			
Нахлесточное точечное соединение, точки выполнены электродуговой сваркой			

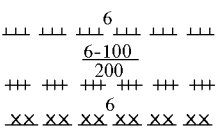
Примечания:

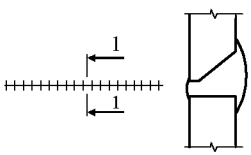
1. Здесь K_f – катет углового шва; l – длина участка прерывистого шва; a – расстояние между участками прерывистого шва.

2. Изображения сварных швов при необходимости дополняют разрезами, показывающими геометрические размеры разделки и выполненного шва.

Пример:







3.2.3. Рекомендации по выбору способов сварки и сварочных материалов. Выбор способа электродуговой сварки определяется конструктивной формой сооружения, свойствами конструкционного материала, условиями изготовления и монтажа, а также стремлением к экономической эффективности выбранного способа сварки.

При конструктивно-технологической проработке проектов сооружений необходимо иметь представление о производственных возможностях способов сварки. В практике металлостроительства применяются следующие способы электродуговой сварки:

автоматическая под слоем флюса отличается наибольшей производительностью, выполняется в нижнем положении, рекомендуется для стыковых и угловых прямолинейных швов протяженностью более 500 мм. Автоматическую сварку применяют для поясных швов балок, колонн, укрупнения листовых конструкций и других элементов;

полуавтоматическая сварка несколько менее производительна, чем автоматическая, но весьма эффективна при выполнении прямолинейных и коротких криволинейных швов в нижнем и наклонном положениях и реже – в вертикальном. Наиболее эффективна полуавтоматическая сварка при изготовлении решетчатых конструкций, при приварке ребер жесткости, диафрагм, патрубков, люков, фланцев и т.д. Существует несколько разновидностей полуавтоматической сварки, отличающихся применением сварочных материалов: в среде углекислого газа или смеси газов проволокой сплошного сечения; в среде углекислого газа порошковой проволокой или самозащитной проволокой. Для сварки в нижнем положении применяется полуавтоматическая сварка под слоем флюса;

ручная штучными электродами – наиболее маневренная, применяется для выполнения различных швов во всех пространственных положениях преимущественно в монтажных условиях. Ручная сварка применяется для выполнения швов в труднодоступных местах, при постановке сборочных прихваток, при ремонте сварных соединений и т.д.

Сварочные материалы для электродуговой сварки строительных конструкционных сталей выпускаются промышленностью в соответствии с действующими стандартами и техническими условиями. Основные механические свойства сварных соединений и металла шва проектируемых металлоконструкций, определяемые в каждом конкретном случае выбранным типом сварочного электрода, должны быть не ниже значений, указанных в табл.3.7.

Таблица 3.7. Механические свойства металла шва, наплавленного металла и сварного соединения, выполненных электродами для конструкционных сталей

Тип электрода	Временное сопротивление разрыву, МПа	Металл шва и наплавленный металл		Угол загиба для металла соединения, сваренного электродами диаметром не менее 3 мм, град
		относительное удлинение, %	ударная вязкость, Дж/см^2	
Э42	410	18	78	150
Э46	450	18	78	150
Э50	490	16	69	120
Э42А	410	22	147	180
Э46А	450	22	137	180
Э50А	490	20	127	150
Э55	540	20	117	150
Э60	590	18	98	120
Э70	690	14	69	—

Выбранные сварочные материалы должны обеспечивать механические свойства металла шва и сварных соединений при положительной и отрицательной температурах не ниже нормируемых механических свойств для категорий стали. Сварочные материалы, соответствующие наиболее распространенным в строительстве маркам сталей, приведены в СНиП II-23-81* (табл.55*). Сварочные материалы для сварки сталей с особыми свойствами, применяемыми в металлостроительстве, представлены в табл.3.8.

В табл.3.9 представлены варианты труднодоступных для ручной сварки мест, встречающихся в практике изготовления металлоконструкций.

На рис.3.6 показана доступность выполнения угловых швов при сварке балочных конструкций в положении «в лодочку» широко распространенным автоматом тракторного типа ТС-17МУ.

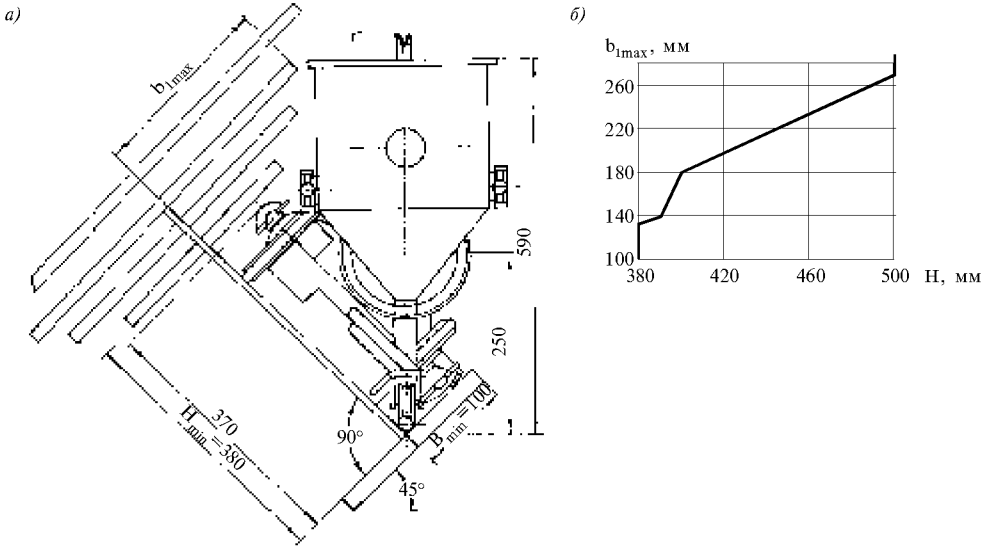


Рис.3.6. Доступность наложения швов при автоматической сварке балок в положении «в лодочку»
а) установка сварочного автомата ТС-17МУ;
б) предельные размеры свариваемого двутавра

3.2.4. Расчет сварных соединений металлоконструкций. Расчет сварных стыковых соединений металлоконструкций производится по СНиП II-23-81* пп.11.1*, 11.4. Сварные соединения с угловыми швами при действии продольной и поперечной сил рассчитываются на условный срез по двум сечениям (рис.3.7): по металлу шва и по металлу линии сплавления.

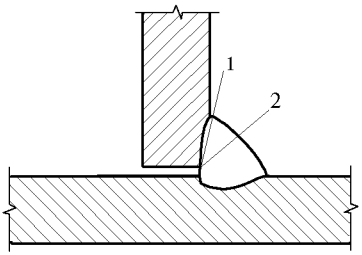
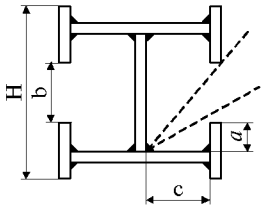
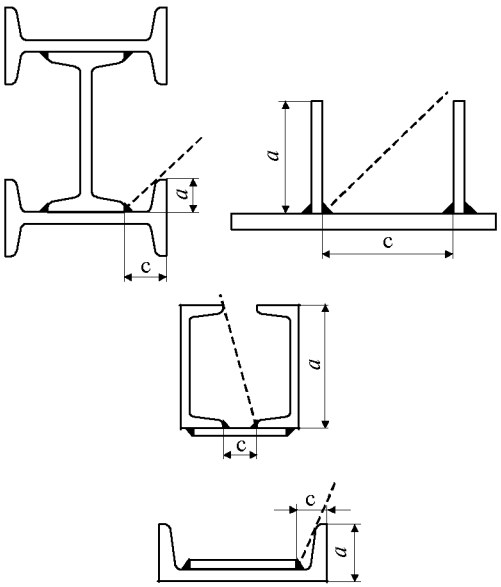
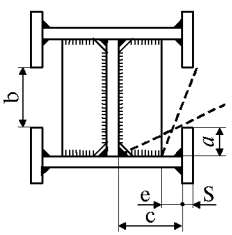
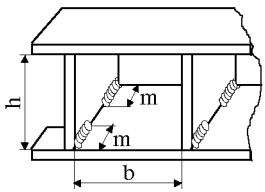
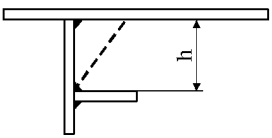


Рис.3.7. Схема расчетных сечений сварного соединения с угловым швом
1 – сечение по металлу шва; *2* – сечение по металлу границы сплавления

Таблица 3.8. Материалы для сварки некоторых хладостойких, коррозионностойких и атмосферостойких сталей

Сталь марки	Автоматическая сварка под слоем флюса для		Полуавтоматическая сварка в защитном газе для	Ручная сварка для	
	марки сварочной проволоки по ГОСТ или ТУ	марки флюса по ГОСТ или ТУ	марки сварочной проволоки по ГОСТ или ТУ	типа электрода по ГОСТ или ТУ	марки электрода
Хладостойкие стали					
ОН6	Св-03Х19Н15Г6М2АВ2 (ТУ 14-1-1595-76)	АНК-45 (ТУ 14-1-2859-80), АН-26С (ГОСТ 9087-81)	Св-03Х19Н15Г2М2АВ2 (ТУ 14-1-1595-76)	Э-02Х19Н15Г4АМ3В2 (ГОСТ 9466-75*, ГОСТ 10052-75*)	АНВ-40
ОН9	Св-01Х19Н18Г10АМ4 (ТУ 14-1-1892-71)	АНК-45МУ, (ТУ ИЭС 623-87)	Св-01Х19Н18Г10АМ4 (ТУ 14-1-1892-71) (сварка в аргоне)	ТУ ИЭС 607-87 ТУ ИЭС 748-90 Э-02Х19Н15Г4АМ3В2 (ГОСТ 9466-75*, ГОСТ 10052-75*)	АНВ-43 АНВ-45 АНВ-40
10Х14Г14Н4Т	Св-05Х15Н9Г6АМ (ТУ 14-1-1595-76) Св-04Х19Н9 (ГОСТ 1146-80*)	АН-26С АН-26СП (ГОСТ 9087-81*), АН-45 (ТУ 14-1-2372-78)	Св-05Х15Н9Г6АМ (ТУ 14-1-1595-76), Св-04Х19Н9 Св-01Х19Н9 (ГОСТ 2246-70*) Сварка в аргоне	Э-03Х15Н9АГ4 Э-07Х20Н9 Э-04Х20Н9 (ГОСТ 9466-75*, ГОСТ 10052-75*)	АНВ-24 ОЗЛ-8 ОЗЛ-14А
Коррозионностойкие стали					
12Х18Н10Т 08Х18Н10 04Х18Н10	Св-01Х19Н9 Св-04Х19Н9 Св-06Х19Н9Т (ГОСТ 2246-70*)	АН-26С (ГОСТ 9087-81), АН-45 (ТУ 14-1-2372-78)	04Х19Н9 (ГОСТ 2246-70*) Сварка в аргоне	Э-04Х20Н9 Э-08Х19Н10Г2Б Э-04Х20Н9 Э-02Х21Н10Г2 (ГОСТ 9466-75*, ГОСТ 10052-75*)	ЦЛ-11 ЗНО-3 ОЗЛ-14А ОЗЛ-22
10Х17Н13М3Т	Св-06Х19Н10М3Б Св-06Х20Н11М3ТБ (ГОСТ 2246-70*)	АН-26С (ГОСТ 9087-81*)	Св-06Х20Н11М3ТБ, Св-01Х19Н18Г10АМ4 (ГОСТ 2246-70*) Сварка в углекислом газе	Э-02Х19Н9Б Э-06Х19Н11Г2М2 Э-09Х19Н10Г2М2Б (ГОСТ 9466-75*, ГОСТ 10052-75*)	Л38М ЦЛ-4 Н-13
Атмосферостойкие стали					
10ХНДП 10ХДП	Св-08Х1ДЮ (ТУ 14-1-1148-75)	АН-348А, (ГОСТ 9087-81*)	Св-08ХГ2СДЮ (ТУ 14-1-3665-83)	Э50А (ГОСТ 9466-75*, ГОСТ 9467-75*)	ОЗС-18 ДСК-50К

Таблица 3.9. Доступность мест наложения швов при ручной сварке (все размеры, мм)

Эскиз	Требования
	$b \geq H - 2c$
	c | a ≤ 400 | ≤ 2 c > 400 | ≤ 600
	Для приварки ребер $a \leq c$ Недоступный при сварке участок шва $e_{min} = \frac{as}{b} + 10$
	b | h | m > 400 | 250–400 | ≤ 800 ≤ 250 | = h ≤ 400 | ≥ 250 | = 0,63 b < 250 | $\frac{bh}{400}$
	Сварка возможна при $h \geq 250$ мм

В табл.3.10 и 3.11 приведены наименьшие значения предельных усилий, полученные расчетом на срез (условный):

- по двум сечениям – формулы (120) и (121) СНиП II-23-81*;
- по металлу шва

$$N = \beta_f K_f R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c ;$$

- по металлу границы сплавления

$$N = \beta_z K_f R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c ,$$

где β_f, β_z – коэффициенты для расчета углового шва, соответственно по металлу шва и по металлу границы сплавления, принимаемые по табл.34 СНиП II-23-81*; K_f – катет углового шва; R_{wf}, R_{wz} – расчетные сопротивления углового шва срезу (условному), принимаемые по табл.3 СНиП II-23-81*; γ_{wf}, γ_{wz}, γ_c – коэффициенты условий работы шва; при составлении табл.3.1 они приняты равными единице. Для конструкций, возводимых в климатических районах I_1, I_2, II_2, II_3 (см. табл.3.11), $\gamma_{wf} = 0{,}85$ – для металла шва с $R_{wun} = 420$ МПа, $\gamma_{wz} = 0{,}85$. Для всех сталей $\gamma_c = 1$.

Расчет сварных соединений с угловыми швами на действие момента в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов, следует производить по двум сечениям в соответствии с требованиями п.11.3* СНиП II-23-81*.

3.3. Болтовые соединения

3.3.1. Общие положения. *Характеристика болтовых соединений.* Отечественная и зарубежная практика показывают, что на современном этапе развития металлостроительства болтовые соединения элементов стальных каркасов одно- и многоэтажных зданий и сооружений являются наиболее эффективным видом соединений. Это обусловлено следующими свойствами болтовых соединений:

- относительно малой трудоемкостью и простотой технологии выполнения, не требующей монтажников высокой квалификации; возможностью полного исключения сварочных работ и, следовательно, сварщиков высокой квалификации на монтаже стальных каркасов зданий и сооружений;
- большой надежностью, разнообразием конструктивных форм и характеристик поведения, способных наиболее полно отвечать эксплуатационным функциям соединяемых элементов и каркаса в целом.

Реализация эффективности болтовых соединений требует высокой культуры проектирования и изготовления металлических конструкций. Вместе с тем резервы эффективности болтовых соединений, связанные с уточнением их действительной работы и совершенствованием методов расчета, изучением их влияния на поведение стального каркаса в целом, далеко не исчерпаны. Это подтверждают результаты интенсивных исследований болтовых соединений, выполненных как в нашей стране, так и за рубежом.

За последние 15 лет были проведены многочисленные научно-технические конференции, симпозиумы и т.п., посвященные болтовым соединениям. В частности, на московском коллоквиуме в 1989 г. было подчеркнуто, что созданные методы расчета прочности болтовых соединений достаточно полно отвечают их действительному поведению и обеспечивают высокую эксплуатационную надежность. На последнем, регулярно действующем рабочем совещании по болтовым соединениям, состоявшемся в 1991 г. в г.Питсбурге (США), было отмечено, что разработанные в нашей стране методы расчета болтовых соединений по критерию деформативности наиболее рациональны. Эти методы представлены в настоящем справочнике. В то же время оценка работоспособности болтовых соединений по крите-

Таблица 3.10. Предельные усилия на сварные соединения с угловыми швами для конструкций 2–4 групп, возводимых в районах с расчетной температурой выше минус 40 °С

Вид сварки, диаметр электрода, положение шва	Марка сварочной проволоки, тип электрода	R_{un}, свариваемой стали, МПа	Предельные усилия, кН, на 1 пог. см шва при катете шва, мм									
			4	5	6	7	8	9	10	12	14	16
Автоматическая, проволокой диаметром 3–5 мм, в лодочку	Св-08А	360	7,5	9,3	11,2	13	14,9	16,8	18,6	22,4	26,1	29,8
	Св-08ГА	370	7,7	9,6	11,5	13,4	15,3	17,2	19,1	23	26,8	30,6
		380	7,9	9,8	11,8	13,8	15,7	17,7	19,7	23,6	27,5	31,5
	Св-08ГА	390	8,1	10,1	12,1	14,1	16,1	18,2	20,2	24,2	28,3	32,3
		400	8,3	10,3	12,4	14,5	16,6	18,6	20,7	24,8	29	33,1
		Св.400	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22	26,4	30,8	35,2
	Св-10ГА	440	9,1	11,4	13,7	15,9	18,2	20,5	22,8	27,3	31,9	36,4
		450	9,3	11,6	14	16,3	18,6	21	23,3	27,9	32,6	37,3
		Св.450	9,5	11,8	14,2	16,6	18,9	21,3	23,6	28,4	33,1	37,8
	С-10НМА	470	9,7	12,2	14,6	17	19,5	21,9	24,3	29,2	34,1	38,9
		480	9,9	12,4	14,9	17,4	19,9	22,4	24,8	29,8	34,8	39,7
	Св-10Г2	490	10,1	12,7	15,2	17,8	20,3	22,8	25,4	30,4	35,5	40,6
		Св.490	10,6	13,2	15,8	18,5	21,1	23,8	26,4	31,7	36,9	42,2
Полуавтоматическая, проволокой диаметром 1,4 –2 мм, нижнее, горизонтальное, вертикальное	Св-08Г2С	360	6,8	8,5	10,2	11,9	13,6	14,6	16,2	19,4	21,1	24,1
		370	7	8,7	10,5	12,2	14	15	16,6	20	21,1	24,1
		380	7,2	9	10,8	12,6	14,4	15,4	17,1	20,5	21,1	24,1
		390	7,4	9,2	11,1	12,9	14,7	15,5	17,2	20,6	21,1	24,1
		Св.390	7,6	9,4	11,3	13,2	15,1	15,5	17,2	20,6	21,1	24,1
Полуавтоматическая, проволокой диаметром 1,4 мм и порошковой проволокой, во всех положениях	Св-08Г2С, ПП-АН8, ПП-АН3	340–570	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	18,1	21,1	24,1
Ручная, во всех положениях	Э42, Э42А	360	5	6,3	7,6	8,8	10,1	11,3	12,6	15,1	17,6	20,2
	Э46, Э46А	360–390	5,6	7	8,4	9,8	11,2	12,6	14	16,8	19,6	22,4
	Э50, Э50А	Св.360	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	18,1	21,1	24,1
	Э60	Св.370	6,7	8,4	10,1	11,8	13,4	15,1	16,8	20,2	23,5	26,9

Таблица 3.11. Предельные усилия на сварные соединения с угловыми швами для конструкций 2–4 групп, возводимых в районах с расчетной температурой ниже минус 40 °С, а также для конструкций 1-й группы, возводимых во всех районах

Вид сварки, диаметр электрода, положение шва	Марка сварочной проволоки, тип электрода	R_{un}, свариваемой стали, МПа	Предельные усилия, кН, на 1 пог. см шва при катете шва, мм									
			4	5	6	7	8	9	10	12	14	16
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Автоматическая, проволокой диаметром 3–5 мм, в лодочку	Св-08А	360	6,3	7,9	9,5	11,1	12,7	14,3	15,8	19	22	25,3
		370	6,5	8,1	9,8	11,4	13	14,6	16,3	19,5	22,8	26
		380	6,7	8,4	10	11,7	13,4	15	16,7	20,1	23,4	26,7
		Св.380	6,7	8,4	10,1	11,8	13,5	15,1	16,8	20,2	23,6	26,9
	Св-08ГА	390	6,9	8,6	10,3	12	13,7	15,4	17,2	20,6	24	27,4
		400	7	8,8	10,6	12,3	14,1	15,8	17,6	21,1	24,6	28,2
		430	7,6	9,5	11,3	13,2	15,1	17	18,9	22,7	26,5	30,3
		440	7,7	9,7	11,6	13,5	15,5	17,4	19,4	23,2	27,1	31
		450	7,9	9,9	11,9	13,9	15,8	17,8	19,8	23,8	27,7	31,7
		460	8,1	10,1	12,1	14,2	16,2	18,2	20,2	24,3	28,3	32,4
		470	8,3	10,3	12,4	14,5	16,5	18,6	20,7	24,8	28,9	33,1
		480	8,4	10,6	12,7	14,8	16,9	19	21,1	25,3	29,6	33,8
		490	8,6	10,8	12,9	15,1	17,2	19,4	21,6	25,9	30,2	34,5
		Св.490	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	22	26,4	30,8	35,2
	Св-10НМА	510	9	11,2	13,5	15,7	17,9	20,2	22,4	26,9	31,4	35,9
		540	9,5	11,9	14,3	16,6	19	21,4	23,8	28,5	33,3	38
		570	10	12,5	15	17,6	20,1	22,6	25,1	30,1	35,1	40,1
		590	10,4	13	15,6	18,2	20,8	23,4	26	31,1	36,3	41,5

Продолжение табл.3.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Полуавтоматическая, проволокой диаметром 1,4–2 мм; нижнее, горизонтальное, вертикальное положение	Св-08Г2С	360	5,8	7,2	8,7	10,1	11,6	12,4	13,8	16,5	19,3	22
		370	5,9	7,4	8,9	10,4	11,9	12,7	14,2	17	19,8	22,6
		380	6,1	7,6	9,2	10,7	12,2	13,1	14,5	17,4	20,3	23,3
		390	6,3	7,8	9,4	11	12,5	13,4	14,9	17,9	20,9	23,9
		400	6,4	8	9,6	11,2	12,9	13,8	15,3	18,4	21,1	24,1
		430	6,9	8,6	10,4	12,1	13,8	14,8	16,4	19,7	21,1	24,1
		440	7,1	8,8	10,6	12,4	14,1	15,1	16,8	20,2	21,1	24,1
		450	7,2	9,0	10,8	12,7	14,5	15,5	17,2	20,6	21,1	24,1
		460	7,4	9,2	11,1	12,9	14,8	15,5	17,2	20,6	21,1	24,1
		470	7,6	9,4	11,3	13,2	15,1	15,5	17,2	20,6	21,1	24,1
		480	7,7	9,6	11,6	13,5	15,4	15,5	17,2	20,6	21,1	24,1
		Св.480	7,7	9,7	11,6	13,6	15,5	15,5	17,3	20,7	21,1	24,1
Полуавтоматическая, проволокой диаметром менее 1,4 мм и порошковой проволокой, во всех положениях	Св-08Г2С, ПП-АН8, ПП-АН3	360	5,5	6,9	8,3	9,6	11	12,4	13,8	16,5	19,3	22
		370	5,7	7,1	8,5	9,9	11,3	12,7	14,2	17	19,8	22,6
		380	5,8	7,3	8,7	10,2	11,6	13,1	14,5	17,4	20,3	23,3
		390	6	7,5	9	10,4	11,9	13,4	14,9	17,9	20,9	23,9
		Св.390	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	18,1	21,1	24,1
Ручная, во всех положениях	Э46А	360	5,5	6,9	8,3	9,6	11	12,4	13,8	16,5	19,3	22
		Св.360	5,6	7	8,4	9,8	11,2	12,6	14	16,8	19,6	22,4
	Э50А	360	5,5	6,9	8,3	9,6	11	12,4	13,8	16,5	19,3	22,0
		370	5,7	7,1	8,5	9,9	11,3	12,7	14,2	17	19,8	22,6
		380	5,8	7,3	8,7	10,2	11,6	13,1	14,5	17,4	20,3	23,3
		390	6	7,5	9	10,4	11,9	13,4	14,9	17,9	20,9	23,9
		Св.390	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	18,1	21,1	24,1
	Э60	400	6,1	7,6	9,2	10,7	12,2	13,8	15,3	18,4	21,4	24,5
		430	6,6	8,2	9,9	11,5	13,2	14,8	16,4	19,7	23	26,3
		Св.430	6,7	8,4	10,1	11,8	13,4	15,1	16,8	20,2	23,5	26,9

рию деформативности позволяет реализовать одно из перспективных современных направлений – учет влияния реальной жесткости соединений на действительное поведение стальных каркасов зданий и проектирование последних с заранее заданными характеристиками.

В настоящее время наиболее распространенными и массовыми типами болтовых соединений, отличающимися между собой механизмами передачи внешних усилий, являются следующие.

Фрикционные или сдвигоустойчивые соединения, в которых внешние усилия воспринимаются вследствие сопротивления сил трения, возникающих по контактным плоскостям соединяемых элементов от предварительного натяжения болтов. Эти соединения наиболее трудоемки по сравнению с другими типами болтовых соединений. Поэтому область применения фрикционных соединений должна быть строго ограничена условиями, при которых наиболее полно реализуются их положительные свойства – высокая надежность при восприятии различного рода вибрационных, циклических, знакопеременных нагрузок.

Срезные соединения, в которых внешние усилия воспринимаются вследствие сопротивления болтов срезу и соединяемых элементов смятию. Отличительное свойство срезных соединений – достаточно высокая деформативность, определяемая главным образом деформациями смятия соединяемых элементов болтами. Поэтому основная область их применения – соединения элементов, подвергающиеся воздействию статических нагрузок. При этом деформативность соединений не должна препятствовать нормальной эксплуатации конструкции.

Фрикционно-срезные соединения, в которых внешние усилия воспринимаются в результате совместного сопротивления сил трения болтов срезу и соединяемых элементов смятию. Эти соединения весьма эффективны, когда соединяемые элементы подвергнуты воздействию как статических, так и циклических нагрузок, в том числе знакопеременных. Тогда последние виды нагрузок целесообразно воспринимать за счет фрикционного эффекта.

Фланцевые соединения, в которых внешние усилия воспринимаются главным образом вследствие преодоления сопротивления сжатию фланцев от предварительного натяжения высокопрочных болтов. Фланцевые соединения являются одним из наиболее эффективных типов болтовых соединений, поскольку высокая несущая способность высокопрочных болтов используется впрямую и практически полностью.

Область применения фланцевых соединений достаточно велика. Они могут использоваться для соединений элементов, подверженных растяжению, изгибу или совместному их действию. Возможно их использование и для передачи циклических нагрузок, однако в этом случае необходимы соответствующие расчетные проверки.

Другие типы болтовых соединений, к которым относятся болто-клеевые, болтозаклепочные, болтосварные, а также соединения с временным характером креплений для последующей обварки или клепки конструкций. Учитывая, что применение подобных соединений носит частный характер, в этом справочнике они не рассматриваются.

Области применения. Болтовые соединения должны отвечать эксплуатационным функциям соединяемых элементов стальных конструкций зданий и сооружений, поэтому с точки зрения требований, предъявляемых к болтовым соединениям, рассматривают три группы стальных конструкций зданий и сооружений.

Группа *1*. Конструкции и их элементы, работающие в особо тяжелых условиях или подвергающиеся непосредственному воздействию знакопеременных, динамических, вибрационных или подвижных нагрузок, в том числе конструкции, рассчи-

тываемые на выносливость (подкрановые балки; подкраново-подстропильные фермы; колонны с фрезерованными торцами; балки перекрытий технологических и рабочих площадок; стыки балок между собой; тормозные конструкции; узлы горизонтальных и вертикальных связей по поясам стропильных ферм; стыки растянутых поясов стропильных и подстропильных ферм; фасонки ферм; узлы крепления вертикальных связей по колоннам; элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, непосредственно воспринимающих нагрузку от подвижных составов; пролетные строения и опоры транспортерных галерей и т.п.).

Группа *2.* Конструкции, либо их элементы, подвергающиеся воздействию статических нагрузок (балки перекрытий, технологических и рабочих площадок; фермы; ригели рам; стыки балок, поясов стропильных и подстропильных ферм на накладках; узлы крепления горизонтальных и вертикальных связей по поясам стропильных ферм для зданий с кранами легкого и среднего режимов работы; узлы крепления путей подвесного транспорта и монорельсов; узлы крепления крановых рельсов, разрезных подкрановых балок между собой и к колоннам; узлы крепления стропильных ферм к колоннам и подстропильным фермам, а также подстропильных ферм к колоннам при условии передачи вертикального опорного давления через столик; косоуры лестниц; опоры ВЛ и т.п.).

Группа *3.* Вспомогательные конструкции зданий и сооружений (связи, элементы фахверка, лестницы, трапы, площадки, ограждения и т.п.). Рекомендуемые области применения болтовых соединений и классы прочности болтов для них приведены в табл.3.12.

Материалы. Металлопрокат для элементов конструкций с болтовыми соединениями следует применять в соответствии с требованиями главы СНиП II-23-81*.

Для фланцев элементов стальных конструкций, подверженных растяжению, изгибу или их совместному действию, следует применять листовую сталь по ГОСТ 19903-74* с гарантированными механическими свойствами в направлении толщины проката по ТУ 14-1-4431-88, классов 3–5, марок 09Г2С-15 и 14Г2АФ-15 (по ГОСТ 19282-73) или по ТУ 14-105-465-89 марки 14Г2АФ-15. Допускается применение листовой стали электрошлакового переплава марки 16Г2АФШ по ТУ 14-1-1779-76 и 10ГНБШ по ТУ 14-1-4603-89[1] .

Фланцы могут быть выполнены из листовой низколегированной стали марок С345, С375 по ГОСТ 27772-88*, при этом сталь должна удовлетворять следующим требованиям:

- категория качества стали (только для марок С345 и С375) – 3 или 4 в зависимости от требований к материалу конструкции по СНиП II-23-81*;
- относительное сужение стали в направлении толщины проката $\psi_z \geq 15\,\%$, минимальное для одного из трех образцов $\psi_z \geq 10\,\%$. Проверку механических свойств стали в направлении толщины проката осуществляет завод строительных стальных конструкций по методике, изложенной в прилож.8 [1].

Фланцы сжатых элементов стальных конструкций следует изготовлять из листовой стали по ГОСТ 19903-74*. Характеристики сплошности стали для фланцев в зонах шириной 80 мм симметрично вдоль оси симметрии каждого из элементов профиля, присоединяемого к фланцу, должны удовлетворять требованиям, указанным в табл.3.13.

---

[1] Механические характеристики листовой стали марки 10ГНБШ толщиной 10-40 мм: временное сопротивление $\sigma_в = 520$-700 МПа, предел текучести $\sigma_т = 400$ МПа, относительное удлинение 21 %, относительное сужение в направлении толщины 35 %, ударная вязкость при температуре -60 °С KCV не менее 8 кгс.см с гарантируемым отсутствием нарушения сплошности площадью более 10 см^2.

Таблица 3.12. Рекомендуемые области применения болтовых соединений и классы прочности болтов

Тип соединения	Область применения	Класс прочности болтов для соединений (ГОСТы и ТУ)
Фрикционные соединения (с контролируемым натяжением болтов)	Конструкции групп 1–3, для которых по условиям эксплуатации недопустимы остаточные перемещения сдвига	Высокопрочные болты М16, М20, М24 и М27: с минимальным временным сопротивлением 1100 Н/мм^2 по ГОСТ 22353-77* и ГОСТ 22356-77* с минимальным временным сопротивлением 1400 Н/мм^2 по ТУ 14-4-1414-87 Болты класса прочности 10.9 М16, М20, М24 и М27 по ГОСТ 1759-87*
Срезные (без контролируемого натяжения болтов)	Конструкции групп 2 и 3	Болты классов прочности 5.6, 6.8, 8.8, 10.9 М16, М20, М24 и М27 по ГОСТ 1759-87 Высокопрочные болты с минимальным временным сопротивлением 1100 Н/мм^2 М16, М20, М24, М27 по ГОСТ 22353-77* и ГОСТ 22356-77*
Фрикционно-срезные (с контролируемым натяжением болтов)	Конструкции групп 1 и 2. В случае воздействия знакопеременных усилий этот тип соединений следует применять, когда меньшее по абсолютной величине усилие может быть воспринято сопротивлением сил трения при расчете соединения согласно п.3.3.3 с введением коэффициента уменьшения начального натяжения болта, равного 0,85	Высокопрочные болты с минимальным временным сопротивлением 1100 Н/мм^2 М16, М20, М24 и М27 по ГОСТ 22353-77* и ГОСТ 22356-77* Болты класса прочности 10.9 М16, М20, М24 и М27 по ГОСТ 1759-87
Фланцевые (с контролируемым натяжением болтов)	Конструкции группы 2, а также группы 1, воспринимающие знакопеременные нагрузки, а также многократно действующие подвижные, вибрационные или другого вида нагрузки с количеством циклов не более 10^5 при коэффициенте асимметрии напряжений в соединяемых элементах $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max} \geq \geq 0{,}8$	Высокопрочные болты с минимальным временным сопротивлением 1100 Н/мм^2 исполнения ХЛ М20, М24 и М27 по ГОСТ 22353-77* и ГОСТ 22356-77*

Примечания. 1. Применение высокопрочных болтов с минимальным временным сопротивлением 1400 Н/мм^2 по ТУ 14-4-1414-87 для фрикционных соединений допустимо для климатических районов строительства с расчетной температурой минус 40°С и выше. 2. Фланцевые соединения (с контролируемым натяжением болтов) следует применять в конструкциях, возводимых в климатических районах с расчетной температурой минус 40°С и выше. 3. Болты, имеющие по длине ненарезанной части участки с различными диаметрами, допускается применять только во фрикционных соединениях.

Таблица 3.13. Характеристика сплошности

Зона дефектоскопии	Площадь несплошности, $см^2$		Допустимая частота несплошностей	Максимальная допустимая протяженность несплошности, см	Минимальное допустимое расстояние между несплошностями, см
	минимальная учитываемая	максимальная учитываемая			
Контролируемая зона фланцев	0,5	1	10 $м^{-2}$	4	10

Контроль качества стали методами ультразвуковой дефектоскопии осуществляет завод строительных конструкций. На рис.3.8 для примера показаны зоны контроля стали фланцев для соединений элементов открытого и замкнутого профилей. Оценку качества стали фланцев марки 10ГНБШ по ТУ 14-1-4603-89 по характеристикам сплошности методом ультразвуковой дефектоскопии завод строительных конструкций не выполняет.

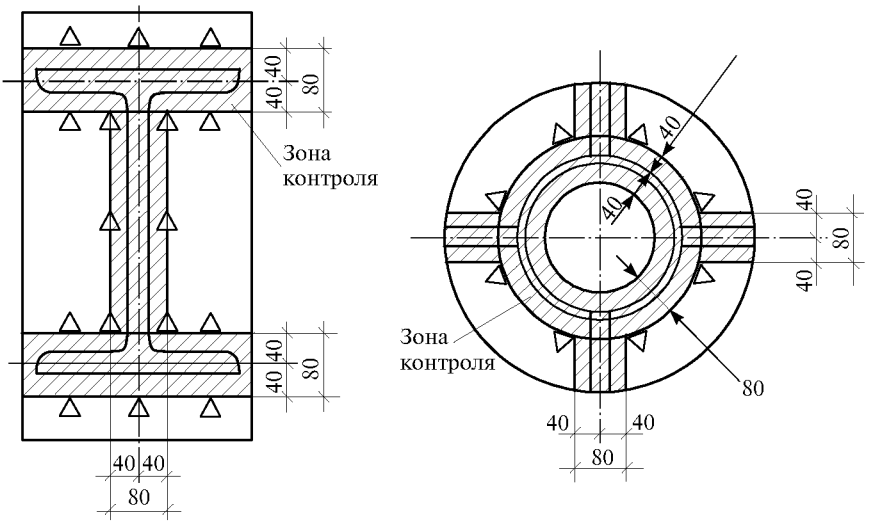


Рис.3.8. Зоны контроля качества стали фланцев по характеристикам сплошности

Для болтовых соединений следует применять:

болты классов прочности 5.6, 5.8, 8.8, 10.0 и гайки должны удовлетворять требованиям ГОСТ 1759-87*; шайбы к ним должны удовлетворять требованиям ГОСТ 18123-82*. Болты классов прочности 5.6, 5.8, 8.8 и 10.9 следует назначать по СНиП II-23-81* табл.57 и ГОСТ 15589-70*, ГОСТ 15501-91*, ГОСТ 7796-70*.

Гайки необходимо применять по ГОСТ 5915-70*: для болтов классов прочности 5.6 и 5.8 – гайки класса прочности 5, для болтов класса прочности 8.8 – гайки класса прочности 8, для болтов класса прочности 10.9 – гайки класса прочности 10. Шайбы следует применять: круглые по ГОСТ 11371-78*, косые по ГОСТ 10906-78* и пружинные нормальные по ГОСТ 6402-70*. Допускается применение болтов классов прочности 5.6, 6.8, 8.8, гаек и шайб к ним из стали других марок. Геометрические и механические характеристики таких метизов должны отвечать требованиям соответствующих ГОСТов и СНиП II-23-81* п.2.4.

Высокопрочные болты с минимальным временным сопротивлением 1100 $Н/мм^2$ (далее в тексте – болты класса прочности 110) М16, М20, М24 и М27, гайки и шайбы к ним должны удовлетворять требованиям ГОСТ 22353-77* – ГОСТ

22356-77*. Допускается применение высокопрочных болтов, гаек и шайб к ним из стали других марок. Геометрические и механические характеристики таких болтов должны отвечать требованиям ГОСТ 22353-77*, ГОСТ 22356-77* для болтов исполнения ХЛ, гаек и шайб к ним – ГОСТ 22354-77* – ГОСТ 22356-77*. Применение таких болтов в соединениях для каждого конкретного объекта должно быть согласовано с проектной организацией-автором.

Высокопрочные болты с минимальным временным сопротивлением 1400 Н/мм^2 (далее в тексте – болты класса прочности 140) М16, М20, М24, выполненные из стали марки 20Х2НМТРБПВ, должны удовлетворять требованиям ТУ 14-4-1414-87.

Расчетные сопротивления и усилия. Расчетные сопротивления стали соединяемых элементов фланцев, сварных швов и коэффициенты условий работы следует принимать в соответствии с указаниями главы СНиП II-23-81*. Расчетные сопротивления болтов срезу R_{bs} и растяжению R_{bt} следует определять по формулам, приведенным в табл.3.14.

Таблица 3.14. Определение расчетного сопротивления болтов срезу и растяжению

Напряженное состояние	Расчетное сопротивление болтов классов прочности			
	5.6	5.8	8.8	10.9, 110, 140
Срез R_{bs}	$0{,}38R_{bun}$	$0{,}4R_{bun}$	$0{,}4R_{bun}$	$0{,}4R_{bun}$
Растяжение R_{bt}	$0{,}42R_{bun}$	$0{,}4R_{bun}$	$0{,}5R_{bun}$	$0{,}7R_{bun}$

Примечание. R_{bun} – нормативное сопротивление стали болтов, принимаемое равным временному сопротивлению σ_b по государственным стандартам и техническим условиям на болты.

Расчетные усилия B_0 предварительного натяжения болтов классов прочности 10.9, 110, 140 во фрикционных и фрикционно-срезных соединениях следует принимать

$$B_0 = B_{bt} A_{bn} , \qquad (3.1)$$

где A_{bn} – площадь сечения болта нетто (табл.3.15).

Таблица 3.15. Площадь сечения болтов согласно СТ СЭВ 180-75, СТ СЭВ 181-75 и СТ СЭВ 182-75

d_b, мм	16	20	24	27	30
A, см^2	2,01	3,14	4,52	5,72	7,06
A_{bn}, см^2	1,57	2,55	3,52	4,59	5,6

Расчетные усилия B_0 предварительного натяжения болтов во фрикционных и фрикционно-срезных соединениях приведены в табл.3.16.

Таблица 3.16. Расчетные усилия B_0, кН, предварительного натяжения болтов во фрикционно-срезных соединениях

Класс прочности болтов	Номинальный диаметр болта, мм			
	16	20	24	27
109	141	172	246	321
110	155	189	271	353
140	197	241	344	449

Расчетные усилия B_0 предварительного натяжения болтов во фланцевых соединениях следует принимать

$$B_0 = 0{,}9B_{bt} A_{bn} . \qquad (3.2)$$

Расчетные усилия B_0 предварительного натяжения болтов во фланцевых соединениях приведены в табл.3.17.

Таблица 3.17. Расчетные усилия B_0, кН, предварительного натяжения болтов во фланцевых соединениях

Класс прочности	Номинальный диаметр болта, мм		
	20	24	27
110	170	244	318

Расчетные сопротивления одноболтовых соединений смятию соединяемых элементов R_{bp} из стали с пределом текучести до 440 МПа следует определять по формулам, приведенным в табл.3.18.

Таблица 3.18. Определение расчетного сопротивления одноболтовых соединений смятию элементов

Группа конструкции	Расчетное сопротивление смятию при расстояниях		
	$a \geq 3d$	$2d \leq a < 3d$	$1{,}5d \leq a < 2d$
1	$0{,}94R_{un}$	$0{,}94R_{un}$	$0{,}94R_{un}$
2	$1{,}48R_{un}$	$1{,}48R_{un}$	$1{,}17R_{un}$
3	$1{,}58R_{un}$	$1{,}48R_{un}$	$1{,}17R_{un}$

Обозначения, принятые в табл.3.18: a – расстояние вдоль усилия от края элемента до центра ближайшего отверстия; d – диаметр отверстия для болта; R_{un} – временное сопротивление стали соединяемых элементов разрыву, МПа. Если соединяемые элементы (в том числе накладки) выполнены из стали разных марок, то в формулах следует принимать наименьшее из значений временного сопротивления R_{un}.

Примечание. Расстояние вдоль усилия между центрами отверстий – $в$ должно быть больше расстояния a по крайней мере на $0{,}5d$. В противном случае $a = в - 0{,}5d$. Расчетные сопротивления смятию соединяемых элементов приведены в прилож.4 [2].

3.3.2. Конструирование болтовых соединений. Номинальные диаметры стержней болтов и соответствующие им номинальные диаметры отверстий приведены в табл.3.19. При назначении диаметров отверстий для соединений, воспринимающих усилия сдвига (фрикционные, срезные и фрикционно-срезные), необходимо учитывать влияние остаточных перемещений сдвига на поведение конструкций и обеспечивать полную собираемость соединений на монтаже. В тех случаях, когда не обеспечивается полная собираемость двухсрезных фрикционных соединений, допускается назначение номинальных диаметров отверстий средних стыкуемых элементов, превышающих указанные в табл.3.19. При этом разность номинальных диаметров отверстий и болтов должна быть не более 12 мм; в этом случае в числитель формулы (3.4) вводится коэффициент $k_\delta = 0{,}9$, а толщина накладок должна быть не менее 20 мм.

Конструирование соединений, воспринимающих усилия сдвига. Под гайки болтов классов прочности 5.6, 5.8, 8.8, 10.9 следует устанавливать круглые шайбы по ГОСТ 11371-78*, под гайки и головки высокопрочных болтов – шайбы по ГОСТ 22356-77*. Для высокопрочных болтов по ГОСТ 22353-77* с увеличенными размерами головок и гаек и при разности номинальных диаметров отверстия и болта, не превышающей 3 мм, а в конструкциях, изготовленных из стали с временным сопротивлением не ниже 440 МПа, не превышающей 4 мм, допускается установка одной шайбы под гайку. В срезных и фрикционно-срезных соединениях резьба болта должна находиться на глубине менее половины толщины прилегающего к гайке элемента.

Таблица 3.19. Номинальные диаметры стержней болтов и диаметры отверстий

Тип соединений	Номинальный диаметр отверстий, мм при диаметре стержня болтов			
	16	20	24	27
Фрикционные	17 19 20	21 23 25	25 28 30	28 30 33
Срезные	17* 18 19	21* 22 23	25* 26 27	28* 29 30
Фрикционно-срезные	17 18 19	21 22 23	25 26 27	28 29 30
Фланцевые	18 19	22 23	27 28	30 31

* Применять только для опор ВЛ.

Болты следует размещать в соответствии с табл.3.20. Соединительные болты должны размещаться, как правило, на максимальных расстояниях; в стыках и узлах необходимо размещать болты на минимальных расстояниях. При размещении болтов в шахматном порядке расстояние между их центрами вдоль усилия следует принимать не менее $C + 1{,}5d$, где C – расстояние между рядами поперек действия усилия; d – диаметр отверстия для болта. При таком размещении площадь сечения элемента определяется с учетом ослабления его отверстиями, расположенными только в одном сечении поперек усилия (не по "зигзагу").

Конструирование фланцевых соединений (ФС). ФС элементов, подверженных центральному растяжению, следует применять для передачи усилия, кН, не превышающего для элементов из:

парных уголков – 3000;

одиночных уголков – 1900;

широкополочных двутавров и круглых труб –3500;

широкополочных тавров и прямоугольных труб – 2500.

ФС сварных или прокатных двутавров, подверженных изгибу или совместному действию изгиба и растяжения, необходимо использовать, если суммарное растягивающее усилие, воспринимаемое ФС от растянутой зоны присоединяемого элемента, не превышает 3000 кН.

Для ФС элементов стальных конструкций следует применять высокопрочные болты диаметром 24 мм (М24); использование болтов М20 и М27 можно допускать в тех случаях, когда постановка болтов М24 невозможна или нерациональна.

При конструировании ФС применяются следующие сочетания диаметра болтов и толщины фланцев:

Диаметр болта	Толщина фланца, мм
М20	20
М24	25
М27	30

Толщина фланцев проверяется расчетом в соответствии с указаниями п.3.3.3.

Болты растянутых участков фланцев разделяют на болты внутренних зон, ограниченных стенками (полками профиля, ребрами жесткости) с двух и более сторон, и болты наружных зон, ограниченных с одной стороны (рис.3.9); характер работы и расчет ФС в этих зонах различны.

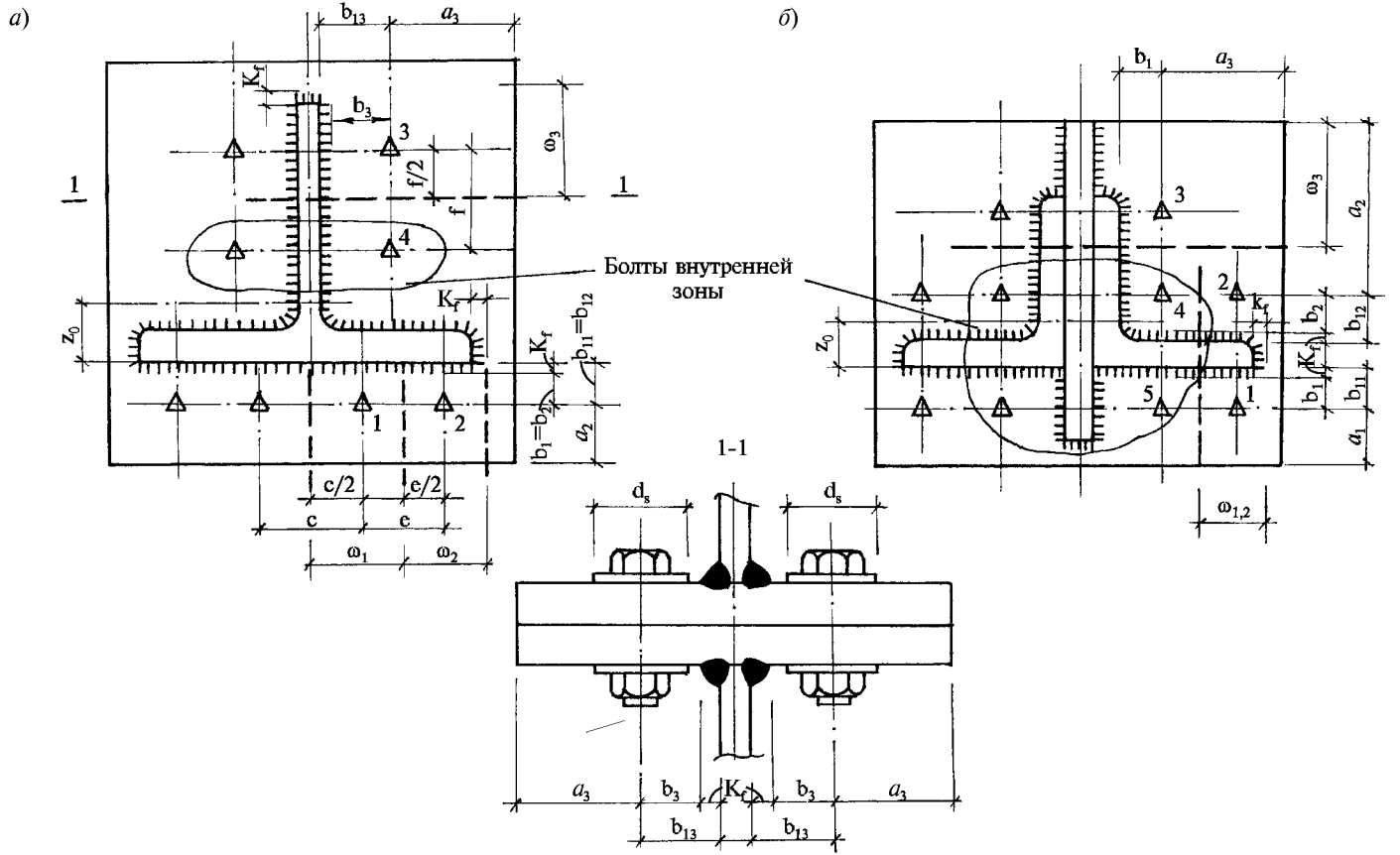


Рис.3.9. Фланцевые соединения растянутых элементов открытого профиля
а – ФС элементов из широкополочных тавров; *б* – ФС – элементов из парных уголков

Таблица 3.20. Размещение болтов

Расстояние при размещении болтов	Значение расстояния
Расстояние между центрами болтов в любом направлении для всех видов соединений:	
минимальное	$2d$
максимальное в крайних рядах при отсутствии окаймляющих уголков при растяжении и сжатии	$8d$ или $12t$
Максимальное в средних рядах, а также в крайних рядах при наличии окаймляющих уголков:	
при растяжении	$16d$ или $24t$
при сжатии	$12d$ или $18t$
Срезные и фрикционно-срезные соединения	
Расстояние от центра болта до края элемента:	
минимальное вдоль усилия	$1{,}5d$*
то же, поперек усилия при $1{,}5d \le a \le 2d$ и $2d \le b \le 2{,}5d$:	
при обрезных кромках	$1{,}5d$
при прокатных кромках	$1{,}2d$
то же, поперек усилия при $a > 2d$ и $b > 2{,}5d$:	
при обрезных кромках	$1{,}8d$
при прокатных кромках	$1{,}5d$
максимальное	$4d$
Фрикционные соединения	
Расстояние от центра болта до края элемента:	
минимальное при любой кромке и любом направлении	$1{,}3d$
максимальное	$4d$

* В соединяемых элементах из стали с пределом текучести свыше 380 МПа минимальное расстояние между центрами болтов следует принимать равным $3d$, а минимальное расстояние от центра болта до края элемента вдоль усилия – $2{,}5d$.

Примечание. Обозначения, принятые в табл.3.20: d – диаметр отверстия для болта; t – толщина наиболее тонкого элемента; a – расстояние вдоль усилия от края элемента до центра ближайшего отверстия; b – то же между центрами отверстий.

Болты растянутых участков фланцев следует располагать по возможности равномерно по контуру и как можно ближе к элементам присоединяемого профиля, при этом (см.рис.3.9):

$$\left.\begin{array}{l} K_f + d_s / 2 + 2 \le b_{1j} \le 3d_b\,; \\ a \ge 2d_b\,; \\ \omega_j \le 5d_b\,; \end{array}\right\} \qquad (3.3)$$

где b_{1j} – расстояние от центра отверстия до края профиля соединяемого элемента j-го участка фланца; d_s – наружный диаметр шайбы; d_b – номинальный диаметр резьбы болта; ω_j – ширина фланца, приходящаяся на j-ый болт наружной зоны; k_f – катет углового шва.

Если по конструктивным особенностям ФС $a > 1{,}2b_{1j}$, то в расчетах на прочность ФС величину «a» принимают равной $1{,}2b_{1j}$.

При конструировании ФС элементов, подверженных воздействию центрального растяжения, болты следует располагать безмоментно относительно центра тяжести присоединяемого профиля с учетом неравномерности распределения внешних усилий между болтами наружной и внутренней зон (см.табл.3.29). Если такое расположение болтов невозможно, то несущую способность ФС определяют с учетом действия местного изгибающего момента.

Конструктивная схема соединяемых элементов (полуфермы, рамные конструкции и др.) должна обеспечивать возможность свободной установки и натяжения болтов, в том числе выполнения контроля усилий натяжения болтов согласно п.3.3.4. Сварные швы фланца с присоединяемым профилем следует выполнять угловыми без разделки кромок. В обоснованных случаях может быть допущена сварка с разделкой кромок. Если несущая способность сварных швов присоединения профиля к фланцу недостаточна для передачи внешних силовых воздействий или необходимо повысить несущую способность растянутых участков ФС без увеличения числа болтов или толщины фланцев, то последние следует усиливать ребрами жесткости (рис.3.10).

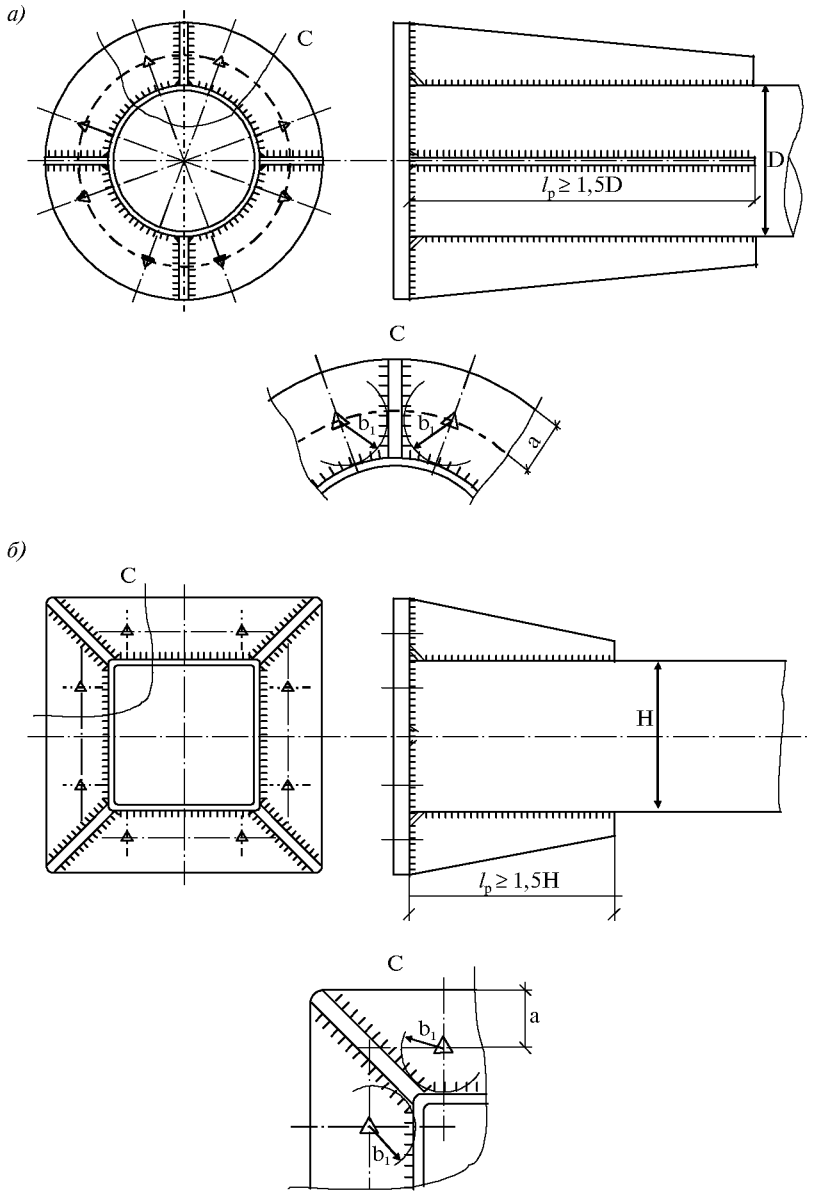


Рис.3.10. Фланцевые соединения растянутых элементов замкнутого профиля
а – ФС элементов из круглых труб; *б* – ФС элементов из гнутосварных профилей

Толщина ребер жесткости не должна превышать 1,2 толщины элементов основного профиля, длина должна быть не менее 200 мм. Ребра жесткости следует располагать так, чтобы концентрация напряжений в сечении основных профилей была минимальной. Ребра жесткости могут быть использованы для крепления связей, путей подвесного транспорта и т.п.

ФС элементов из круглых труб, подверженных воздействию центрального растяжения, следует выполнять со сплошными фланцами и ребрами жесткости в количестве не менее 3 шт. Ширина ребер определяется разностью радиусов фланцев и труб, длина – не менее 1,5 диаметра трубы (рис.3.10).

ФС элементов из гнутосварных профилей прямоугольного или квадратного сечений, подверженных воздействию центрального растяжения, следует выполнять со сплошными фланцами и ребрами жесткости, расположенными, как правило, вдоль углов профиля (рис.3.10). Ширина ребер определяется размерами фланца и профиля, длина – не менее 1,5 высоты меньшей стороны профиля.

Если между ребрами жесткости будет размещено более двух болтов или ребра жесткости будут установлены не только вдоль углов профиля, то ФС элементов из гнутосварных профилей данного типа могут быть применены только после экспериментальной проверки натурных соединений данного типа.

ФС элементов из прокатных широкополочных или сварных двутавров, подверженных воздействию изгиба, необходимо выполнять со сплошными фланцами с постановкой ребра жесткости на растянутом поясе в плоскости стенки двутавра. При необходимости увеличения количества болтов и ширины фланцев соответствующее уширение поясов двутавров осуществляется приваркой дополнительных фасонок (рис.3.11,*а*).

ФС элементов из прокатных широкополочных или сварных двутавров, подверженных воздействию изгиба, можно выполнять со сплошными фланцами, высота которых не превышает высоты двутавра (рис.3.11,*б*). Такие соединения следует применять, если расчетный момент в рамных соединениях ниже несущей способности двутавров на изгиб.

При необходимости уменьшения количества болтов или увеличения жесткости растянутых участков ФС допустимо применять составные фланцы, увеличивая их толщину на растянутом участке до 36–40 мм (рис.3.11,*в*). Если изгибающий момент в рамных соединениях превышает несущую способность двутавра на изгиб, следует предусматривать устройство вутов (рис.3.11,*г*).

Для ФС элементов, подверженных воздействию сжатия, когда не предусмотренные проектом (КМ) эксцентриситеты передачи продольных усилий недопустимы, необходимо строго выполнять требования по точности изготовления и монтажа ФС, изложенные в п.3.3.4. В таких соединениях следует предусматривать также установку болтов с суммарным предварительным натяжением, равным расчетному усилию сжатия в соединяемых элементах.

3.3.3. Расчет болтовых соединений. *Фрикционные соединения.* При действии продольной силы, проходящей через центр тяжести соединения, распределение этой силы между болтами следует принимать равномерным. При действии на соединение изгибающего момента M распределение усилий между болтами следует принимать равномерным (при прямоугольных эпюрах распределения усилий между болтами (рис.3.12).

Расчетное усилие Q_h, которое может быть воспринято каждой поверхностью трения соединяемых элементов, стянутых одним болтом, следует определять по формуле

$$Q_h = 0,1 R_{bh} \gamma_n A_{bn} \mu / \gamma_h \,, \qquad (3.4)$$

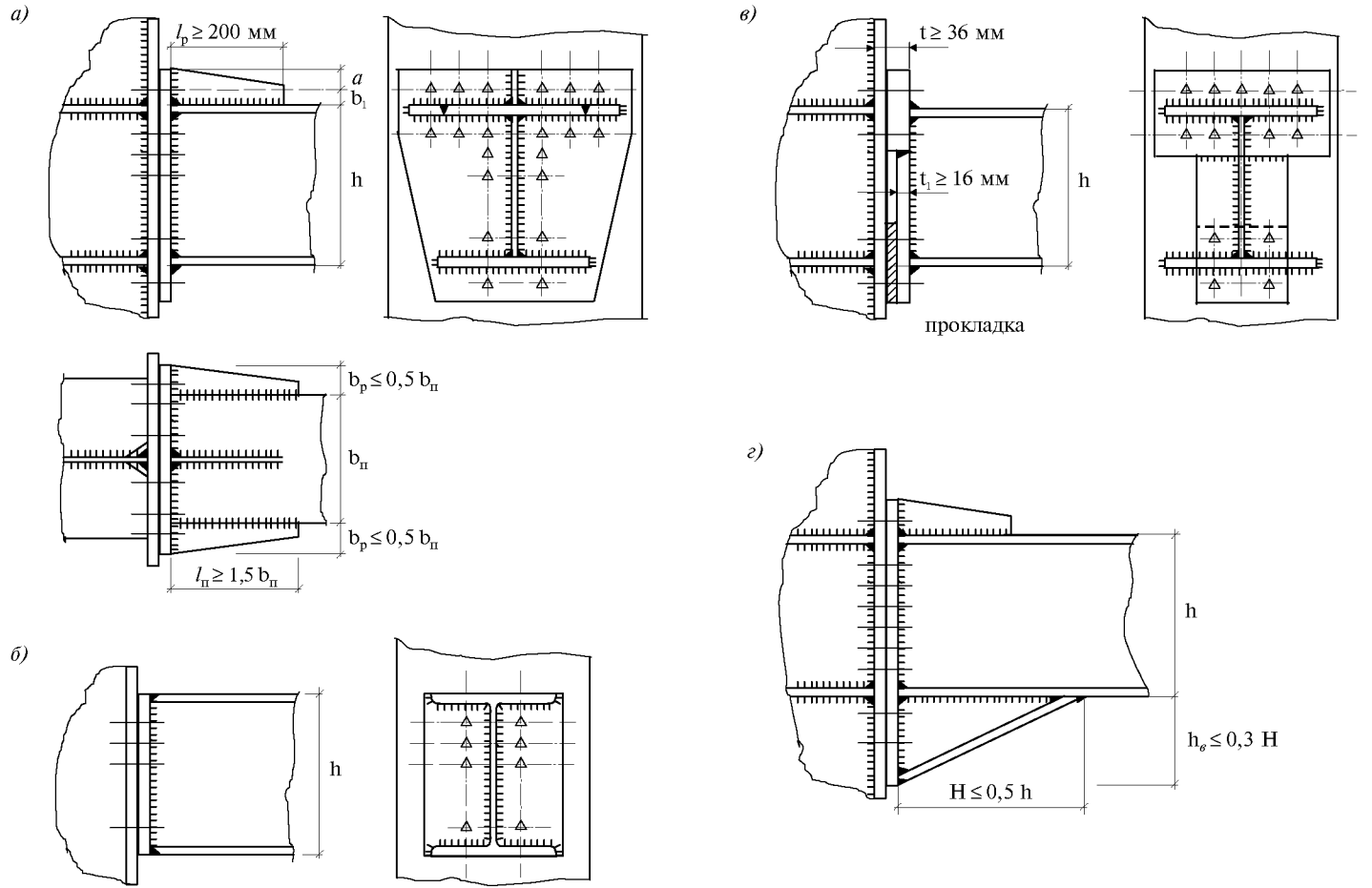


Рис.3.11. Фланцевые соединения изгибаемых элементов из прокатных или сварных двутавров

где γ_n – коэффициент условий работы соединения, зависящий от количества n болтов, необходимых для восприятия расчетного усилия, и принимаемый равным: 0,8 при $n < 5$; 0,9 при $5 \le n < 10$; 1 при $n \ge 10$; μ – коэффициент трения, принимаемый по табл.3.21; γ_h – коэффициент надежности, принимаемый также по табл.3.21.

Таблица 3.21. Значения коэффициентов γ_h и μ

Способ обработки (очистки) соединяемых поверхностей	Способ регулирования натяжения болтов	Коэффициент трения, μ	Коэффициенты γ_h при нагрузке и при разности номинальных диаметров отверстий и болтов δ, мм	
			динамической и при δ=2...6, статической и при δ=5...6	динамической и при δ=1, статической и при δ=1...4
Дробеметный или дробеструйный двух поверхностей дробью без консервации	по M по α	0,58 0,58	1,35 1,2	1,12 1,02
То же, с консервацией металлизацией распылением цинка или алюминия	по M по α	0,5 0,5	1,35 1,2	1,12 1,02
Дробью одной поверхности с консервацией полимерным клеем и посыпкой карборундовым порошком; стальными щетками без консервации другой поверхности	по M по α	0,5 0,5	1,35 1,2	1,12 1,02
Газопламенный двух поверхностей без консервации	по M по α	0,42 0,42	1,35 1,2	1,12 1,02
Стальными щетками двух поверхностей без консервации	по M по α	0,35 0,35	1,35 1,25	1,17 1,06
Без обработки	по M по α	0,25 0,25	1,7 1,5	1,3 1,2

Примечания. 1. Допускаются другие способы обработки соединяемых поверхностей, обеспечивающие значения коэффициентов трения μ не ниже указанных в табл.3.21. 2. Способ регулирования натяжения болтов по M означает регулирование по моменту закручивания, по α – углу поворота гайки.

Расчетные усилия, которые могут быть восприняты каждой поверхностью трения соединяемых элементов, стянутых одним высокопрочным болтом М24, приведены в табл.3.22.

Количество n болтов в соединении при действии продольной силы N следует определять по формуле

$$n \ge N / (K_{\text{тр}}\, Q_h), \tag{3.5}$$

где $K_{\text{тр}}$ – количество поверхностей трения соединяемых элементов.

Расчет на выносливость фрикционных соединений следует выполнять в соответствии с требованиями п.9.2 СНиП II-23-81*, относя эти соединения к 1-й группе элементов.

Расчет на прочность соединяемых элементов, ослабленных отверстиями под болты, следует выполнять с учетом того, что половина усилия, приходящегося на каждый болт, в рассматриваемом сечении уже передана силами трения. При этом проверку ослабленных сечений следует производить: при динамических нагрузках – по площади сечения нетто A_n , при статических нагрузках – по площади сечения брутто A при $A_n \ge 0{,}85A$, либо по условной площади $A_c = 1{,}18A_n$ при $A_n \le 0{,}85A$.

Таблица 3.22. Расчетные усилия Q_{h1} и Q_{h2}, которые могут быть восприняты каждой поверхностью трения соединяемых элементов, стянутых одним высокопрочным болтом М24 из стали 40Х «Селект»

Способ обработки (очистки) соединяемых поверхностей	Способ регулирования натяжения болтов	Q_{h1} и Q_{h2}, кН, при числе болтов в соединении					
		$n \le 4$		$5 \le n \le 9$		$n \ge 10$	
		Q_{h1}	Q_{h2}	Q_{h1}	Q_{h2}	Q_{h1}	Q_{h2}
Дробеметный или дробеструйный двух поверхностей дробью без консервации	по M по α	93 105	112 123	104 118	126 139	116 131	140 154
То же, с консервацией металлизацией распылением цинка или алюминия	по M по α	80 90	97 106	90 102	109 120	100 113	121 133
Дробью одной поверхности с консервацией полимерным клеем и посыпкой карборундовым порошком; стальными щетками без консервации другой поверхности	по M по α	80 90	97 106	90 102	109 120	110 113	121 133
Газопламенный поверхностей без консервации	по M по α	67 76	82 90	76 86	92 92	84 84	102 112
Стальными щетками двух поверхностей без консервации	по M по α	56 61	65 72	63 68	73 81	70 76	81 90
Без обработки	по M по α	32 36	42 45	36 41	47 50	40 45	52 56

Примечания. Q_{h1} – расчетные усилия, которые могут быть восприняты каждой поверхностью трения соединяемых элементов, стянутых одним болтом М24, при динамической нагрузке и δ=2...6 мм, при статической нагрузке и δ=5...6 мм; Q_{h2} – то же, при динамической нагрузке и δ=1 мм, при статической нагрузке и δ=1...4 мм; δ – разность номинальных диаметров отверстий и болтов.

Срезные соединения. При действии продольной силы, проходящей через центр тяжести соединения, распределение этой силы между болтами следует принимать равномерным. При действии на соединение изгибающего момента распределение усилий между болтами следует принимать пропорционально расстояниям от центра тяжести соединения до рассматриваемого болта (при треугольных эпюрах распределения усилий между болтами, рис.3.13).

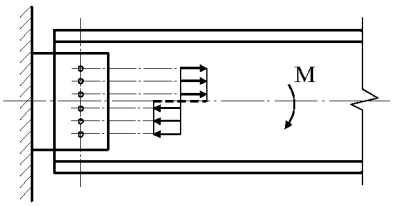


Рис.3.12. Распределение усилий между болтами фрикционного соединения при действии изгибающего момента

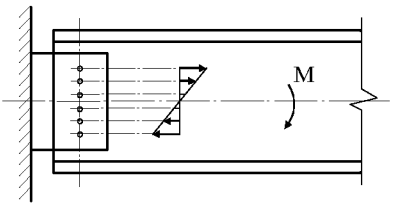


Рис.3.13. Распределение усилий между болтами срезного и фрикционно-срезного соединения при действии изгибающего момента

Болты, работающие на срез от одновременного действия продольной силы и изгибающего момента, необходимо проверять на равнодействующее усилие. Расчетное усилие, которое может быть воспринято одним болтом, следует определять по формулам:

на срез:

$$N_{bs} = 0,1 R_{bs} \gamma_{b1} A n_s ; \qquad (3.6)$$

на смятие:

$$N_{bp} = 0,1 R_{bp} \gamma_{b1} \gamma_{b2} \gamma(t) d_b , \qquad (3.7)$$

где γ_{b1} – коэффициент условий работы, учитывающий неодновременность включения болтов в работу, который следует принимать по табл.3.23; γ_{b2} – коэффициент условий работы, учитывающий расстояния вдоль усилия от края элемента до центра ближайшего отверстия и между центрами отверстий, который следует принимать по табл.3.24; $A = \pi d^2 / 4$ – расчетная площадь сечения стержня болта, см^2 (см.табл.3.15); n_s – число расчетных срезов одного болта; $\gamma(t)$ – коэффициент, учитывающий толщину соединяемых элементов, определяемый

$$\gamma(t) = \begin{cases} t & - \text{ при } t \le 2 \text{ см} \\ -0,5t^2 + 3t - 2 & - \text{ при } 2 < t < 3 \text{ см} \\ 2,5 & - \text{ при } t \ge 3 \text{ см} \end{cases} \qquad (3.8)$$

t – наименьшая суммарная толщина элементов, сминаемых в одном направлении; d_b – номинальный наружный диаметр стержня болта, см.

Таблица 3.23. Коэффициент условий работы соединения γ_{b1}

Характеристика соединения	Коэффициент условий работы соединения, γ_{b1}
Одноболтовое в расчетах на срез и смятие	1
Многоболтовое в расчетах на срез и смятие	0,9

Таблица 3.24. Коэффициент условий работы соединения γ_{b2}

Характеристика соединения	Коэффициент условий работы соединения, γ_{b2}
Одноболтовое и многоболтовое в расчетах на смятие: при $1,5d \le a < 3d$	$0,25\frac{a}{d} + 0,5$
при $a \ge 3d$	1,25

Примечание. Расстояние b должно быть больше расстояния a, по крайней мере, на $0,5d$. В противном случае $a = b - 0,5d$.

Расчетные усилия, которые могут быть восприняты одним болтом многоболтового соединения на срез с одной плоскостью среза, приведены в табл.3.25.

Таблица 3.25. Расчетные усилия N_{bs}, кН, которые могут быть восприняты одним болтом многоболтового соединения на срез с одной плоскостью среза

Класс прочности болтов	N_{bs} при номинальном диаметре болтов, мм			
	16	20	24	27
5.8	36	57	81	103
8.8	58	90	130	164
10.9	72	113	163	206
Высокопрочные из стали марки 40Х «Селект»	79	124	179	226

Количество n болтов в соединении при действии продольной силы N следует определять по формуле

$$n \geq N / Q_b , \tag{3.9}$$

где Q_b – меньшее из расчетных усилий для одного болта N_{bs} и N_{bp}, вычисленных по формулам (3.6) и (3.7).

Возникающие при работе соединений перемещения смятия каждого элемента – u от действия расчетных нагрузок следует определять:

а) при $N_{bp} \leq N_{bs}$ – по табл.3.26.

Таблица 3.26. Определение расчетных сопротивлений смятию в зависимости от перемещений смятия соединяемых элементов

Расчетное сопротивление смятию R_{bp}, МПа	Перемещения смятия каждого соединяемого элемента u, мм, от расчетных нагрузок
0,94	1
1,17	1,75
1,48	3
1,58	3,5

Допускается принимать значения перемещений смятия каждого соединяемого элемента u от действия расчетных нагрузок меньше значений, приведенных в табл.3.27, при этом расчетное сопротивление одноболтовых соединений смятию следует определять по формуле

$$R_{bp} = K f R_{un} , \tag{3.10}$$

где f – коэффициент, равный

$$f = 1{,}08u \quad \text{при} \quad 0 < u \leq 0{,}8 \text{ мм}; \tag{3.11}$$

$$f = 0{,}57 + 0{,}4u - 0{,}032 \quad \text{при} \quad 0{,}8 < u \leq 3{,}5 \text{ мм}. \tag{3.12}$$

Таблица 3.27. Значения перемещения смятия от расчетных нагрузок

Расчетное сопротивление смятию R_{bp}, МПа	Коэффициент снижения предварительного натяжения болтов K_u
—	0,85
0,94 R_{un}	0,826
1,17 R_{un}	0,808
1,48 R_{un}	0,778
1,58 R_{un}	0,766

Коэффициент f в зависимости от перемещений смятия каждого соединяемого элемента u приведен в табл.3.28;

б) при $N_{bs} < N_{bp}$ – по формулам (3.11), (3.12) и по табл.3.28, заменяя в формуле (3.7) N_{bp} на N_{bs}.

Прочность элементов, ослабленных отверстиями в срезных соединениях, следует проверять с учетом полного ослабления сечений отверстиями.

Фрикционно-срезные соединения. Распределение усилий между болтами во фрикционно-срезных соединениях аналогично распределению усилий в срезных соединениях (см.п.3.3.3). Расчетное усилие, которое может быть воспринято одним болтом, следует определять по формулам: на срез – см.формулу (3.6); на смятие и трение

$$N_{bh} = N_{bp} + K_u Q_h , \tag{3.12}$$

где N_{bp} – расчетное усилие, кН, которое может быть воспринято одним болтом по смятию, определяемое по формуле (3.7); K_u – коэффициент уменьшения предварительного натяжения болтов, который следует находить по табл.3.27;

Таблица 3.28. Коэффициент f в зависимости от перемещения смятия соединяемых элементов

u, мм	f	u, мм	f
0,1	0,1	1,8	1,19
0,2	0,22	1,9	1,21
0,3	0,32	2	1,24
0,4	0,43	2,1	1,27
0,5	0,54	2,2	1,3
0,6	0,65	2,3	1,32
0,7	0,76	2,4	1,35
0,8	0,86	2,5	1,37
0,9	0,9	2,6	1,39
1	0,94	2,7	1,42
1,1	0,97	2,8	1,44
1,2	1	2,9	1,46
1,3	1,04	3	1,48
1,4	1,07	3,1	1,5
1,5	1,1	3,2	1,52
1,6	1,13	3,3	1,54
1,7	1,16	3,4	1,56
1,75	1,17	3,5	1,58

Если расчетные сопротивления смятию приняты отличными от приведенных в табл.3.27, коэффициент уменьшения предварительного натяжения болтов следует определять линейной интерполяцией. Q_h – расчетное усилие, которое может быть воспринято каждой поверхностью трения соединяемых элементов, стянутых одним болтом, вычисляемое по формуле (3.4).

Количество n болтов в соединении при действии продольной силы N следует определять по формуле

$$n \geq N / Q_{bh}, \qquad (3.13)$$

где Q_{bh} – меньшее из расчетных усилий для одного болта N_{bs} и N_{bh}, вычисленных по формулам (3.6) и (3.12).

Возникающие при работе соединений перемещения смятия каждого элемента u от действия расчетных нагрузок следует находить:

при $N_{bh} \leq N_{bs}$ – по табл. 3.26;

при $N_{bs} < N_{bh}$ – по формулам (3.11), (3.12) и по табл.3.28, заменяя в формуле (3.12) N_{bh} на N_{bs}, учитывая зависимость между коэффициентом уменьшения предварительного натяжения болтов и перемещениями смятия каждого соединяемого элемента u, мм:

$$K_u = 0{,}85 - 0{,}24u. \qquad (3.14)$$

Расчет на выносливость фрикционно-срезных соединений следует выполнять в соответствии с требованиями п.9.2 СНиП II-23-81*, относя соединения с элементами из стали с временным сопротивлением разрыву более 420 МПа к второй группе элементов, а менее 420 МПа – к третьей группе.

Прочность элементов, ослабленных отверстиями во фрикционно-срезных соединениях, следует проверять с учетом полного ослабления сечений отверстиями.

Фланцевые соединения (ФС). ФС элементов стальных конструкций следует проверять расчетами на: прочность болтов; прочность фланцев на изгиб; прочность соединений на сдвиг; прочность сварных швов соединения фланца с элементом конструкции. Предлагаемые методы расчета следует применять только для ФС, конструктивная форма которых отвечает требованиям п.3.3.2.

Предельное состояние ФС определяют следующие условия:

- усилие в наиболее нагруженном болте, вычисленное с учетом совместной работы болтов соединения, не должно превышать расчетного усилия растяжения болта;
- изгибные напряжения во фланце не должны превышать расчетное сопротивление стали фланца по пределу текучести.

Расчет прочности ФС элементов открытого профиля, подверженных центральному растяжению. Количество болтов внутренней зоны n_b определяет конструктивная форма соединения. Количество болтов наружной зоны предварительно назначают из условия

$$n_{\text{н}} = (N - n_{в} N_{\text{вп}}) / N_{\text{нп}} ,$$

где N – внешняя нагрузка на соединение; $N_{\text{вп}}$ – предельное внешнее усилие на один болт внутренней зоны, равное 0,9 B_p; $B_p = R_{bt} A_{bn}$ – расчетное усилие растяжения болтов; $N_{\text{нп}}$ – предельное внешнее усилие на один болт наружной зоны, равное N_n / K; K – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение внешней нагрузки между болтами внутренней и наружной зон, определяемый по табл.3.29.

Таблица 3.29. Значение коэффициента K

Диаметр болта	Толщина фланца, мм	Соотношение внешних усилий на один болт внутренней и наружной зон $K = N_в / N_н$
*M*20	16	2,5
	20	1,7
	25	1,4
	30	1,2
*M*24	20	2,6
	25	1,8
	30	1,5
	40	1,1
*M*27	25	2,1
	30	1,7
	40	1,2

Прочность фланца и болтов, относящихся к внутренней зоне, следует считать обеспеченной, если: болты расположены в соответствии с указаниями п.3.3.2, толщина фланца составляет 20 мм и выше, а усилие на болт от действия внешней нагрузки не превышает

$$N_{\text{b}} \le N_{\text{bn}} = 0{,}9 B_p . \qquad (3.16)$$

При расчете на прочность болтов и фланца, относящихся к наружной зоне, выделяют отдельные участки фланцев, которые рассматриваются как T-образные (см.рис.3.9) шириной ω_j .

Прочность ФС следует считать обеспеченной, если

$$N \le T, \qquad (3.17)$$

где T – расчетное усилие растяжения, воспринимаемое ФС, определяемое по формулам:

$$T = \left(n_{\text{b}} + \frac{n_{\text{н}}}{K} \right) N_{\text{bn}} , \qquad (3.18)$$

если $N_{\text{н}} \ge N_{\text{нп}}$;

$$T = \left(n_{\text{н}} + K n_{\text{b}} \right) , \qquad (3.19)$$

если $N_{\text{н}} < N_{\text{нп}}$,

где $N_н = \min N_{нj}$, $N_{нj} = \min (N_{фj}, N_{δj})$; $N_{δj}$ – расчетное усилие на болт, определяемое из условия прочности соединения по болтам; $N_{фj}$, $N_{δj}$ – расчетное усилие на болт;

$$N_{δj} = \lambda_j B_p , \tag{3.20}$$

где λ_j – коэффициент, зависящий от безразмерного параметра жесткости болта $æ_j$, определяемый по табл.3.30 или по формулам:

$$\lambda_j = 0{,}5088 - 0{,}2356 \lg æ_j ; \tag{3.21}$$

$$æ_j = \frac{d_b^2}{\omega_j (t + d_b / 2)} \left(\frac{b_j}{t} \right)^3 ; \tag{3.22}$$

$$N_{фj} = 1{,}3 \frac{\alpha + 1}{\mu\alpha} B_p , \tag{3.23}$$

где $\mu = \dfrac{0{,}9 B_p b_j}{M_j}$; $M_j = \dfrac{\omega_j t^2}{6} R_y$;

α – параметр, выражающий соотношение расстояний от центра болта до места приложения контактных «рычажных» усилий и до края профиля соединяемого элемента, определяемый по табл.3.31 или из уравнения

$$1{,}4\, æ_j(\alpha - 1)^3 - \alpha^2 + \mu\alpha(\alpha - 1) = 0; \tag{3.24}$$

t – толщина фланца; ω_j – ширина фланца, приходящаяся на один болт наружной зоны; b_j – расстояние от оси болта до края сварного шва j-го T-образного участка фланца.

Расчет ФС элементов открытого профиля, подверженных изгибу и совместному действию изгиба и растяжения. Максимальные и минимальные значения нормальных напряжений в присоединяемом профиле $\sigma_{\min}^{\max}$ от действия изгиба и продольных сил определяют в плоскости его соединения с фланцем по формуле[1]

$$\sigma_{\min}^{\max} = \pm \frac{M}{W_{\max}^{\min}} \pm \frac{N}{A} , \tag{3.25}$$

где M, N – изгибающий момент и продольное усилие, воспринимаемые ФС; $W_{\max}^{\min}$ – момент сопротивления сечения присоединяемого профиля; A – площадь поперечного сечения присоединяемого профиля.

Усилия в поясах присоединяемого профиля $N_{f1,2}$ определяют по формуле

$$N_{f1,2} = (A_{f1,2} + A_{w\,1,2}), \tag{3.26}$$

где $A_{f1,2}$ – площадь поперечного сечения пояса f_1 или f_2 (рис.3.14); $A_{w\,1,2} = h_{w\,1,2}\, t_w$ – площадь поперечного сечения участка стенки в зоне болтов растянутого пояса;

$$h_{w1} = a_1 + 0{,}5\omega_1 - t_{f1} ;$$
$$h_{w2} = a_2 + 0{,}5\omega_n - t_{f2} ;$$

t_w , $t_{f1,2}$, h – толщина стенки, полок и высота присоединяемого профиля; остальные обозначения приведены на рис.3.14.

Усилия в растянутой части стенки присоединяемого профиля определяют по формулам:

$$\left.\begin{aligned} N_w &= 0{,}5\sigma_{\max} t_w (h_0 - h_{w1}) \ ; \ \text{при} \ -\infty < m \le 0 \ \text{ и } \ \sigma_{\max} > 0; \\ N_w &= \frac{m+1}{2} \sigma_{\max} t_w (h - h_{w1} - h_{w2}) \ ; \ \text{при} \ 0 \le m \le 1 \ \text{и} \ \sigma_{\max} > 0 \end{aligned}\right\} \tag{3.27}$$

где $m = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$; $h_0 = h / (1\text{-}m)$.

[1] Для упрощения при расчете ω, σ, A_f, A наличием ребер, ужесточающих фланец, можно пренебречь.

Таблица 3.30. Значение коэффициента λ

æ	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
λ	0,907	0,836	0,796	0,767	0,744	0,673	0,602	0,561	0,532	0,509
æ	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	15
λ	0,467	0,438	0,415	0,396	0,367	0,344	0,325	0,296	0,273	0,232

Таблица 3.31. Значение параметра α

æ	μ									
	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,7	3	4	5
0,02	3,252	2,593	2,221	1,986	1,826	1,710	1,586	1,499	1,333	1,250
0,06	2,290	2,481	2,171	1,962	1,812	1,702	1,582	1,497	1,333	1,250
0,1	2,782	2,398	2,130	1,939	1,799	1,694	1,578	1,494	1,332	1,249
0,5	2,186	2,036	1,908	1,776	1,711	1,636	1,545	1,475	1,327	1,248
1	1,949	1,860	1,780	1,707	1,643	1,586	1,514	1,454	1,321	1,246
2	1,757	1,704	1,653	1,607	1,564	1,524	1,470	1,424	1,312	1,242
3	1,660	1,621	1,584	1,548	1,515	1,488	1,440	1,402	1,303	1,238
4	1,599	1,568	1,537	1,508	1,480	1,454	1,417	1,384	1,296	1,235
5	1,555	1,529	1,503	1,478	1,454	1,431	1,399	1,370	1,289	1,232
6	1,522	1,498	1,476	1,454	1,433	1,413	1,384	1,357	1,283	1,230
8	1,473	1,454	1,436	1,418	1,401	1,384	1,360	1,337	1,273	1,224
10	1,438	1,422	1,406	1,391	1,377	1,362	1,341	1,322	1,264	1,219
15	1,381	1,369	1,358	1,346	1,335	1,324	1,308	1,293	1,247	1,210

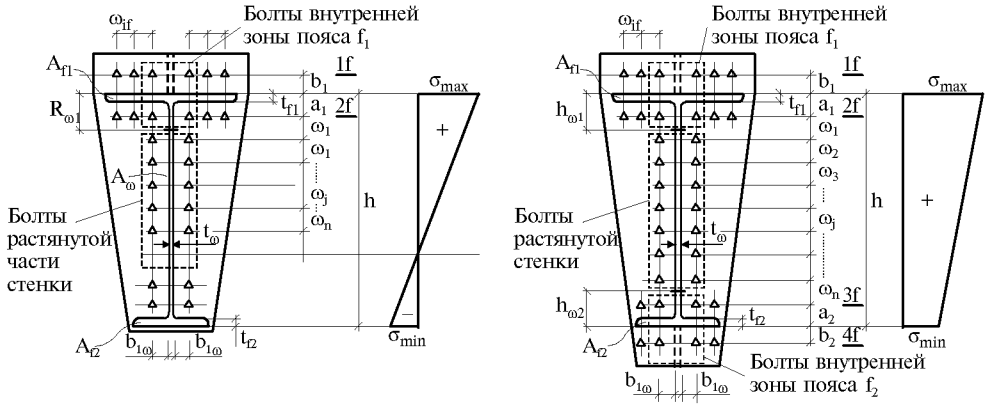


Рис.3.14. К расчету фланцевых соединений изгибаемых элементов из двутавра

Прочность ФС считается обеспеченной, если:

при $-\infty < m \le 0, \quad \sigma_{max} > 0$

$$\left.\begin{array}{l} N_{f1} \le N_{fp1} \\ N_w \le N_{wp} \end{array}\right\}; \tag{3.28}$$

при $0 \le m \le 1, \quad \sigma_{max} > 0$

$$\left.\begin{array}{l} N_{f1} \le N_{fp1} \\ N_w \le N_{wp} \\ N_{f2} \le N_{fp2} \end{array}\right\}, \tag{3.29}$$

где N_{fp1} – расчетное усилие, воспринимаемое болтами растянутого пояса f_1, равное:

при наличии ребра жесткости (см.рис.3.14)

$$N_{fp1} = 1{,}8B_p\left(K_1 + \frac{h_2}{h_1}\right) + N_{нj}\left(n_{н1} + n_{н2}\frac{h_2}{h_1}\right); \tag{3.30}$$

при симметричном расположении болтов относительно пояса ($n_{н1} = n_{н2} = n_н$)

$$N_{fp1} = 1{,}8B_p\left(K_1 + \frac{h_2}{h_1}\right) + N_{нj}n_н\left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right); \tag{3.31}$$

при отсутствии ребра жесткости

$$N_{fp1} = 1{,}8B_p\frac{h_2}{h_1} + N_{нj}\left(n_{н\,1} + n_{н\,2}\frac{h_2}{h_1}\right); \tag{3.32}$$

при отсутствии болтов ряда $1f$

$$N_{fp1} = 1{,}8B_p + N_{нj}n_{н\,2}; \tag{3.33}$$

N_{wp} – расчетное усилие, воспринимаемое болтами растянутой части стенки, равное:

$$N_{wp} = 2N_{нj}\frac{n}{h_0}\left[h_2 - \frac{1}{2}(n+1)\omega_j\right]; \tag{3.34}$$

N_{fp2} – расчетное усилие, воспринимаемое болтами растянутого пояса f_2, равное:

при наличии ребра жесткости

$$N_{fp2} = 1{,}8B_p\left(\frac{h_3}{h_1} + \frac{h_4}{h_1}\right) + N_{нj}\left(n_{н3}\frac{h_3}{h_1} + n_{н4}\frac{h_4}{h_1}\right); \tag{3.35}$$

при отсутствии ребра жесткости

$$N_{fp2} = 1{,}8B_p \frac{h_3}{h_1} + N_{нj}\left(n_{н3}\frac{h_3}{h_1} + n_{н4}\frac{h_4}{h_1}\right); \quad (3.36)$$

при отсутствии болтов ряда 4*f*

$$N_{fp2} = \frac{h_3}{h_1}\left(1{,}8B_p + N_{нj}n_{н3}\right); \quad (3.37)$$

$N_{нj}$ – расчетное усилие на болт наружной зоны *j*-го *T*-образного участка фланца растянутого пояса или стенки, определяемое по формулам (3.17)–(3.24); $n_{н1}$, $n_{н2}$ – число болтов наружной зоны растянутого пояса f_1; $n_{н3}$, $n_{н4}$ – число болтов наружной зоны растянутого пояса f_2; n – число рядов болтов растянутой стенки; $R_0 = h/(1-m)$; $h_1 = h_0 + b_1$; $h_2 = h_0 - a_1$; $h_3 = h_0 - h + a_2$; $h_4 = h_0 - h - b_2$; K_1 – коэффициент, равный 0,8 для $h \le 400$ мм; 0,9 – для $400 < h \le 500$ мм, в остальных случаях $K_1 = 1$.

Расчет прочности ФС *элементов замкнутого профиля, подверженных центральному растяжению.* Прочность соединения, конструктивная форма которого отвечает требованиям, следует считать обеспеченной, если $N \le nK_2B_p$, $20 \le t \le 40$ мм; где n – количество болтов в соединении; K_2 – коэффициент, значение которого следует принимать по табл.3.32.

Таблица 3.32. Значение коэффициента K_2

Диаметр болта	Толщина фланца *t*, мм	K_2
*M*20	$t \ge 20$	0,85
*M*24	$20 \le t < 25$	0,8
	$t \ge 25$	0,85
*M*27	$25 \le t < 30$	0,8
	$t \ge 30$	0,85

Расчет прочности ФС *на действие сдвигающих усилий.* Прочность ФС растянутых элементов открытого и замкнутого профилей на действие местной поперечной силы $Q_м$ следует проверять по формуле

$$Q_м = \mu n \sum R_j, \quad (3.39)$$

где n – количество болтов наружной зоны для ФС элементов открытого профиля и количество болтов для ФС элементов замкнутого профиля; R – контактные усилия, принимаемые $0{,}1B_0$ для ФС элементов замкнутого профиля, а для элементов открытого профиля, определяемые по формуле

$$R = B_p - 1{,}2N_{\delta j}, \quad (3.40)$$

где $N_{\delta j}$ – расчетное усилие на болт, вычисляемое по формуле (3.19); μ – коэффициент трения соединяемых поверхностей фланцев, принимаемые в соответствии с указаниями п.11.13* СНиП II-23-81*.

При отсутствии местной поперечной силы в расчете вводится условное значение $Q_м = 0{,}1$.

Прочность ФС сжатых элементов открытого профиля на действие сдвигающих сил Q следует проверять по формуле

$$Q = \mu N_c, \quad (3.41)$$

где N_c – усилие сжатия в ФС от действия внешней нагрузки, для ФС изгибаемых элементов, определяемое по формуле

$$N_c = \left(-\frac{M}{h} \pm \frac{N}{2} \right), \qquad (3.42)$$

где N – усилие растяжения или сжатия в присоединяемом элементе от действия внешней нагрузки.

Расчет прочности сварных швов ФС. Расчет прочности сварных швов соединения фланца с элементом конструкции следует выполнять в соответствии с требованиями СНиП II-23-81* с учетом глубины проплавления корня шва на 2 мм по трем сечениям (рис.3.15): по металлу шва (сеч.*1*), по металлу границы сплавления с профилем (сеч.*2*) и по металлу границы сплавления с фланцем в направлении толщины проката (сеч.*3*).

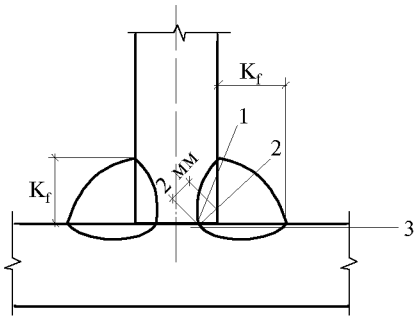


Рис.3.15. Расчетные сечения сварного соединения (сварка механизированная)

1 – сечение по металлу шва; *2* – сечение по металлу границы сплавления с профилем; *3* – сечение по металлу границы сплавления с фланцем

3.3.4. Основные требования к изготовлению и монтажной сборке конструкций с болтовыми соединениями. *Болтовые соединения, воспринимающие усилия сдвига.* Все монтажные отверстия должны быть выполнены по проекту на предприятии-изготовителе в соответствии с требованиями, определяемыми технологией монтажных работ. Образование заводских и монтажных отверстий меньшего диаметра с последующей рассверловкой по проекту производится только в случае, если это указано в чертежах КМ. Предельные отклонения диаметров отверстий для болтов должны быть 0; +1 мм.

Разметку центров отверстий следует производить откладыванием нарастающей цепочки размеров от начальной точки. Разметка центров отверстий последовательным откладыванием расстояний между центрами соседних отверстий не допускается. Отверстия в расчетных болтовых соединениях следует выполнять по шаблону с втулками, на поточных линиях или станках с ЧПУ. При этом предельное отклонение расстояния между центрами отверстий в группе должно быть ±1 мм. Для нерасчетных конструктивных болтовых соединений допускается образование отверстий по наметке. Монтажную сборку конструкции с болтовыми соединениями, работающими на сдвиг, необходимо осуществлять в соответствии с требованиями СНиП 3.03.01-87 «Несущие и ограждающие конструкции».

В собранном пакете фрикционного соединения, зафиксированном пробками, допускается «чернота» (несовпадение отверстий в смежных деталях), не препятствующая свободной, без перекоса постановке болтов. Калибр диаметром на 0,5 мм больше номинального диаметра болта должен пройти в 100 % отверстий каждого соединения. Допускается прочистка отверстий плотно стянутых пакетов фрикционных соединений сверлом, диаметр которого равен номинальному диаметру отверстия, при условии, что «чернота» не превышает разницы номинальных диаметров отверстия и болта. Применение воды, эмульсии и масла при прочистке отверстий запрещается.

В собранном пакете срезного и фрикционно-срезного соединений болты заданного в проекте диаметра должны пройти в 100 % отверстий. Допускается про-

чистка 20 % отверстий сверлом, диаметр которого равен диаметру отверстия, указанному в чертежах. При этом допускается «чернота» до 1 мм – в 50 % отверстий, до 1,5 мм – в 10 % отверстий. В случае несоблюдения этого требования с разрешения организации-разработчика проекта отверстия следует рассверлить на ближайший больший диаметр с установкой болта соответствующего диаметра. В срезных соединениях, где болты установлены конструктивно, «чернота» не должна превышать разности диаметров отверстия и болта. Решения по предупреждению самоотвинчивания гаек должны быть указаны в рабочих чертежах.

Применение пружинных шайб не допускается, если в элементах, прилегающих к головкам болтов или гайкам, имеются овальные отверстия или при разности диаметров отверстий и болтов в них более 3 мм, а также при совместной установке с круглой шайбой (ГОСТ 11371-78*). Запрещается стопорение гаек путем забивки высокопрочного болта или приварка их к стержню высокопрочного болта. Технология выполнения операции по постановке высокопрочных болтов во фрикционных и фрикционно-срезных соединениях должна отвечать требованиям [3].

Фланцевые соединения. Качество проката, применяемого для изготовления фланцев, должно соответствовать требованиям, изложенным в п.3.3.1. Предприятие-изготовитель обязано маркировать каждый фланец с указанием марки стали, номера сертификата завода-поставщика проката, номера плавки, номера приемного акта завода-изготовителя конструкции.

Маркировку следует выполнять металлическими клеймами на поверхности фланца в месте, доступном для осмотра после монтажа конструкции. Глубина клеймения не должна превышать 0,5 мм. Место для клейма должно быть указано в чертежах КМ. После выполнения сварных швов ФС сварщик должен поставить свое клеймо, место расположения которого должно быть указано в чертежах КМ. Точность изготовления отправочных элементов конструкции с ФС должна соответствовать требованиям, изложенным в табл.3.33.

Таблица 3.33. Требования к изготовлению отправочных элементов

Контролируемый параметр	Предельное отклонение
Тангенс угла отклонения фрезерованной поверхности фланцев	Не более 0,0007
Зазор между внешней плоскостью фланца и ребром стальной линейки	0,3 мм
Отклонение толщины фланца (при механической обработке торцевых поверхностей)	$\pm 0{,}02t$
Смещение фланца от проектного положения относительно осей сечения присоединяемого элемента	±1,5 мм
Отклонение длины элемента с ФС	0; –5 мм
Совпадение отверстий в соединяемых фланцах при контрольной сборке	Калибр диаметром, равным номинальному диаметру болта, должен пройти в 100% отверстий

Запрещается осуществлять наклон соединяемых элементов в связи с изменением толщины фланца (клиновидности).

При отправке конструкции с ФС завод-изготовитель кроме документации, предусмотренной п.1.22 СНиП 3.03.01-87, должен представить копию сертификата, удостоверяющего качество стали фланцев, а также документы о контроле качества сварных соединений. Если фланцы изготовлены из стали марок, отличных от указанных в п.3.3.1, то предприятие-изготовитель должно представить документы о

качестве проката, применяемого для фланцев в соответствии с требованиями п.3.3.1. Проекты производства работ (ППР) по монтажу конструкции должны содержать технологические карты, предусматривающие выполнение ФС в конкретных условиях монтируемого объекта в соответствии с указаниями [4].

Подготовку контактных поверхностей фланцев следует осуществлять в соответствии с указаниями чертежей КМ и КМД по ОСТ 36-72-82. При отсутствии таких указаний контактные поверхности очищают стальными или механическими щетками от грязи, наплывов грунтовки и краски, рыхлой ржавчины, снега и льда. Высокопрочные болты, гайки и шайбы к ним должны быть изготовлены в соответствии с п.4.25 СНиП 3.03.01-87, пп.3.1.2-3.1.8 ОСТ 36-72-82.

Под головки и гайки высокопрочных болтов необходимо ставить только по одной шайбе. Выступающая за пределы гайки часть стержня болта должна иметь не менее одной нитки резьбы. Натяжение высокопрочных болтов ФС необходимо выполнять от наиболее жесткой зоны (жестких зон) к его краям. Натяжение высокопрочных болтов ФС следует осуществлять только по моменту закручивания $M_{кр}$, который определяют по формуле

$$M_{кр} = nKB_0d_b, \qquad (3.43)$$

где n – коэффициент, принимаемый: 1,06 – при натяжении высокопрочных болтов; 1 – при контроле усилия натяжения болтов; K – среднее значение коэффициента закручивания для каждой партии болтов по сертификату или принимаемое равным 0,18 при отсутствии таких значений в сертификате; B_0 – усилие предварительного натяжения болта, Н; d_b – номинальный диаметр резьбы болта, мм.

Отклонение фактического момента закручивания от момента, определяемого по формуле (3.43), не должно превышать 0; +10 %. После натяжения болтов гайки ничем дополнительно не закрепляются. После выполнения ФС монтажник обязан поставить на соединении личное клеймо (набор цифр) в месте, предусмотренном в чертежах конструкции КМ или КМД и предъявить собранное соединение ответственному лицу.

Качество выполнения ФС на высокопрочных болтах ответственное лицо проверяет путем пооперационного контроля. Контролю подлежат: качество обработки (расконсервации) болтов; качество подготовки контактных поверхностей фланцев; соответствие устанавливаемых болтов, гаек и шайб требованиям ГОСТ 22353-77* – ГОСТ 22356-77*, а также требованиям, указанным в чертежах КМ и КМД; наличие шайб под головками болтов и гайками, длина части болта, выступающей над гайкой; наличие клейма монтажника, осуществляющего сборку соединения; выполнение требований табл.3.34.

Таблица 3.34. Требования к точности монтажной сборки ФС

Требования	Допускаемое отклонение, мм
Щуп толщиной 0,1 мм не должен проникать в зону радиусом 40 мм от оси болта	–
Просвет между фланцами или фланцем и полкой колонны после преднапряжения высокопрочных болтов по линии стенок и полок профиля	0,2
Просвет между фланцами или фланцем и полкой колонны после преднапряжения высокопрочных болтов по краям фланцев: для фланцев толщиной не более 25 мм для фланцев толщиной более 32 мм	 0,6 1

Контроль усилия натяжения следует осуществлять во всех установленных высокопрочных болтах тарированными динамометрическими ключами. Контроль усилия натяжения следует производить не ранее, чем через 8 ч после выполнения натяжения всех болтов в соединении, при этом усилия в болтах соединений должны соответствовать значениям, указанным в п.3.3.1, или быть следующими:

*M*20	167
*M*24	239
*M*27	312

Отклонение фактического момента закручивания от расчетного не должно превышать 0; +10 %. Если при контроле обнаружатся болты, не отвечающие этому условию, то усилие натяжения этих болтов должно быть доведено до требуемого значения.

Документация, предъявляемая при приемке готового объекта, кроме предусмотренной п.1.22 СНиП 3.03.01-87, должна содержать сертификаты или документы завода-изготовителя, удостоверяющие качество стали фланцев, болтов, гаек и шайб; документы завода-изготовителя о контроле качества сварных соединений фланцев с присоединяемыми элементами, журнал контроля за выполнением монтажных фланцевых соединений на высокопрочных болтах.

3.4. Фундаментные болты

3.4.1. Классификация. В соответствии с ГОСТ 24379.0-80 фундаментные болты диаметром резьбы 12–140 мм, предназначенные для крепления строительных конструкций и оборудования, классифицируются по: конструктивному решению; способу установки в фундамент; способу закрепления в бетоне фундамента; условиям эксплуатации.

По конструктивному решению болты разделяются на шесть типов: *1* – изогнутые; *2* – с анкерной плитой; *3* – составные; *4* – съемные; *5* – прямые; *6* – с коническим концом.

К болтам, устанавливаемым до бетонирования фундаментов, относятся (рис.3.16) изогнутые (тип *1*, исполнение *1*); с анкерной плитой (тип *2*); составные (тип *3*); съемные (тип *4*). К болтам, устанавливаемым на готовые фундаменты в колодцы или скважины относятся: изогнутые (тип *1*, исполнение *2*); прямые (тип *5*); с коническим концом (тип *6*).

По способу закрепления в бетоне фундамента болты разделяются на: закрепляемые непосредственным взаимодействием элементов (шпилек или анкерных плит) болтов с бетоном фундаментов (типы *1–4*), закрепляемые с помощью эпоксидного или силоксанового клея, а также цементно-песчаных смесей (типы *5* и *6*, исполнение *2* и *3*) и закрепляемые с помощью разжимных цанг (тип *6*, исполнение *1*).

По условиям эксплуатации болты разделяются на расчетные и конструктивные. К последним относятся болты для крепления строительных конструкций и оборудования, устойчивость которых против опрокидывания или сдвига обеспечивается собственным весом конструкции или оборудования; эти болты предназначаются для рихтовки строительных конструкций и оборудования во время их монтажа.

3.4.2. Марки стали и расчетные сопротивления. Выбор марок стали для фундаментных болтов следует производить по ГОСТ 24379.0-80, а их конструкцию и размеры принимать по ГОСТ 24379.1-80. Марка стали шпилек расчетных болтов, эксплуатируемых при расчетной зимней температуре до минус 65 °С включительно, должна назначаться в соответствии с указаниями, представленными в табл.3.35.

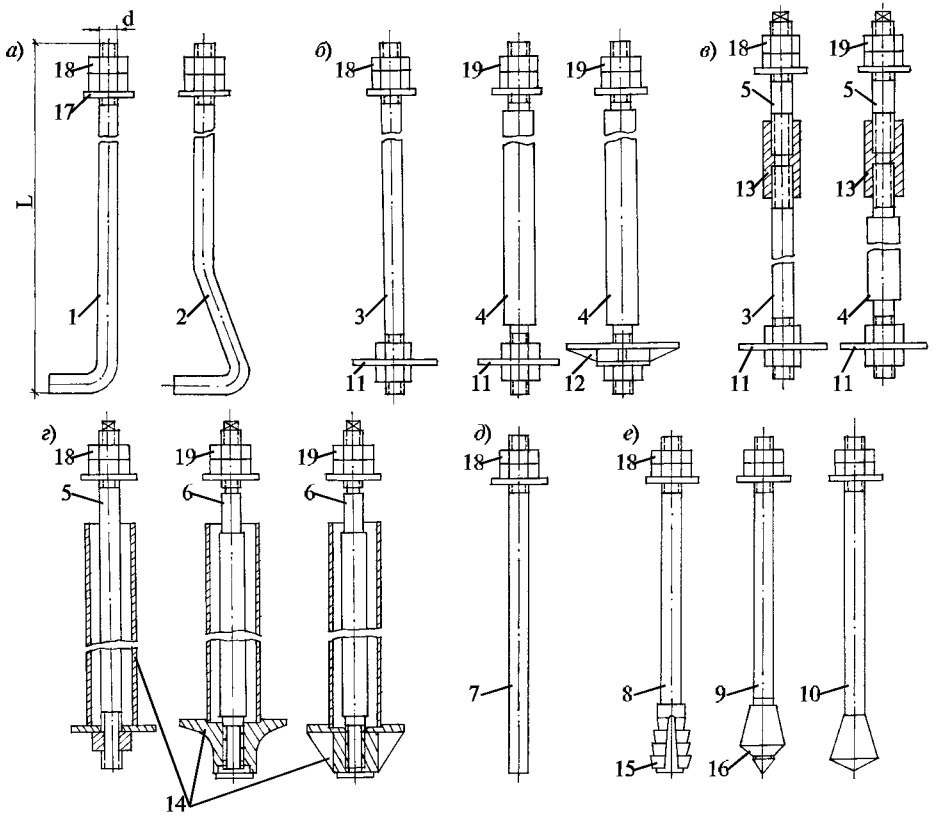


Рис.3.16. Болты, устанавливаемые до бетонирования

а – фундаментные изогнутые, тип 1, исполнение *1*, *2*; *б* – фундаментные с анкерной плитой, тип 2 , исполнение *1*, *2* и *3*; *в* – фундаментные составные, тип 3, исполнение *1*, *2*; *г* – фундаментные съемные, тип 1, исполнение *1–3*; *д* – болт фундаментный прямой, тип 5; *е* – болты фундаментные с коническим концом, тип 6, исполнение *1–3*; *1–10* – шпилька; *11*, *12* – плита анкерная; *13* – муфта; *14* – анкерная арматура; *15* – цанга разжимная; *16* – втулка коническая; *17* – шайба; *18* – гайка по ГОСТ 5915-70; *19* – гайка по ГОСТ 10605-72

Таблица 3.35. Марки стали для фундаментных болтов

Сталь марки	Климатический район строительства (расчетная *t*, °С)
Вст3кп2 и Вст3пс2 по ГОСТ 380-71*, 20 по ГОСТ 1050-88	II_4 ($-30 > t \geq 40$); II_5 и др. ($t \geq -30$)
09Г2С-6 и 10Г2С1-6 по ГОСТ 19281-89	I_2, II_2, III_3 ($-40 > t \geq -50$)
09Г2С-8 и 10Г2С1-8 по ГОСТ 19281-89	I_1 ($-50 > t \geq -65$) .

Шпильки болтов допускается изготовлять из стали других марок, механические свойства которых не ниже свойств стали марок, указанных в табл.3.35. При расчетной температуре до минус 65 °С значения ударной вязкости стали должны быть не ниже 30 Дж/см^2 при температуре испытания минус 60 °С.

Гайки для фундаментных болтов следует применять:

- для болтов из стали марок ВСт3сп2 и 20 – класса прочности 4 по табл.2 ГОСТ 1759-70**;
- для болтов из стали марок 09Г2С-6 и 10Г2С1-6 – класса прочности не ниже 5 по табл.2 ГОСТ 1759-70**.

Допускается применять гайки из стали марок, принимаемых для болтов. Гайки для фундаментных болтов диаметром менее 48 мм следует применять по ГОСТ 5915-70*, для болтов диаметром более 48 мм – по ГОСТ 10605-94. Подробные технические требования, предъявляемые к фундаментным болтам, а также требования по их комплектности, правилам приемки, методам контроля и др. изложены в ГОСТ 24379.0-80.

Расчетные сопротивления растяжению фундаментных болтов R_{ba} следует определять по формуле

$$R_{ba} = 0{,}4R_{un}\,, \qquad (3.44)$$

где R_{un} – временное сопротивление стали болтов разрыву, принимаемое равным минимальному значению σ_b по государственным стандартам или техническим условиям на сталь.

Расчетные сопротивления растяжению фундаментных болтов приведены в табл.3.36.

Таблица 3.36. Расчетные сопротивления растяжению фундаментных болтов

Диаметр болта, мм	Расчетное сопротивление, МПа, болтов из стали марок		
	ВСт3кп2	09Г2С	10Г2С1
12–20	145	185	190
21–32	145	185	190
33–60	145	180	180
61–80	145	175	170
81–100	145	170	170
101–140	145	170	–

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сварка и резка в промышленном строительстве. Справочник строителя. Т.1 и 2. – М.: Стройиздат, 1989.
2. **Бондарь В.Х., Шкуратовский Г.Д.** Справочник сварщика-строителя. – Киев: Будивельник, 1982.
3. **Китаев А.М., Китаев Я.А.** Справочная книга сварщика –М.: Машиностроение, 1985.
4. Справочник монтажника. – М.: Стройиздат, 1980.
5. Сварка в машиностроении. Т.1–4. – М.: Машиностроение, 1979.
6. **Баранов М.Б.** Технология производства сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1966.
7. **Каховский Н.И., Фартушный В.Г., Ющенко К.А.** Электродуговая сварка сталей. – Киев: Наукова думка, 1975.
8. **Гривняк Н.** Свариваемость сталей. – М.: Машиностроение, 1984.
9. Электроды для дуговой сварки и наплавки (Марочник). – М.: Машиностроение, 1972.
10. Контроль качества сварки. – М.: Машиностроение, 1975.
11. **Троицкий В.А., Калевич М.И.** Неразрушающий контроль сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1988.
12. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций. – М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1989.
13. Рекомендации по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций. – М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1990.
14. Рекомендации и нормативы по технологии постановки болтов в монтажных соединениях металлоконструкций. – М.: ЦНИИПСК, 1988.
15. Рекомендации по сборке фланцевых монтажных соединений стальных строительных конструкций. – М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1986.

ГЛАВА 4
ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ РАСЧЕТА

4.1. Основные положения

Проверка и подбор сечений стержневой конструкции в настоящее время производится поэлементно. Учет взаимодействия стержневых элементов конструкции происходит лишь при выборе расчетной длины, а более строгий учет влияния элементов одного на другой остается пока уделом немногочисленных и весьма трудоемких научных исследований.

С точки зрения теории надежности поэлементная проверка соответствует последовательному соединению элементов или методу наислабейшего элемента [1]. В действительности, почти все конструкции являются статически неопределимыми, т.е. соответствуют, по крайней мере, частично схеме параллельно-последовательного соединения элементов. В этом случае разрушение одного элемента не обязательно ведет к разрушению всей конструкции, что очень часто наблюдается в действительности, т.е. конструкция в той или иной мере должна и обладает свойством живучести. Однако теория живучести строительных конструкций в настоящее время развита недостаточно и обоснование норм и проверок надежности и работоспособности конструкций на основе теории живучести дело будущего.

Ниже используется метод поэлементной проверки, считая, что расчетные усилия в элементах известны и получены из расчета на статическую или динамическую нагрузку. Здесь рассмотрим только элементы стержневых конструкций, а соединения элементов даны в гл.3 разд.1.

Для лучшего использования материала строительные объекты классифицированы по степени ответственности путем введения коэффициента надежности по назначению γ_n. Его значения определены на основании экспертных оценок и приведены в [6]. Ниже используются обозначения, принятые в нормах [2].

Элементы металлоконструкций работают не в одинаковых условиях и степень их повреждаемости при транспортировке, на монтаже и в процессе эксплуатации может существенно различаться. Поэтому для компенсации перечисленных факторов введен коэффициент условий работы γ_c, значения которого 0,7–1,2 получены на основе анализа работы эксплуатируемых конструкций и приведены в нормах [2].

4.2. Расчет стержневых элементов конструкций

К стержневым элементам относятся как элементы прокатного, гнутого или сварного постоянного сечения, так и составного сечения, имеющие несколько ветвей, соединенных планками или решеткой (сквозные стержни), а также стержни, имеющие по длине несколько участков разной жесткости (ступенчатые стержни). По определению, стержнем считается элемент или конструкция, у которой длина более чем в 5–6 раз превосходит наибольший поперечный размер.

Стержень, работающий на растяжение, проверяется на прочность и на предельную гибкость. Сжатый элемент может быть центрально- и внецентренно сжатым, причем при центральном сжатии считается неизбежным малый допустимый начальный прогиб. Для сжатых стержней существует предельная (максимальная, критическая) нагрузка, поэтому они проверяются на общую и местную устойчивость, а также на предельную гибкость. Проверка устойчивости всегда осуществляется для предварительно выбранной формы потери устойчивости, поэтому очень важно для рассматриваемого типа стержня не пропустить ни одной возможной формы потери устойчивости.

Изгибаемый элемент проверяется на прочность, устойчивость в поперечном направлении, местную устойчивость и на допустимый прогиб. Такие же проверки выполняются для изгибаемых элементов при наличии продольной силы.

Граница между сжато-изогнутым и внецентренно сжатым стержнем определяется величиной относительного эксцентриситета [2]. При m (или m_{ef}) > 20 проверка на устойчивость не производится, где $m = eA/W_c$ ($m_{ef} = \eta m$). Сквозные стержни требуют дополнительных проверок, связанных с работой отдельных элементов решетки и поясов в пределах панели.

Многие элементы имеют различные моменты инерции и различные расчетные длины по главным осям, поэтому все проверки проводятся в двух плоскостях. Эти два направления всегда являются экстремальными, поэтому проверки в промежуточных направлениях не нужны.

При расчетах конструкций используется концепция “наислабейшего элемента”, т.е. каждый элемент проверяется индивидуально. В связи с этим возникает трудность выбора граничных условий для отдельно рассматриваемого стержня, вырезаемого из конструкции – проблема назначения расчетной длины. В настоящее время исследования по этому вопросу далеко не закончены и в рекомендациях различных нормативных документов имеется много условностей, хотя все они сделаны в запас. При циклических нагрузках основную роль играют проверки на усталость, и особое значение приобретает вопрос о концентраторах напряжений, который оказывается центральным и в проблемах хрупкого разрушения.

4.3. Центрально-растянутые элементы

Центрально-растянутые элементы, нагруженные статической нагрузкой, проверяются на прочность, при этом концентраторы напряжений обычно не учитываются, и используется формула

$$\frac{N}{A_n} \le \gamma_c \max\left\{R_y, \frac{R_u}{\gamma_u}\right\}. \qquad (4.1)$$

В нормах [2] значение коэффициента надежности $\gamma_u = 1{,}3$. Таким образом, в случае $R_y > R_u/\gamma_u$ надежность элемента обеспечивается упрочнением стали и коэффициентом условий работы γ_c, а в случае $R_y < R_u/\gamma_u$ комбинацией коэффициентов γ_c/γ_u, а также статистической обеспеченностью R_y и R_u.

4.4. Центрально-сжатые элементы

Центрально-сжатые элементы сплошного сечения проверяются на общую и местную устойчивость, первая проверяется по формуле

$$\frac{N}{\varphi A} \le \gamma_c R_y, \qquad (4.2)$$

а вторая рассматривается в п.4.8.

Исторически сложилось так, что формула (4.2) записана по аналогии с формулой (4.1), а отличие их состоит в коэффициенте продольного изгиба φ. Однако, в отличие от центрального растяжения, где прочность определяется средним напряжением N/A, потеря устойчивости цетрально-сжатого стержня связана с боковым выпучиванием.

Особо следует отметить, что при любом методе расчета критической сжимающей силы делается предположение о наличии хотя бы очень малого начального погиба стержня.

Термин "по́гиб" употреблен в соответствии с [3] взамен "искривления", так как он отражает состояние стержня до нагружения, в то время как термин "искривление" более относится к *процессу* нагружения, при котором элемент изгибается. Приобретенный изгиб для заданной силы соответствует некоторому новому *состоянию*, характеризуемому термином "прогиб". Коэффициент продольного изгиба φ введен для единообразия формул (4.1) и (4.2), хотя процесс потери устойчивости связан с изгибом даже очень коротких стержней при $\lambda \le 30$, где $\lambda = l/i$; при этом существенную роль играет пластическая деформация. Диаграмма сжатия стрежня в координатах: безразмерное усилие $\tilde{N} = Nl^2/EJ_0$ – продольная относительная деформация $e = \Delta lE/lR_y$ показана на рис.4.1, где кружком обозначена точка начала фибровой текучести, знаком × отмечено предельное (максимальное) усилие $\tilde{N}_m$, соответствующее нулевой отпорности стержня. Кривая 1 относится к малому начальному погибу $\tilde{f} = f/l < 1/500$; кривая 2 рассчитана для $\tilde{f} = 1/200$ [3].

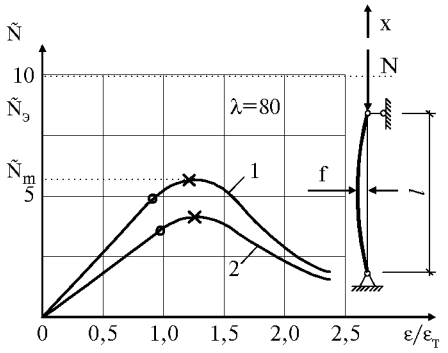


Рис.4.1. Безразмерное усилие сжатия в зависимости от сближения концов элемента

Начальный участок кривой 1 соответствует упругому сжатию и практически одинаков для всех слабо искривленных стержней ($0 < \tilde{f} < 1/500$). Для больших начальных погибов продольная податливость за счет изгиба становится сопоставимой с податливостью вследствие сжатия, и при расчетах необходимо учитывать изменение приведенного модуля, как показано на рис.4.2 [3]. Для стержней средних гибкостей ($60 < \lambda < 100$) после появления фибровой текучести довольно быстро достигается предельное усилие $\tilde{N}_m$, которое оказывается много меньшим безразмерной критической эйлеровой силы

$$\tilde{N}_э = \frac{N_э l^2}{EJ} = \pi^2$$

(для шарнирных закреплений обоих концов).

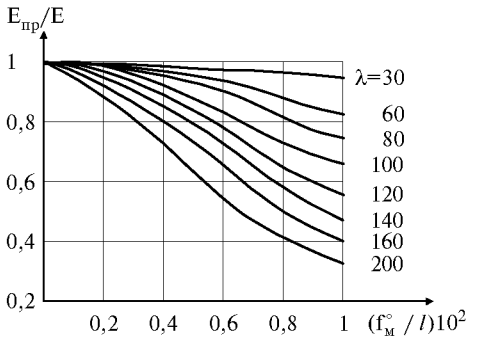


Рис.4.2. Зависимость относительного приведенного модуля упругости от начального погиба стержня

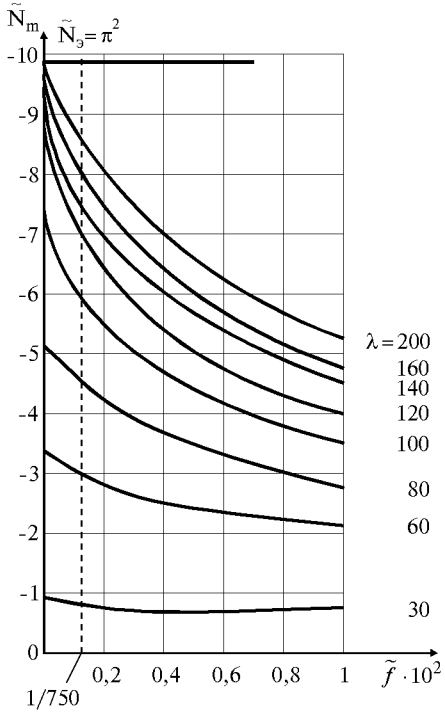


Рис.4.3. Предельные нагрузки $N_m(\tilde{f},\lambda)$ в зависимости от начального погиба стержня

Для стержней большой гибкости ($120<\lambda<150$) предельное усилие также определяется пластической деформацией и на уровне нормативного начального погиба $f/l = 1/750$ оказывается значительно меньшим эйлеровой силы $\tilde{N}_э$, как показано на рис.4.3. Здесь представлены зависимости безразмерных значений предельных нагрузок от значений начального погиба для шарнирно-опертых стержней прямоугольного сечения при разных значениях гибкости: $N_m(\tilde{f},\lambda)$. Эти зависимости получены на основании многочисленных расчетов, проведенных по методике, разработанной в [3]. При достижении предельной нагрузки и дальнейшем деформировании стержня боковой прогиб быстро растет, а усилие падает (закритическая работа стержня), поэтому у стержней, работающих на сжатие, фактически нет запасов несущей способности.

Для стержней малой гибкости ($1< \lambda <40$) предельное усилие существенно больше усилия фибровой текучести.

Таким образом коэффициент продольного изгиба φ зависит от гибкости стержня и от предела текучести стали. Последнюю зависимость обычно учитывают введением условной гибкости $\bar{\lambda} = \lambda\sqrt{R_y/E}$. Для удобства пользования кривые $\varphi(\bar{\lambda})$ часто описываются экстраполяционными формулами, например, в нормах [2] приведены следующие соотношения:

$$\left.\begin{array}{l}
\text{при } 0 < \bar{\lambda} \le 2{,}5 \quad (\bar{\lambda} = \bar{\lambda}\sqrt{R_y/E}\,) \\
\qquad \varphi = 1 - \left(0{,}073 - 5{,}53\dfrac{R_y}{E}\right)\bar{\lambda}\sqrt{\bar{\lambda}}\ ; \\
\text{при } 2{,}5 < \bar{\lambda} \le 4{,}5 \\
\qquad \varphi = 1{,}47 - 13{,}0\dfrac{R_y}{E} - \left(0{,}371 - 27{,}3\dfrac{R_y}{E}\right)\bar{\lambda} + \left(0{,}0275 - 5{,}53\dfrac{R_y}{E}\right)\bar{\lambda}^2\ ; \\
\text{при } 4{,}5 < \bar{\lambda} \\
\qquad \varphi = \dfrac{332}{\bar{\lambda}^2\left(51 - \bar{\lambda}\right)}\ .
\end{array}\right\} \qquad (4.3)$$

Формула (4.2) составлена фактически для безразмерной силы $\tilde{N} = N/R_yA$, поэтому при использовании зависимости $\varphi(\bar{\lambda})$ возникает необходимость введения существенных поправок, учитывающих влияние формы поперечного сечения. Например, в нормах [4] все виды сечений разбиты на четыре типа и для каждого типа рассчитана своя зависимость $\varphi(\bar{\lambda})$ (рис.4.4).

В основе описанного традиционного подхода к расчету устойчивости лежит предположение о наличии малого начального погиба, принятого в нормах [23] $\tilde{f} = 1/750$. В настоящее время выполнены работы, в которых начальный погиб учтен достаточно точно, так же как и упругопластические свойства материала. Показано, что в качестве безразмерной силы удобнее использовать величину $\tilde{N} = Nl^2/EJ$, а в качестве критерия устойчивости принимать значение N_m (см.рис.4.1 и 4.3). В этом случае влияние формы сечения оказывается много меньшим и для стержней, имеющих форму поперечного сечения, отличную от прямоугольной, удобно ввести коэффициент влияния формы сечения $K_c(\lambda)$, слабо отличающийся от единицы и определяемый по табл.4.1 [3].

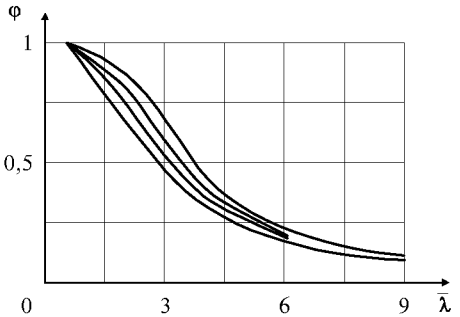
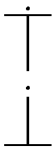


Рис.4.4. Коэффициент продольного изгиба

Таблица 4.1. Коэффициенты влияния формы сечения стержней

Форма поперечного сечения	Обозначение*	Коэффициент влияния формы сечения	
		$K_c\ (\lambda)$	$K_c = \text{const}$
Прямоугольное		1	1
Тавровое		$a\,(\lambda - 100)^2 + 0{,}9$; $a = 5 \cdot 10^{-6}$ $a\,(\lambda - 100)^2 + 1{,}1$; $a = -1{,}25 \cdot 10^{-5}$	~ 0,905 1,07
Двутавровое		—	0,984
Н-образное		—	0,985
Кольцевое		$a\,(\lambda - 120)^2 + 0{,}94$; $a = 1{,}25 \cdot 10^{-5}$	0,955

* Показано среднее по длине поперечное сечение, а точкой обозначена проекция оси OX (см. рис.4.1.)

Значения $K_c\ (\lambda)$ в этой таблице рассчитаны для $R_y = R_1 = 210$ МПа. Для элементов из стали с большим расчетным сопротивлением, следуя [3], удобно ввести коэффициент по прочности

$$K_R = (R_y/R_1)^n$$

Показатель степени n зависит от гибкости элемента так, как показано на рис.4.5.

При вычислении значений K_c и K_R предполагалось, что диаграммы $\tilde{\sigma} - \tilde{\varepsilon}$ для сталей различных марок в безразмерном виде совпадают с унифицированной диаграммой, предложенной в работе [7]. Безразмерные напряжения и деформации на этой диаграмме определяются так:

$$\tilde{\sigma} = \sigma / R_y ; \quad \tilde{\varepsilon} = \varepsilon E / R_y ;$$

унифицированная диаграмма на крайних участках задается следующими линейными соотношениями:

$\tilde{\sigma} = \varepsilon$ при $0 \le \tilde{\varepsilon} \le 0{,}8$,

$\tilde{\sigma} = 1 + 0{,}015(\tilde{\varepsilon} - 1{,}7)$ при $1{,}7 \le \varepsilon$,

а на переходном участке задается с помощью табл.4.2 (рис.4.6.)

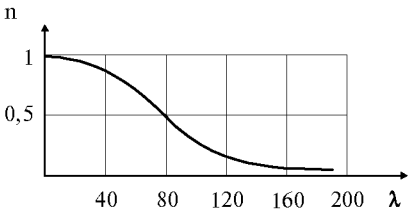


Рис.4.5. Зависимость показателя степени n от гибкости стержня

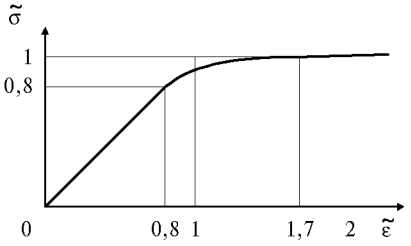


Рис.4.6. Безразмерная унифицированная диаграмма деформации стали

Таблица 4.2. Значения безразмерного напряжения на переходном участке

$\tilde{\sigma}$	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
$\tilde{\varepsilon}$	0,8	0,860	0,905	0,941	0,964	0,981	0,991	0,997	0,999	1

Считается также, что диаграмма имеет одинаковый вид как при растяжении, так и при сжатии, что вполне оправдано, так как даже на закритическом участке деформации не превосходят одного процента ($|\varepsilon| < 1\%$).

Окончательная формула для коэффициента продольного изгиба

$$\varphi = \varphi_0(\tilde{f}, \lambda) K_c K_R , \tag{4.4}$$

где φ_0 – значение коэффициента продольного изгиба, рассчитанного для прямоугольного сечения и расчетного сопротивления $R_1 = 210$ МПа с использованием унифицированной диаграммы $\tilde{\sigma} - \tilde{\varepsilon}$.

При проектировании следует принять $\tilde{f} = 1/750$; при обнаружении погиба принимается его действительное значение.

Для тонкостенных стержней П-образного профиля (рис.4.7), не укрепленных планками, проверяется изгибно-крутильная форма потери устойчивости по формуле

$$\frac{N}{(c\varphi A)} \le \gamma_c R_y . \tag{4.5}$$

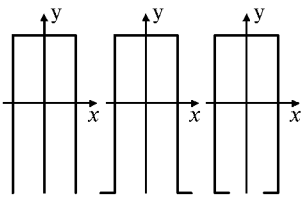


Рис.4.7. П-образные сечения элементов

Коэффициент c определяется через секториальный J_w и крутильный J_t моменты инерции при $\lambda_x < 3\lambda_y$ [2, 5].

Устойчивость составных стержней проверяется по формуле (4.2) с заменой λ на эффективное значение λ_{ef} , которое зависит от состава сечения и определяется эмпирическими формулами, приводимыми в нормах [2]. Кроме того, проверяется устойчивость отдель-

ных ветвей и даются ограничения на их гибкость, например на участке между планками для ветви $\lambda \le 40$, при наличии решетки $\lambda \le 80$.

Соединительные элементы (планки, элементы решетки) рассчитываются на условную перерезывающую силу [2]

$$Q_{fic} = 7{,}15 \cdot 10^{-6}\left(2330 - \frac{E}{R_y}\right) N/\varphi \,. \qquad (4.6)$$

Крестовая решетка с распорками рассчитывается на дополнительные усилия от обжатия.

4.5. Сжато-изгибаемые элементы

При использовании расчетных моделей стержневых конструкций с жесткими узлами в последних всегда возникают моменты и при узловых нагрузках на конструкцию эпюры моментов оказываются прямолинейными. Для рассматриваемого элемента, вырезанного из конструкции, такая ситуация эквивалентна внецентренному сжатию с эксцентриситетами

$$e_{\min} = M_{\min}/N; \quad e_{\max} = M_{\max}/N \,.$$

Пока конструкция работает упруго, моменты и усилия увеличиваются пропорционально, и вычисленные эксцентриситеты остаются постоянными, поэтому следует различать расчетные схемы, показанные на рис. 4.8. В расчетах обычно используется одно максимальное значение эксцентриситета, для чего по весьма грубым правилам выбирается одно значение момента [2]:

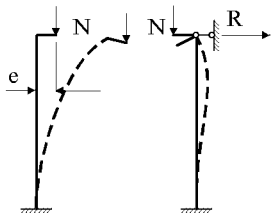


Рис.4.8. Варианты внецентренного сжатия

- для колонн постоянного сечения принимается наибольшее значение момента;
- для ступенчатых колонн наибольшее значение на каждом участке колонны;
- для консольных колонн принимается наибольший из моментов в заделке и в трети высоты от заделки;
- для сжатых поясов ферм и структур, воспринимающих внеузловую нагрузку, наибольшее в пределах средней трети:
- для шарнирно-опертых стержней с одной или двумя осями симметрии по таблицам, приводимым в нормах [2].

Значение e определяет относительный эксцентриситет

$$m = eA \,/\, W_c \,,$$

где W_c - момент сопротивления для наиболее сжатого волокна, и приведенный относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta m \,,$$

где η - коэффициент влияния формы сечения, зависящий от гибкости стержня λ и определяемый для обычных сечений по аппроксимационным полуэмпирическим формулам в нормах [2].

Для стержней с эксцентриситетом m или $m_{ef} < 20$ необходимо помимо прочности проверять и устойчивость по формуле

$$\frac{N}{(\varphi_e A)} \le R_y \gamma_c . \qquad (4.7)$$

Коэффициент продольного изгиба при внецентренном сжатии зависит от условной гибкости элемента $\bar{\lambda} = \lambda\sqrt{R_y / E}$ и значения эксцентриситета m или m_{ef}. Для определения φ_e обычно используют таблицы, приводимые в нормах [2].

Изгибающий момент, действующий по одной из главных осей сечения, влияет на устойчивость по другой главной оси. Возможны несколько вариантов в зависимости от направления эксцентриситета, соотношений главных моментов инерции, гибкостей по главным осям, наличия или отсутствия симметрии сечения. Для проверки устойчивости в этих случаях используются формулы (4.5) или (4.7), а для определения коэффициентов φ и c в нормах [2] приводятся несложные аппроксимационные формулы.

4.6. Изгибаемые элементы

Проверка изгибаемых элементов проводится на прочность и на устойчивость. В качестве критериев прочности используются либо нормативные значения деформации, либо значения безразмерных приведенных напряжений. В наиболее общем случае проверка осуществляется по следующим формулам:

- для нормальных изгибных напряжений

$$\frac{M_x}{c_x W_{xn}, \min R_y} + \frac{M_y}{c_y W_{yn}, \min R_y} \le \gamma_c ; \qquad (4.8)$$

- для касательных напряжений от действия перерезывающих сил

$$\frac{\tau}{R_s} \le \gamma_c ; \qquad (4.9)$$

- при учете локальных напряжений в местах приложения нагрузки

$$\frac{\sigma_i}{R_y} = \frac{1}{R_y}\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \le 1{,}15\gamma_c ; \qquad (4.10)$$

- для локальных напряжений, определяющих компоненту σy

$$\frac{\sigma_{loc}}{R_y} \le \gamma_c . \qquad (4.11)$$

Коэффициенты c_x и c_y зависят от расчетного сопротивления стали и от формы сечения. Развитие пластических деформаций допускается только для сталей низкой и средней прочности при $R_y \le 580$ МПа. При этом коэффициенты c_x, $c_y > 1$.

Для сечений типа двутавров значения c_x увеличиваются с толщиной стенки в пределах 1,04–1,19, для прямоугольных, крестовых и Н-образных сечений $c_x = 1{,}47$, а для тавровых и швеллерных сечений достигает своих максимальных значений $c_x = 1{,}6$. В нормах [2] приводятся подробные таблицы со значениями c_x и c_y, полученными на основе эмпирических данных.

При изгибе в одной плоскости и при высоких значениях перерезывающей силы

$$0{,}5 \le \frac{\tau}{R_s} \le 0{,}9$$

коэффициент $c_x = c_1$ уменьшается в соответствии с полуэмпирическим ограничением

$$1 \le c_1 = 1{,}05\sqrt{\frac{1 - (\tau / R_s)^2}{1 - \alpha(\tau / R_s)^2}}\, c_x \text{ (или } c_y),$$

причем $\alpha = 0{,}7$ для двутавра и $\alpha = 0$ для всех остальных сечений.

На участках с чистым изгибом коэффициенты c_x, c_y уменьшаются наполовину их отличия от единицы

$$c_{x(y)m} = \frac{(1 + c_{x(y)})}{2}$$

Касательное напряжение определяется по формуле Журавского:

$$\tau = \frac{QS}{Jt}, \tag{4.12}$$

а в опорных сечениях при $M_x = M_y = 0$ принимается гипотеза о равномерном распределении касательных напряжений по высоте стенки сечения

$$\tau = \frac{Q}{(th)}. \tag{4.13}$$

В последних двух формулах используется сечение нетто, а концентрация напряжений около отверстий не учитывается.

Локальные поперечные нормальные напряжения в стенке балки определяются так:

$$\sigma_{loc} = \frac{N}{(tl_{ef})}, \tag{4.14}$$

причем эффективная длина распределения l_{ef} силы N определяется распределением внешней нагрузки и клином с полууглом в вершине, равным 45° (рис.4.9).

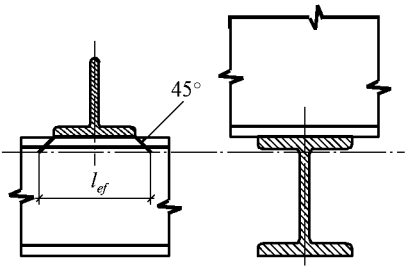


Рис.4.9. Эффективная длина l_{ef} для расчета местных напряжений

Устойчивость балки против бокового выпучивания проверяется по условию

$$\frac{M}{(\varphi_b W_c R_y)} \le \gamma_c, \tag{4.15}$$

если относительная длина l_{ef}/b превышает предельное значение, определяемое по аппроксимационной формуле

$$\left[\frac{l_{ef}}{b}\right] = \left[0{,}41 + 0{,}0032\frac{b}{t} + \left(0{,}73 - 0{,}016\frac{b}{t}\right)\frac{b}{h}\right]\sqrt{\frac{E}{R_y}}. \tag{4.16}$$

В нормах [2] приводятся уточнения (в числовых коэффициентах) этой формулы в зависимости от места приложения поперечной нагрузки по высоте проверяемой балки, а также для случая соединения полки и стенки балки на высокопрочных болтах. Эффективная длина l_{ef} определяется расстоянием между узлами, раскрепляющими сжатый пояс в поперечном направлении, или длиной консоли в случае, если конец консоли не раскреплен.

Боковое выпучивание пояса при отсутствии продольной силы происходит в результате его продольного сжатия, в частности, касательными напряжениями, действующими со стороны стенки, а сама стенка при этом изгибается или происходит закручивание всего сечения. В любом из этих случаев стенка для сжатого пояса выполняет роль упругого основания. На участках чистого изгиба сжимающее усилие на участке l_{ef} постоянно, а в остальных случаях переменно. Отсюда видно, что коэффициент φ_b зависит от отношения жесткостей J_x/J_y и J_t/J_y, а также от относительных геометрических размеров l_{ef}/h, l_{ef}/b, b/t_1 и t/t_1, где t и t_1 толщины стенки и пояса.

Для расчета φ_b в нормах [2] используются аппроксимационные. полуэмпирические многоступенчатые формулы, где учитываются также различия, связанные с

типом нагрузки (распределенная, сосредоточенная) и с местом ее приложения (к верхнему поясу, стенке или к нижнему поясу).

4.7. Геометрические характеристики элементов стальных конструкций

4.7.1. Расчетные длины элементов. Выбор граничных условий при расчете на устойчивость сжатых элементов является одним из наименее изученных вопросов расчета стальных конструкций. В эйлеровской постановке задачи об устойчивости выбор граничных условий или коэффициента расчетной длины $l_p = \mu l$ являются эквивалентными задачами [8], принимая за l геометрическое расстояние между узлами, раскрепляющими стержень в рассматриваемой плоскости. Однако, как было сказано ранее, эйлеровская постановка далека от действительности, особенно для коротких стержней, поэтому при назначении коэффициента расчетной длины приходится учитывать следующие факторы:

- упругость смежных элементов, работающих как на растяжение, так и на сжатие;
- конструктивное оформление узлов: размер фасонок, неравномерность напряженного состояния при сварных бесфасоночных узлах, наличие неплотностей в узлах на болтах;
- развитие пластических деформаций в узлах, увеличивающих расчетные длины;
- неточности и дефекты изготовления узлов, обмятия и необратимые деформации на первых стадиях загружения, связанные с приспособляемостью реальных конструкций;
- динамические воздействия и коррозионные повреждения, приводящие к изменению условий скрепления и соединения элементов;
- многопролетность сжатого стержня и влияние смежных пролетов.

Учет всех этих факторов теоретически невозможен, поэтому в большой степени назначение μ основывается на экспериментальных исследованиях и практике эксплуатации.

Традиционно все строительные конструкции классифицируются по типам [2]: плоские фермы и связи, пространственные решетчатые конструкции, колонны и стойки. Последние обычно подразделяются на стойки постоянного сечения и колонны одноступенчатые и двухступенчатые. Большинство исследованных случаев представлено в табл.4.3.

Для сжатых стержней, имеющих промежуточные и концевые упругие опоры, расчетные длины равны расстоянию между узлами раскрепления $l_0 = l$ (применительно к случаям 4 и 8 табл.4.3.), если выполняется условие

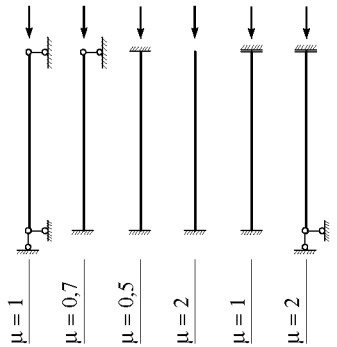
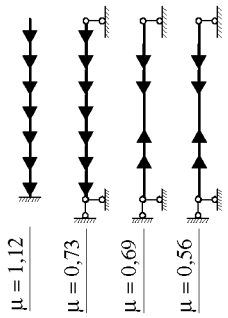
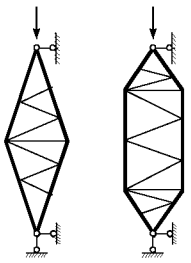
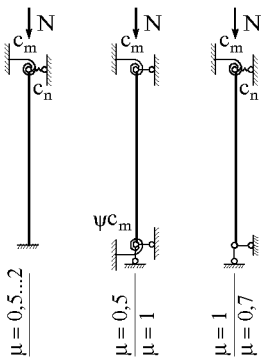
$$(cl^3) / (EJ) \geq 50 ,$$

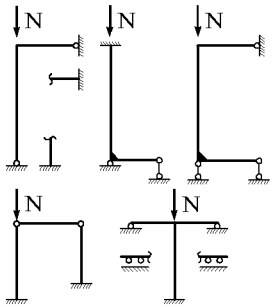
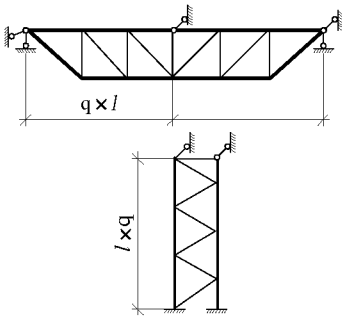
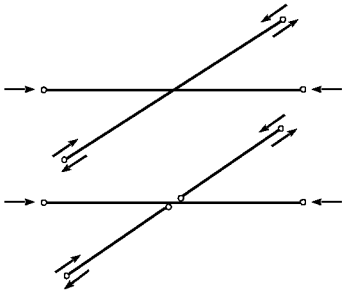
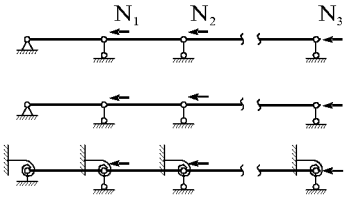
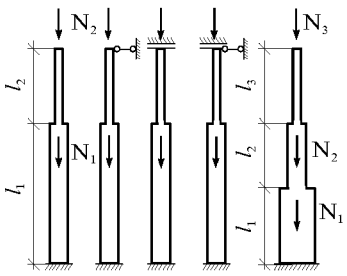
где l – расстояние между опорами сжатого стержня; EJ – жесткость сжатого стержня на изгиб в плоскости раскрепления (по длине не меняется); c – жесткость упругой опоры.

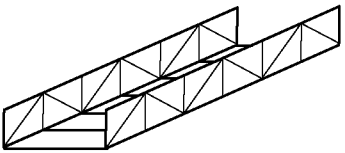
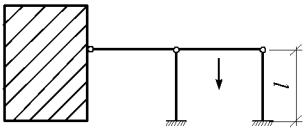
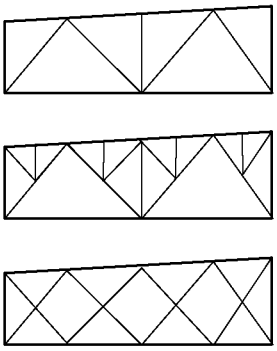
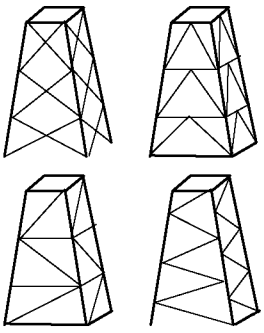
Эта проверка обязательна для сжатых стержней с гибкостью $\lambda \leq 70$ на длине l, когда промежуточные узлы раскреплены распорками, шпренгелями, не воспринимающими конкретные усилия, а также при наличии дефектов в виде искривлений элементов. Усилие на упругие опоры принимать в направлении, перпендикулярном сжатому стержню, 2% от усилия в основном элементе при отсутствии монтажных стыков на промежуточных опорах и 3% – при их наличии.

При определении расчетных длин по справочникам [8, 9, 13, 14, 31, 32] для случаев 4 и 8 табл.4.3 принимать их с коэффициентом безопасности 1,3.

Таблица 4.3. Расчетные длины элементов

Расчетная схема	Документ, пункт	Примечание
1. 	[2], табл.71а; [6], табл.21	Четкие концевые закрепления. Сечения и силы по длине не меняются
2. 	[2], табл.71а; [6], табл.22	Сечения по длине не меняются. Расчет по N_{max}
3. 	[8, 9, 13, 14]	Силы по длине не меняются
4. 	[6], табл.23; [8,9,13,14,31,32]	Сечение и силы по длине не меняются; c_m, ψc_m, c_n – жесткости упругого защемления

Расчетная схема	Документ, пункт	Примечание
5. 	[6], табл.24; [9, 13, 14]	Сечения и силы не меняются по длине
6. 	[6], табл.26, q≥2; [13, 14]	Сечения не меняются по длине
7. 	[2], п.6.3; [6], табл.25; [11]	Сечения и усилия не меняются по длине. Значения по [2] соответствуют частным случаям
8. 	[6, 8, 9, 13, 14]	Сечения элементов не меняются. Усилия и длины пролетов меняются. Использовать требования для многоопорных систем, независимо от числа опор [10]
9. 	[2, 8, 9, 11–14]	Сечения и усилия меняются по высоте скачкообразно

Расчетная схема	Документ, пункт	Примечание
10. Фермы и балки 	[8, 9, 11, 13, 14]	Верхние пояса не раскреплены из плоскости. Имеются жесткие полурамки
11. Примыкающая к жесткой конструкции 	[6]	При запасе устойчивости жесткой конструкции $l_0 = 0{,}71$
12. 	[2], табл.11	Расчетные длины могут быть уточнены с учетом особенностей конструкции
13. 	[2], табл.13–16	Пространственные опоры. Аналогично – структуры, плоские опоры и колонны

Раскрепление в результате сил трения, например плит без сварки, принимается во внимание, если исключена динамика и другие ослабляющие факторы при минимальном воздействии, и трением обеспечивается передача раскрепляющих воздействий. Особенности определения расчетных длин ряда случаев приведены в работе [11].

4.7.2. Предельные гибкости и прогибы элементов конструкций. Предельные гибкости элементов стальных конструкций обоснованы практикой эксплуатации, монтажа и такелажно-транспортными операциями. Эти требования обеспечивают нормальную эксплуатацию горизонтальных элементов связей пролетами до 8 м.

Значения предельных гибкостей, приведенные в табл.4.4, соответствуют нормам [2], где изложены более подробные данные в зависимости от вида конструкций.

Таблица 4.4. Ограничения гибкостей стержневых элементов

Описание элементов	Предельная гибкость
1. Гибкость сжатых и сжато-изогнутых элементов в целом	120–220
2. Гибкость растянутых элементов в целом	150–400
3. Гибкость участков составных стержней с планками	40
4. Гибкость участков составных стержней, соединяемых через прокладки или вплотную (такие стержни рассматриваются как сплошные):	
при сжатии	40
при растяжении	80
5. Гибкость ветвей решетчатых стержней между узлами (по осям)	80 (120)

Примечания: 1. Гибкость элементов составных стержней допускается принимать для пп.3, 4 по границам сварки или крайним заклепкам. 2. Соединения, не создающие сдвиговую жесткость, типа болтов нормальной точности, установленных без контроля натяжения во внимание не принимаются.

Для горизонтальных и наклонных элементов с проекцией на горизонтальную плоскость более 8 м необходимо убедиться, чтобы прогибы под действием собственного веса и веса примыкающих элементов не превышали:

- 1/750 для сжатых основных элементов;
- 1/500 для растянутых основных элементов;
- 1/200 для связевых сжатых второстепенных элементов и для растянутых связей при динамических воздействиях;
- 1/150 для прочих растянутых элементов связей.

В случаях превышения указанных ограничений на прогибы необходимо учитывать влияние геометрической нелинейности продольных деформаций поправками к модулю упругости [15].

4.8. Проверка устойчивости стенок и поясных листов изгибаемых и сжатых элементов

4.8.1. Общие положения. В соответствии с нормами [2] расчет стальных сжатых и изгибаемых элементов заключается в проверке их прочности, общей устойчивости, а также устойчивости элементов поперечного сечения (стенок и поясных листов). Следует отметить, что большинство поперечных сечений стержней стальных конструкций представляет совокупность прямоугольных пластинок, имеющих различные условия закрепления кромок. Пластинки, составляющие сечения стальных стержней, можно условно разделить на две категории: стенки и свесы. В дальнейшем к стенкам относятся пластинки, имеющие закрепление по продольным сторонам, которое может быть шарнирным или с частичным защемлением, а к свесам – пластинки, имеющие один или два свободных края. Поперечные стороны пластинок, образующих сечение, во всех случаях считаются шарнирно опертыми.

Проверка устойчивости стенок и поясных листов металлических конструкций основана на результатах решения задач устойчивости прямоугольных пластинок, имеющих различные граничные условия. Внешними силовыми воздействиями для таких пластинок является компоненты напряжений или деформаций, действующие по их кромкам. При этом материал пластинки может работать упруго или в нем возникают зоны пластических деформаций.

Решение задачи устойчивости пластинки состоит из двух этапов. На первом этапе вычисляются компоненты напряженно-деформированного состояния в пределах упругости или с применением одной из теорий пластичности. При этом обычно рассматривается изолированная пластинка, загруженная по контуру нагрузкой, постоянной по толщине, и для любой точки срединной плоскости вычисляются компоненты напряжений и деформаций. Более общим подходом является исследование на этом этапе работы стержня, в состав которого входит пластинка, и вычисление компонентов напряженно-деформированного состояния в пластинке из анализа работы стержня.

На втором этапе решается задача определения критического состояния пластинки, соответствующего потере ее устойчивости, которая может быть сформулирована в различной постановке. В результате решения можно получить значение внешней нагрузки, соответствующее потере устойчивости пластинки заданной гибкости b/t (b, t – ширина и толщина пластинки) и определить гибкость пластинки, соответствующую потере ее устойчивости при заданной внешней нагрузке. Изложенный выше подход реализован при решении многочисленных задач устойчивости прямоугольных пластинок, которые обобщены в монографиях [8, 16, 17].

Более обоснованной является постановка, включающая в себя оба этапа решения. В этом случае на первом этапе определяется нагрузка, соответствующая предельному состоянию стержня. Из решения этой задачи вычисляются компоненты напряженно-деформированного состояния, которые представляют собой исходные данные для определения потери устойчивости пластинок, составляющих сечение стержня. Такой подход позволяет реализовать принцип равноустойчивости, сущность которого состоит в том, что предельное состояние всего стержня и пластинок, образующих его сечение, соответствует одному значению внешней нагрузки. Такая схема решения реализована в расчетах устойчивости стенок и поясных листов центрально- и внецентренно-сжатых стержней, когда напряженно-деформированное состояние в опасном сечении определялось из решения соответствующей задачи для всего стержня.

Для пластинок, работающих в упругой области, компоненты напряжений, соответствующие потере устойчивости, можно вычислять по формулам, приведенным в [5]:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2; \quad \tau_{cr} = k_\tau \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2, \tag{4.17}$$

где σ_{cr}, τ_{cr} – компоненты напряжений, соответствующие потере устойчивости пластинки шириной b и толщиной t; k_σ, k_τ – параметры, определяющие критическое состояние пластинки, которые зависят от вида напряженного состояния, соотношения компонентов напряжений σ_{cr} и τ_{cr}, а также условий закрепления сторон пластинки.

Значения k_σ и k_τ, которые являются решением задачи для упругой пластинки, приведены в табл.4.5 при различном отношении $\beta = a/b$ (a – длина пластинки).

Значение $\alpha = (\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_1$, где σ_1 – наибольшее нормальное сжимающее напряжение на кромке пластинки, которое принимается со знаком "+"; σ_2 – нормальное напряжение на другой продольной кромке; $\bar{\tau} = \tau/\tau_\tau$ – безразмерное касательное напряжение.

Следует отметить, что условия закрепления продольных кромок стенки балок и сжато-изгибаемых стержней соответствуют их частичному защемлению в поясах. Влияние этого защемления на устойчивость стенок можно учесть, используя результаты работы [18].

Таблица 4.5. Значения параметров k_σ и k_τ

β	$\bar{\tau}$	Шарнирное опирание контура						Заделанные продольные стороны					
		α=0		α=1		α=2		α=0		α=1		α=2	
		k_σ	k_τ	k_σ	k_τ	k_σ	k_τ	k_σ	k_τ	k_σ	k_τ	k_σ	k_τ
0,5	0	6,250	0	11,622	0	25,501	0	7,721	0	14,784	0	39,746	0
	0,5	6,219	1,132	11,402	3,801	23,557	7,842	7,642	2,341	14,342	4,791	35,124	11,721
	0,7	6,160	3,487	11,072	6,266	20,586	11,650	7,546	3,582	13,664	7,742	30,742	16,954
	0,9	5,857	6,982	9,601	11,444	15,132	18,277	6,975	8,383	11,278	13,505	19,704	22,878
	1	0	25,104	0	25,104	0	25,104	0	26,983	0	26,983	0	26,983
1	0	4,000	0	7,812	0	25,497	0	7,737	0	14,806	0	40,205	0
	0,5	3,923	1,306	7,264	2,421	17,847	5,949	7,492	2,504	13,521	4,523	26,804	8,987
	0,7	3,790	2,145	6,564	3,715	13,290	7,521	7,385	4,165	11,754	6,652	19,246	10,582
	0,9	3,264	3,930	4,845	5,775	7,337	8,747	5,782	6,951	7,622	9,126	10,132	12,178
	1	0	9,337	0	9,337	0	0,337	0	12,653	0	12,653	0	12,653
2	0	4,000	0	7,812	0	23,851	0	7,019	0	13,656	0	40,306	0
	0,5	3,850	1,283	6,869	2,290	15,193	5,064	6,694	2,236	11,732	3,921	24,821	8,312
	0,7	3,616	2,046	5,864	3,319	10,469	5,925	6,232	3,525	10,372	5,871	16,825	9,524
	0,9	2,899	3,456	3,916	4,667	5,383	6,417	5,056	6,067	6,448	7,764	8,293	9,936
	1	0	6,564	0	6,564	0	6,564	0	10,271	0	10,271	0	10,271

При наличии пластических деформаций в отдельных зонах пластинок соотношения (4.17) не могут быть использованы для определения связи между гибкостью пластинки и компонентами напряжений. Анализ результатов решений многочисленных задач устойчивости пластинок при развитии в них пластических деформаций, выполненный в [19], позволил получить эмпирическую формулу для определения гибкости пластинки, соответствующей потери ее устойчивости

$$\bar{\lambda}_w = \frac{0{,}934}{\sqrt{(1-\nu)\left[\theta_0 + k_1(\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_{pr})\right]}}, \qquad (4.18)$$

где $\bar{\lambda}_w = (b/t)\sqrt{R_y/E}$; θ_0, k_1 – коэффициенты, зависящие от вида напряженно-деформированного состояния, условий закрепления продольных сторон пластинки и материала; $\bar{\varepsilon}_1 = \varepsilon_1 / \varepsilon_т$; $\bar{\varepsilon}_{pr} = \varepsilon_{pr}/\varepsilon_т$; ε_{pr}, $\varepsilon_т$ – соответственно относительные деформации, соответствующие пределу пропорциональности и пределу текучести материала; ε_1 – наибольшая продольная деформация.

В табл.4.6 приведены значения коэффициентов θ_0, k_1 для диаграммы Прандтля в зависимости от параметра $\xi = (\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_2)/\bar{\varepsilon}_1$, характеризующего распределение деформации по ширине пластинки $\bar{\varepsilon}_2 = \varepsilon_2/\varepsilon_т$, ε_2 – наименьшая деформация в продольном направлении, для наиболее распространенных элементов поперечных сечений стальных стержней.

Таблица 4.6. Значения коэффициентов θ_o, k_1

Условная гибкость	Коэффициент	ξ				
		0	0,5	1	1,5	2
$\bar{\lambda}_1$	θ_o	0,167	0,127	0,0896	0,0523	0,030
	k_1	0,361	0,249	0,1600	0,0898	0,0498
$\bar{\lambda}_2$	θ_o	0,250	0,187	0,1290	0,0750	0,0419
	k_1	0,345	0,239	0,1520	0,0855	0,0475
$\bar{\lambda}_3$	θ_o	2,320	1,730	1,1700	0,8900	0,8650
	k_1	3,540	2,500	1,3300	1,1100	0,9280
$\bar{\lambda}_4$	θ_o	2,320	1,450	0,5770	0,0800	0,0422
	k_1	3,540	3,320	1,0800	0,1280	0,0690
$\bar{\lambda}_5$	θ_o	2,320	2,100	1,7400	1,4400	1,1600
	k_1	3,540	2,640	2,6200	1,3200	1,1700

Обозначения, принятые в табл.4.6:

$\bar{\lambda}_1$ – условная гибкость стенки двутавра или прямоугольного коробчатого сечения с учетом частичного защемления стенки в поясах;

$\bar{\lambda}_2$ – условная гибкость стенки швеллера или пояса коробчатого сечения, соответствующая шарнирному сопряжению пояса и стенки;

$\bar{\lambda}_3$ – условная гибкость полки двутавра, тавра или крестового сечения;

$\bar{\lambda}_4$ – условная гибкость одиночного свеса, наиболее напряженного по закрепленной кромке;

$\bar{\lambda}_5$ – условная гибкость одиночного свеса, наиболее напряженного по свободной кромке.

Приведенные выше результаты получены для жестких пластинок, которые считаются идеально плоскими до потери устойчивости. В более тонких пластинках ($\bar{\lambda}_n > 6$) всегда имеют место начальные искривления, которые соизмеримы с толщиной и существенно влияют на величину нагрузки, которую может нести пластинка. Задача в этом случае сводится к определению максимальной нагрузки и соответствующих деформаций с учетом начальных искривлений, дополнительных прогибов и изменения компонентов напряжений по толщине пластинки. Решение значительно усложняется и в настоящее время получены результаты только при действии отдельных видов внешней нагрузки (внецентренное сжатие, чистый изгиб, сдвиг).

4.8.2. Стенки балок. Стенки балок для обеспечения их устойчивости укрепляются: поперечными основными ребрами, поставленными на всю высоту с одной (односторонние) или двух (парные) сторон стенки; поперечными основными и продольными ребрами; поперечными основными и продольными ребрами, а также дополнительными короткими ребрами, которые располагаются между сжатым поясом и продольным ребром.

Прямоугольные отсеки, заключенные между поясами и поперечными ребрами, а также продольными ребрами проверяются на устойчивость. При этом расчетная высота стенки определяется в зависимости от типа сечения по требованиям, приведенным в [2]. Стенки балок, в которых действуют все компоненты напряженного состояния (σ, τ, σ_{loc}), рассчитываются в предположении упругой работы материала. В стенках балок, в которых $\sigma_{loc}=0$, допускается учет развития пластических деформаций при выполнении условий, указанных в п.7.5 [2].

Проверка устойчивости стенок при упругой работе материала подробно изложена в [1]. При наличии пластических деформаций в стенке условие ее устойчивости имеет вид

$$M \le \left\{\sigma_1 A_{f1} h_1 + R_y\left[A_{f2}(h_w - h_1) - 4h_1^2 t m_w + \frac{th_w}{2}(h_w - 2h_1)\bar{\sigma}_w\right]\right\}\gamma_c , \qquad (4.19)$$

где индекс f относится к полке, а w – к стенке; M – расчетный изгибающий момент в рассматриваемом отсеке стенки; $\bar{\sigma}_w = \sqrt{1 - 3\tau^2 / k_y^2}$ – относительные нормальные напряжения в пластической зоне стенки; $m_w = 0{,}24 - 0{,}15(\tau / R_s)^2 - 8{,}5 \cdot 10^{-3}(\bar{\lambda}_w - 22)^2$; σ_1 – напряжения на сжатой кромке стенки, если $\sigma_1 > R_y$, то принимать $\sigma_1 = R_y$; h_w – высота стенки составной балки; h_1 – расстояние от центра тяжести сечения до сжатой кромки стенки; остальные обозначения ясны из рис.4.10.

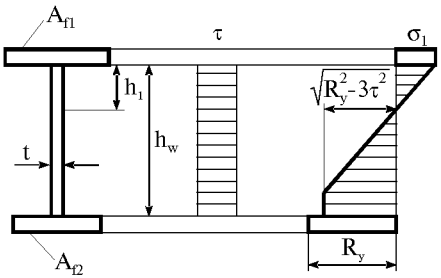


Рис.4.10. Расчетная схема асимметричного сечения

Напряжения в сжатом поясе вычисляются по формуле

$$\sigma_1 = \frac{R_y(A_{f2} + \bar{\sigma}_w t(h_w - 2h_1)}{A_{f1}} .$$

При $A_{f1} = A_{f2}$ из (4.19) получается формула (78) [2] для проверки устойчивости стенки симметричного двутавра.

Для балок, имеющих различное расчетное сопротивление материала стенки и поясов (бистальные балки), проверка устойчивости имеет вид:

для двутаврового сечения

$$M \le R_f h_{ef}^2 t \gamma_c \left(\frac{A_f}{A_w} + m_w \frac{R_w}{\sigma_f} \right), \tag{4.20}$$

где $\sigma_f = \dfrac{\sigma_w R_w}{\sqrt{3(1 - 4m_w / \bar{\sigma}_w)}}$, если $\sigma_f > R_f$, то следует принимать $\sigma_f = R_f$; R_w, R_f – расчетные сопротивления материала соответственно стенки и пояса;

для коробчатого сечения

$$M \le R_f h_{ef}^2 t \gamma_c \left(\frac{A_f}{A_w} + m_w \frac{R_w}{\sigma_f} \right). \tag{4.21}$$

При $\sigma_f = R_w$ получим расчетные формулы проверки устойчивости стенок для балок из однородного материала.

4.8.3. Стенки центрально- и внецентренно-сжатых элементов. Допустимые значения гибкости стенок центрально сжатых элементов установлены из условия равноустойчивости стержня и элементов его поперечного сечения. При этом условие устойчивости стенки имеет вид

$$\bar{\lambda}_w \le \bar{\lambda}_{uw}, \tag{4.22}$$

где $\bar{\lambda}_w = (h_{ef}/t)\sqrt{R_y/E}$ – условная гибкость стенки; $\bar{\lambda}_{uw}$ – предельное значение условной гибкости стенки, соответствующее потере ее устойчивости.

При определении напряженно-деформированного состояния стержня учитывались его геометрические несовершенства и случайные эксцентриситеты осевой силы. При этом случайные эксцентриситеты осевой силы принимаются перпендикулярно плоскости стенки.

Если стержень недогружен, то допускается принимать более гибкую стенку, чем в условии (4.22). В этом случае частичное выпучивание стенки не означает исчерпания несущей способности стержня, а приводит к уменьшению его расчетного сечения, когда вместо площади сечения вводится его часть (редуцированная площадь), которая вычисляется в соответствии с требованиями п.7.20* [2].

Допустимая гибкость стенок внецентренно-сжатых элементов определяется в зависимости от вида напряженно-деформированного состояния стержня при вычислении его предельной нагрузки. При этом в нормах [2] введены две проверки устойчивости стенок в зависимости от вида предельной нагрузки. Если нормальные напряжения при внецентренном сжатии в плоскости действия момента {формула (51) [2]} больше, чем напряжения, соответствующие изгибно-крутильной форме потери устойчивости {формула (56) [2]}, то проверка устойчивости выполняется по формулам табл.27* [2]. Этот случай соответствует учету пластической работы в опасном сечении. В противном случае материал стержня работает в упругой области и проверка устойчивости выполняется по формуле (90) [2].

При недогрузке стержня нормы [2] рекомендуют выполнять расчет с учетом редуцированной площади стержня, аналогично расчету при осевом сжатии. Однако при недонагрузке до 20% можно проверять устойчивость стенки, учитывая существенное снижение деформации по формуле, полученной в работе [20]

$$\bar{\lambda}_w \le \bar{\lambda}'_{uw}, \tag{4.23}$$

где $\bar{\lambda}'_{uw} = \bar{\lambda}_{uw} + 5(\bar{\lambda}_{w,cr} - \bar{\lambda}_{uw})\left(1 - \dfrac{N}{\varphi_e A R_y \gamma_c}\right)$; $\bar{\lambda}_{uw}$ – вычисляется по формулам табл.27* [2]; $\bar{\lambda}_{w,cr} = \dfrac{h_{ef}}{t}\sqrt{\dfrac{R_y}{E}}$; h_{ef}/t определяется по (90)[2].

При недогрузке более 20% устойчивость стенок внецентренно-сжатых стержней следует всегда проверять по формуле (90)[2].

Таким образом устойчивость стенок внецентренно-сжатых стержней проверяется в такой последовательности. Если $\bar{\lambda}_w < \bar{\lambda}_{uw}$, то это значит, что стенка устойчива и проверка на этом заканчивается. При недогрузке до 20% проверяется условие (4.23); если оно выполняется, то проверка заканчивается. Если условие (4.23) не выполнено, то вычисляется редуцированная площадь сечения и проверяется несущая способность стержня с этой площадью. При недогрузке более 20% при изгибно-крутильной форме потери устойчивости стержня проверка устойчивости стенки выполняется по формуле (90)[2].

4.8.4. Поясные листы (полки) центрально-, внецентренно-сжатых и изгибных элементов. Поясные листы стержней, сжатых осевой силой, а также при внецентренном сжатии в плоскости стенки работают в условиях равномерного сжатия от действия расчетных нагрузок. При этом деформации в наиболее сжатом поясе внецентренно-сжатого стержня значительно выше, чем деформации при действии осевой силы. Это обстоятельство не учитывается нормами [2] для поясов двутавров, но учтено для коробчатых сечений.

Условие устойчивости поясов имеет вид

$$\bar{\lambda}_f \le \bar{\lambda}_{uf}, \tag{4.24}$$

где $\bar{\lambda}_f = b_{ef}/t\sqrt{R_y/E}$ – условная гибкость пояса; b_{ef} – расчетная ширина пояса (свеса); $\bar{\lambda}_{uf}$ – предельная условная гибкость пояса (свеса) из условия его устойчивости.

Результаты, полученные в работе [21], дают возможность получить следующие расчетные формулы для вычисления предельной гибкости сжатых поясов внецентренно-сжатых стержней при $1 \le m \le 10$:

свес двутаврового сечения

$$\bar{\lambda}_{uf} = (0{,}35 + 0{,}05\bar{\lambda}_x - 0{,}02m)\sqrt{\frac{R_y\gamma_c\varphi_e}{\sigma}}; \tag{4.25}$$

$$\bar{\lambda}_{uf}^{\max} = 0{,}7, \quad \bar{\lambda}_{uf}^{\min} = 0{,}4$$

для пояса коробчатого сечения

$$\bar{\lambda}_{uf} = (0{,}8 + 0{,}3\bar{\lambda}_x - 0{,}05m)\sqrt{\frac{R_y\gamma_c\varphi_e}{\sigma}}, \tag{4.26}$$

где $\bar{\lambda}_x$ – условная гибкость стержня относительно оси, перпендикулярной плоскости действия момента; m – относительный эксцентриситет сжимающей силы (при $m > 4$ следует принимать $m = 4$); $\sigma = N/A$ – среднее напряжение в сечении.

При $0 < m < 1$ и $10 < m \le 20$ величина $\bar{\lambda}_{uf}$ определяется линейной интерполяцией по m между граничными значениями, где $m = 0$ – осевое сжатие; $m = 20$ – изгиб.

Условие устойчивости поясных листов изгибаемых элементов имеет вид (4.24). При этом учитывается совместная работа стенки и поясов в составе сечения, что позволяет получить следующие зависимости между предельными значениями их гибкостей:

свесы двутавровых бистальных балок:

$$\bar{\lambda}_{uf} = (0{,}17 + 0{,}06\bar{\lambda}_w)\sqrt{R_f / R_w};$$
$$\bar{\lambda}_{uf}^{\max} = 0{,}5\sqrt{R_f / R_w};\quad \bar{\lambda}_{uf}^{\min} = 0{,}3\sqrt{R_f / R_w}; \tag{4.27}$$

пояс коробчатого сечения

$$\bar{\lambda}_{uf} = (0{,}675 + 0{,}15\bar{\lambda}_w)\sqrt{R_f / R_w};$$
$$\bar{\lambda}_{uf}^{\max} = 1{,}5\sqrt{R_f / R_w};\quad \bar{\lambda}_{uf}^{\min} = \sqrt{R_f / R_w}. \tag{4.28}$$

При $R_f = R_w$ получим расчетные формулы для балок, имеющих одинаковое расчетное сопротивление стенки и поясов.

4.9. Циклическая прочность сварных конструкций

Максимальное использование несущей способности металлоконструкции инженерных сооружений обусловливает возникновение в наиболее нагруженных зонах (зонах концентрации напряжений) местных упругопластических деформаций, развивающихся при относительно низких номинальных напряжениях. В циклически нагруженных конструкциях эти зоны становятся очагами зарождения усталостных трещин при ограниченном числе циклов нагружения (10^2–$5 \cdot 10^5$). В Строительных нормах и правилах отсутствует расчет на малоцикловую прочность и не допускается работа конструкции при наличии трещин. Однако СНиП III–18–75 допускает наличие в сварном шве различных дефектов (непроваров, подрезов, пор и шлаковых включений), которые могут быть инициаторами усталостных трещин уже на первых сотнях или тысячах циклов нагружения. Кроме того, практика эксплуатации показывает возможность и допустимость работы конструкции на стадии развития трещины.

В зависимости от назначения сооружения за предельное состояние конструкции может быть принято образование допустимой трещины (обнаруживаемой средствами дефектоскопического контроля или регламентируемой нормами на изготовление) или достижение ею критической длины. определяемой возможностью хрупкого разрушения конструкции (для поверхностной или сквозной трещины) или ее разгерметизации (для поверхностной трещины). В соответствии с этим полный ресурс элементов металлоконструкции (N) определяется числом циклов, необходимым для зарождения усталостной трещины ($N_з$), и числом циклов, необходимым для ее развития до критического размера (N_p):

$$N = N_з + N_p.$$

Далее приводится расчет сварных строительных металлоконструкций на циклическую (в том числе малоцикловую) прочность с учетом качества (дефектов) изготовления и температуры эксплуатации.

4.9.1. Расчет малоцикловой прочности сварных конструкций на стадии образования трещины. Расчет конструкций на малоцикловую прочность производится в зонах концентрации напряжений по деформационному критерию местной прочности на стадии образования трещины [22]. Расчет справедлив для стальных конструкций из малоуглеродистой и низколегированной стали в интервале температур от минус 160 до плюс 600°С.

Определение расчетного числа циклов нагружения. Для нахождения расчетного числа циклов нагружения $N_э$ эксплуатационная нагруженность принимается в виде нерегулярного процесса, состоящего из блоков с амплитудой напряжений в блоке i:

$$\sigma_{a,i} = 0{,}5(\sigma_{\max i} - \sigma_{\min i}) ,$$

где $\sigma_{\max i}$, $\sigma_{\min i}$ – номинальные максимальные и минимальные значения циклических напряжений в элементах конструкций в каждом блоке нагружения ($i = 1, 2,....k$), определяемые по графическим или табличным циклограммам.

Расчетное число циклов нагружения следует вычислять по формуле

$$N_э = 1 / \sum_{i=1}^{k} \frac{\beta_i}{N_{э\,i}} ,$$

где β_i – коэффициент, определяемый из циклограммы нагружения как отношение числа циклов с амплитудой номинальных напряжений σ_{ai} за год к суммарному числу циклов за этот же период; $N_{эi}$ – определяется в зависимости от амплитуды местных приведенных напряжений σ^*_{ai} в блоке i по формулам:

$$N_{э\,i1} = \left[\frac{c^*_\psi}{2\sigma^*_{ai} - \dfrac{\sigma^*_{-1}}{1 + 0{,}4\left(\dfrac{1+\rho_i}{1-\rho_i}\right)}} \right]^2 ; \qquad (4.29)$$

$$N_{э\,i2} = 0{,}1\left[\frac{c^*_\psi}{\sigma^*_{ai} - \dfrac{\sigma^*_{-1}}{1 + 0{,}4\left(\dfrac{1+\rho_i}{1-\rho_i}\right)}} \right]^2 . \qquad (4.30)$$

За расчетное принимается меньшее из двух значений $N_{эi}$, определенных по формулам (4.29) и (4.30). Если зарождение трещин равновозможно в нескольких зонах, то расчет проводится для каждой зоны в отдельности.

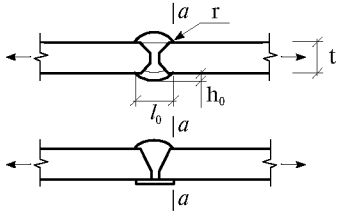
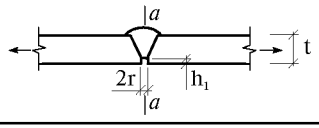
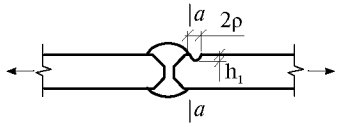
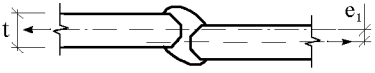
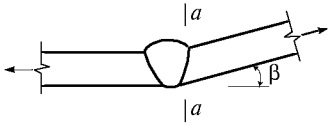
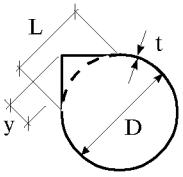
Определение коэффициентов концентрации напряжений. По табл.4.7 для расчетного элемента определяется теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ и зона металла сварного соединения, где произойдет зарождение усталостной трещины. Расчет по основному металлу, кроме оговоренных в табл.4.7, возможен при наличии дефектов типа выколов, задиров вне сварного соединения.

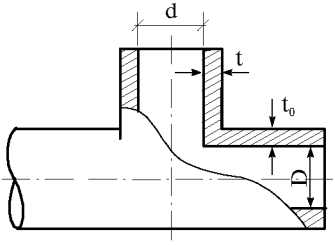
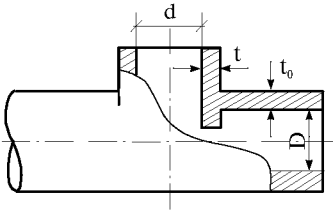
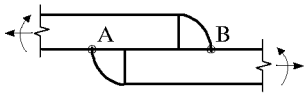
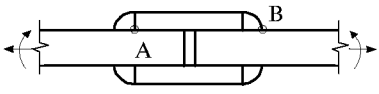
Расчет α_σ для сварного стыкового шва с подрезом производится по формуле

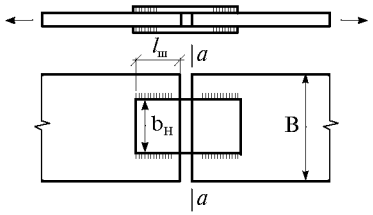
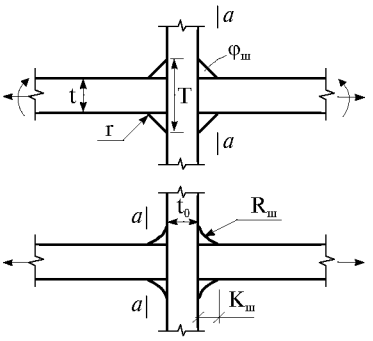
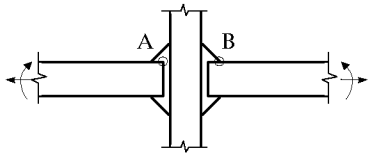
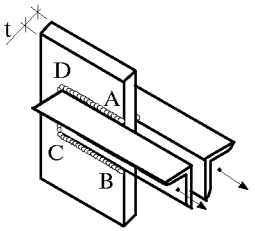
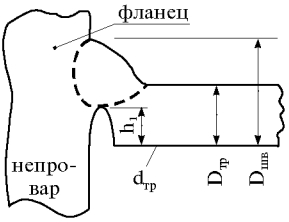
$$\alpha_\sigma = \alpha^{п}_\sigma \cdot \alpha^{ф}_\sigma ,$$

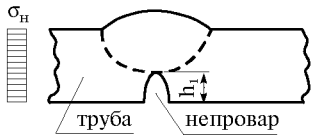
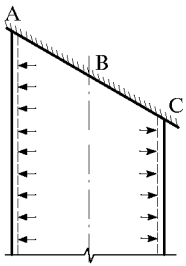
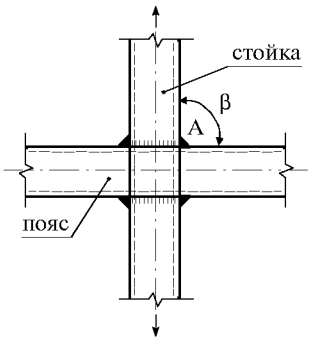
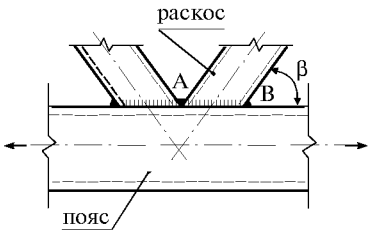
где $\alpha^{п}_\sigma$ и $\alpha^{ф}_\sigma$ – коэффициенты концентрации напряжений от подреза и геометрической формы соответственно (по табл.4.7).

Таблица 4.7. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений в различных видах узлов и соединений сварных металлоконструкций

Вид расчетного соединения (узла)	Коэффициент концентрации	Зона разрушения *а–а*	$\bar{\sigma}^{св}_{max}$
1	2	3	4
1. Стыковое соединение			
1.1. Стыковой V, X-образный шов, V-образный шов на подкладке [33]			
	$\alpha_\sigma^\phi = 1 + 1 / \sqrt{r\left(\frac{14}{l_0} + \frac{1,7}{h_0} + \frac{5}{t}\right)}$ при $r = 2$мм; $t = 20...30$ $\alpha_\sigma^\phi = 1,6$ $t = 30...60$ $\alpha_\sigma^\phi = 1,7$	ОШЗ	0,8*
1.2 Непровар в корне одностороннего шва [22]			
	при $r = 0,5$ мм; $h_1/t = 0,1$; $t \le 30$ $\alpha_\sigma = 2,5$	МШ	0,8*
1.3 Стыковой шов с подрезом [33]			
	$\alpha_\sigma^n = \left(1 + 0,58\sqrt{t/\rho}\right)$ при $h_1 = 1$ мм; $\rho = 0,5$ $\alpha_\sigma^n = 1,8$ $\rho = 0,25$ $\alpha_\sigma^n = 2,2$	ОШЗ	0,8*
1.4 Смещение кромок (депланация) [22]			
	$\alpha_\sigma^\partial = \left(1 + 3e_1/t\right)$ при $e_1 = 10\%$ t, но ≤ 3мм $t = 20...30$ $\alpha_\sigma^{см} = 1,3$ $t = 40$ $\alpha_\sigma^{см} = 1,23$ $t = 60$ $\alpha_\sigma^{см} = 1,15$	ОШЗ	0,8*
1.5 Стыковой шов с угловатостью (без учета формы шва)			
	$K^* = \frac{0,013E\sqrt{\bar{\sigma}_n}}{\sigma_n(1-\bar{\sigma}_n)}\left[\exp\frac{\beta^0}{16} + \exp\left(\frac{\beta^0}{20} - 0,15\right) - 2\right]$, где σ – номинальные напряжения $\bar{\sigma}_n = \sigma / R_y^T$ При $K^* < 1$ принимать $K^* = 1$	ОШЗ	0,8
1.6 Угловатость сварного шва (домик) [24]			
	$\alpha_\sigma^y = 1 + \frac{3L}{Pt}\left(1 - \frac{L}{\pi D}\right)$ $[L],[D],[t] = M$ $L = D\sqrt{\frac{Dy + y^2}{D^2/4 + Dy + y^2}}$	ОШЗ	0,8

<table>
<tr><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr>
<tr><td colspan="4">2. Патрубки [29]</td></tr>
<tr><td colspan="4">2.1. Приваренный патрубок</td></tr>
<tr><td>
</td><td>$\sigma = \frac{D + t_0}{2t_0} p$,
где p – внутреннее давление
<table>
<tr><th>$\frac{t}{t_0}$</th><th>$\frac{d}{D}$</th><th>α_σ^*</th></tr>
<tr><td>1</td><td>≤ 0,8</td><td>$4{,}35\frac{d}{D} + 1{,}95$</td></tr>
<tr><td>0,8</td><td>≤ 0,6</td><td>$6{,}17\frac{d}{D} + 2$</td></tr>
<tr><td>0,6</td><td>≤ 0,4</td><td>$8{,}13\frac{d}{D} + 2{,}3$</td></tr>
<tr><td>0,4</td><td>≤ 0,3</td><td>$9{,}13\frac{d}{D} + 2{,}55$</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td>$\frac{t}{D}$</td><td>0,1</td><td>0,02</td><td>0,04</td><td>0,08</td></tr>
<tr><td>R</td><td>1</td><td>0,91</td><td>0,82</td><td>0,75</td></tr>
</table></td><td>ОШЗ</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td colspan="4">2.2. Симметрично вваренный патрубок</td></tr>
<tr><td>
</td><td>$\alpha_\sigma = \alpha_\sigma^* \cdot R_1$
<table>
<tr><td>1,4</td><td>–</td><td>$3{,}4\frac{d}{D} + 0{,}89$</td></tr>
<tr><td>1</td><td>–</td><td>$4{,}1\frac{d}{D} + 1{,}07$</td></tr>
<tr><td>0,7</td><td>0,7</td><td>$5{,}4\frac{d}{D} + 1{,}19$</td></tr>
<tr><td>0,55</td><td>0,6</td><td>$6\frac{d}{D} + 1{,}38$</td></tr>
</table>
<table>
<tr><th>$\frac{t}{t_0}$</th><th>$\frac{d}{D}$</th><th>α_σ^*</th></tr>
</table>
<table>
<tr><td>$\frac{t}{D}$</td><td>0,01</td><td>0,02</td><td>0,04</td><td>0,08</td></tr>
<tr><td>R</td><td>1</td><td>0,87</td><td>0,67</td><td>0,54</td></tr>
</table></td><td>ОШЗ</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td colspan="4">3. Другие виды соединений</td></tr>
<tr><td colspan="4">3.1. Соединение внахлестку с лобовыми швами [22]</td></tr>
<tr><td>Несимметричное

</td><td>В точке A без подреза:
$\alpha_\sigma = 3$ – растяжение
$\alpha_\sigma = 2{,}5$ – изгиб</td><td>МШ</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td></td><td>В точке B при подрезе ≤1мм:
$\alpha_\sigma = 3{,}5$ – растяжение
$\alpha_\sigma = 2{,}6$ – изгиб</td><td>ОШЗ</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td>Симметричное

</td><td>В точке A без подреза:
$\alpha_\sigma = 4$ – растяжение
$\alpha_\sigma = 2{,}8$ – изгиб</td><td>МШ</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td></td><td>В точке B при подрезе ≤1мм:
$\alpha_\sigma = 3{,}2$ – растяжение
$\alpha_\sigma = 2{,}65$ – изгиб</td><td>ОШЗ</td><td>0,9</td></tr>
</table>

1	2	3	4
3.2 Соединение с фланговыми швами [35]			
	$\alpha_\sigma = \dfrac{3{,}3cth2{,}3b_н(2l_ш)}{2l_ш/B}$	ОМ	0,9
3.3 Тавровое соединение [22]			
Полное проплавление 	$\alpha_\sigma = 1 + \dfrac{q}{\sqrt{r}}\sin\varphi_m;\ g = T/t$ при растяжении $q = \sqrt{(g-1)/(g^3-1{,}6)}$ при изгибе $q = 0{,}3(g-1)^{0{,}2} \le 3$ Средние значения r и φ_m $r = 0{,}5...1$ $\quad \varphi_ш = 24...46°$ В случае равносторонних вогнутых швов с радиусом $R_ш$ $\alpha_\sigma = 1 + 0{,}4\sqrt{(2\delta_1 - k_ш)/R_ш)}$ $k_ш$ – катет шва	ОШЗ	0,9
Неполное проплавление 	В точке *A*: $\alpha_\sigma = 4$ – растяжение $\alpha_\sigma = 1{,}8$ – изгиб	МШ	0,9
	В точке *B*: $\alpha_\sigma = 2{,}5$ – растяжение $\alpha_\sigma = 1{,}6$ – изгиб	МШЗ	0,9
3.4. Крепление уголков к фасонке			
	В точке *A* (обушок) $\alpha_\sigma = 4$ В точке *B* (перо) $\alpha_\sigma = 2{,}8$ В точке *C* (полка) $\alpha_\sigma = 2{,}3$ В точке *Д* (фасонка) $\alpha_\sigma = 2{,}9$	ОШЗ	0,9
	при заведении лобового шва на длину не менее $3t$		
3.5. Соединения труб			
Фланцевое соединение 	№ / h_1, % / α_σ 1 / 10 / 3,5 2 / 20 / 4,4 3 / 30 / 5,5 4 / 40 / 6,7	МШ	0,9*

1	2	3	4
Стыковое соединение  	№ / h_1, % / α_σ: 1 — 10 — 4,9 2 — 20 — 5,7 3 — 30 — 6,4 4 — 40 — 7,6	МШ	0,8*
Соединение под углом  	Напряжение Точка: *A* — $\alpha^*_{кольц}$ 0,5, $\alpha^*_{прод}$ 3,9; *B* — 1,3; 1,9; *C* — 0,6; 3,9 * − Внутреннее волокно	ОМ	0,9*
3.6. Соединения холодногнутых электросварных прямоугольных труб			
а) β=90°  	В точке А−стойка, зона гиба α_σ = 4,65	ОШЗ	0,9
	В точке А − пояс, α_σ = 3,1		
б) β=54°  	В точке В − пояс, α_σ = 1,2 (стойки не нагружены)	ОШЗ	0,9*

Примечание. ОМ – основной металл; МШ – металл шва; ОШЗ – околошовная зона.

* В зонах сопряжения и пересечения швов (две-три ширины шва от места пересечения) принять $\overline{\sigma}^{св}_{max} = 1$

Расчет α_σ для сварного стыкового шва с депланацией и угловатостью производится по формуле

$$\alpha_\sigma = \alpha^{ф}_\sigma\left[(\alpha^{д}_\sigma - 1) + (\alpha^{у}_\sigma - 1) + 1\right],$$

где $\alpha^{д}_\sigma$ и $\alpha^{у}_\sigma$ – коэффициенты концентрации учитывающие дополнительное повышение напряжений при наличии депланации и угловатости соответственно (по табл.4.7).

Коэффициент α_σ для сварного стыкового шва с депланацией, угловатостью и подрезом рассчитывают по формуле

$$\alpha_\sigma = \alpha_\sigma^{\phi}\left[1 + (\alpha_\sigma - 1) + (\alpha_\sigma^{y} - 1)\right]\alpha_\sigma^{п}.$$

Определение амплитуды и коэффициента асимметрии цикла напряжений. Максимальные и минимальные относительные номинальные напряжения в блоке i определяются по формулам:

$$\bar{\sigma}^n_{\max i} = \sigma^n_{\max i} \big/ R^{т}_y \; ; \quad \bar{\sigma}^n_{\min i} = \sigma^n_{\min i} \big/ R^{т}_y \; .$$

Амплитуда местных приведенных напряжений σ^*_{ai} определяется по формуле

$$\sigma^*_{ai} = (\sigma_{\max i} k^* - \sigma_{\min i} k^*)\, 0{,}5,$$

где k^* – коэффициент концентрации упругопластических деформаций, определяемый по графику (рис.4.11) для $\sigma^n_{\max i}$ и $\sigma^n_{\min i}$ отдельно в зависимости от $\bar{\sigma}^n_{\max i}$ и $\bar{\sigma}^n_{\min i}$ соответственно при известном α_σ.

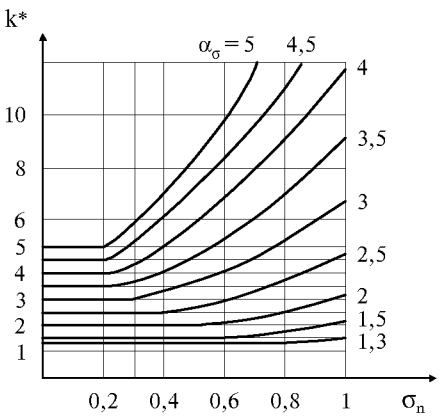


Рис.4.11. Коэффициент концентрации упругопластических деформаций

Коэффициент асимметрии цикла ρ_i в блоке i определяется по формуле

$$\rho_i = \frac{\sigma_{\min i} + 0{,}2R^{т}_y}{\sigma_{\max i} + 0{,}2R^{т}_y}$$

Определение расчетных характеристик материала. Предел выносливости с учетом остаточных сварочных напряжений находится по формуле

$$\sigma^*_{-1} = \sigma^{т}_{-1} - 0{,}4\bar{\sigma}^{св}_{\max}\bar{\sigma}_{осв}\, R^{т}_y \, ,$$

где $\sigma^{т}_{-1}$ – предел выносливости материала, вычисляемый по формуле $\sigma^{т}_{-1} = 0{,}4R^{т}_y$; $\bar{\sigma}_{осв}$ – остаточные сварочные напряжения, определяемые по графику (рис.4.12) в зависимости от α_σ и $\bar{\sigma}_{\max}$; $\bar{\sigma}^{св}_{\max}$ – относительные максимальные сварочные напряжения, определяемые по табл.4.7; C^*_ψ – параметр, характеризующий пластические свойства материала, вычисляемый по формуле

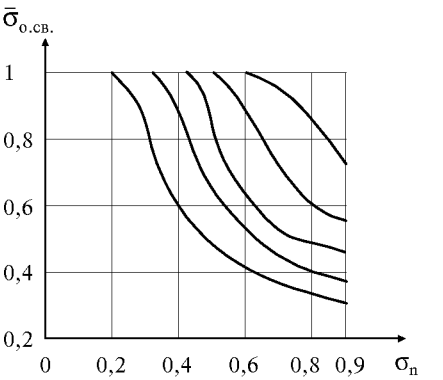


Рис.4.12. Значения остаточных сварочных напряжений в зависимости от уровня нагружения

$$C^*_\psi = \frac{E^{т}}{4} \ln \frac{1}{1 - \psi^{т}},$$

где $E^{т}$ – модуль упругости материала при расчетной температуре.

Значения R_y, σ_{-1} и ψ для расчетной зоны сварного соединения следует определять по формулам:

для околошовной зоны:

$$R_y^{\text{ошз}} = 1{,}2R_y^{\text{т}};$$

$$\sigma_{-1}^{\text{ошз}} = \sigma_{-1}^{\text{т}};$$

$$\psi^{\text{ошз}} = 0{,}8\psi^{\text{т}};$$

для металла шва:

$$R_y^{\text{мш}} = 1{,}1R_y^{\text{т}};$$

$$\sigma_{-1}^{\text{мш}} = \sigma_{-1}^{\text{т}};$$

$$\psi^{\text{мш}} = 0{,}9\psi^{\text{т}},$$

где $R_y^{\text{т}}$, $\sigma_{-1}^{\text{т}}$, $\psi^{\text{т}}$ – расчетные характеристики для основного металла при расчетной температуре, определяемые по нормативным документам (справочники, СНиП, ГОСТ, ТУ) или в качестве примера для стали 09Г2С, по табл.4.8.

Таблица 4.8. Расчетные характеристики отдельных зон сварных соединений стали 09Г2С при эксплуатационных температурах

T°C	Зона сварного соединения	$R_y^{\text{т}}$, МПа	$\sigma_{-1}^{\text{т}}$, МПа	$\psi^{\text{т}}$, %	$E \cdot 10^{-5}$, МПа
−100	ОМ	520	295	52	2,19
	МШ				2,19
	ОШЗ	455	250	38	2,19
−70	ОМ	435	260	54	2,19
	МШ				2,13
	ОШЗ	400	240	45	2,13
+20	ОМ	340	195	58	2,06
	МШ	370	200	54	2,06
	ОШЗ	310	180	48	2,06
300	ОМ	270	170	62	2
	МШ	410	255	49	2
	ОШЗ	250	165	50	2
400	ОМ	270	165	65	1,95
	МШ				1,95
	ОШЗ	200	150	50	1,95
500	ОМ	230	135	81	1,88
	МШ	290	165	51	1,88
	ОШЗ	180	125	61	1,88
600	ОМ	150	85	84	1,79
	МШ	220	110	63	1,79
	ОШЗ	130	75	69	1,79

Примечание. ОМ – основной металл; МШ – металл шва; ОШЗ – околошовная зона.

4.9.2. Расчет циклической прочности сварных металлоконструкций на стадии распространения усталостной трещины. Зародившаяся усталостная трещина под действием переменных нагрузок начинает развиваться. Ее развитие происходит до тех пор, пока размеры трещины не превысят критических значений, определяемых следующими четырьмя условиями [29]:

1) возможностью хрупкого разрушения;
2) превышением трещиной предельной скорости развития ($V > V_{пр} = 10^{-6}$ м/цикл);
3) потерей сечением несущей способности ($A_n \le A$);
4) условиями эксплуатации (например разгерметизация для резервуаров и сосудов давления).

Второе – четвертое условия разрушения достаточно просты. Наибольшую сложность представляет проверка первого условия.

Вычисление предельных размеров трещины из условия недопустимости хрупкого разрушения. Глубина поверхностной трещины a, при которой сечение элемента с трещиной переходит в хрупкое состояние, определяется в рамках температурного подхода решением уравнения

$$A\lambda_к^2 - 2A\lambda_к + C = 0\,, \tag{4.31}$$

где $\lambda_к = a/t$; t – толщина листа;

$$C = T_{к2} + \Delta T_{св} + \Delta T_{ст} + \Delta T_н + \Delta T_{кон} + \Delta T_в - T_э, \tag{4.32}$$

где $\Delta T_{св}$, $\Delta T_{ст}$, $\Delta T_н$, $\Delta T_{кон}$, $\Delta T_в$ – смещение второй критической температуры хрупкости вследствие влияния сварочных напряжений, длительного воздействия повышенных температур, двуосности напряженного состояния, концентраторов напряжений; $\Delta T_в$ – температурный запас вязкости; $T_э$ – температура эксплуатации; $\Delta T_{св} = 15°C$; $\Delta T_н = 15°C$; $\Delta T_{кон} = 10°C$; $\Delta T_в = 10°C$. Значение температурного смещения $\Delta T_{ст}$ учитывается, когда температура конструкции превышает 350°C при продолжительности воздействия более 500 ч., и для основных марок строительных сталей оно составляет:

Сталь марки	Смещение, °C
ВСт3сп	20
09Г2С	40
16Г2АФ	20

$T_{к2}$ – вторая критическая температура для конструкции, °C:

где
$$T_{к2} = m_2 + \alpha_R n_2 - C_2\,;$$
$$m_2 = -188 + 0{,}825t\,; \tag{4.33}$$
$$n_2 = 5{,}5 + 0{,}11t\,;$$

α_R – упругий коэффициент концентрации напряжений; t – мм; m_2, n_2, °C; C_2 – параметр, °C, зависящий от категории поставки низколегированных марок стали и находится из следующих данных:

Категория поставки	C_2, °C
6,12	15
7,13	30
9,15	40

Для малоуглеродистых сталей $C_2 = 0$;

$$A = T_{к2} - T_{с1}, \tag{4.34}$$

где $T_{с1}$ – критическая температура хрупкости стали для элементов со сквозными трещинами. $T_{с1}$ для стали различных марок и толщин приведены в табл.4.9.

Таблица 4.9. Критическая температура хрупкости стали для элементов со сквозными трещинами

Толщина t, мм	Сталь марки				
	Ст3сп5	09Г2С	16Г2АФ	ОН6	ОН9
12	-70	-100	-150	–	–
16	–	–	-90	-100	-180
20	-50	-80	-130	–	-185
25	-40	–	–	–	
32	–	-60	-90	–	
50	–	-50	–	–	

Для низколегированных марок сталей, поставляемых по 15-й категории (ГОСТ 19281–89) значения T_{c1} понижаются на 20°С относительно данных, приведенных в табл.4.9.

По отношению найденных параметров C/A судят о возможности допущения трещин в расчетных сечениях. Так, при $C/A \le 0$ трещины в сварном соединении не допускаются; при $0 < C/A < 1$ в соединении допускаются поверхностные трещины глубиной

$$\lambda_к = 1 - \sqrt{1 - C/A}\ ; \tag{4.35}$$

при $C/A \ge 1$ в соединении допускаются сквозные трещины.

Таким образом при глубине поверхностной трещины $\lambda \le \lambda_к$ сечение находится в вязком состоянии. Кроме того, из условия прочности при растяжении следует, что трещина глубиной

$$\lambda \le 0{,}4\sqrt{\frac{5 l_0 q_p}{t}} \tag{4.36}$$

практически не снижает несущей способности элемента с трещиной.

В формуле (4.36) l_0 – минимальная расчетная длина сквозной трещины, не снижающая прочности элемента при растяжении в вязком состоянии. $q_p = a/c$, где a, c – глубина и полудлина поверхностной трещины.

Глубина поверхностной трещины должна с двойным запасом удовлетворять условиям (4.35), (4.36):

$$\lambda_p \le \begin{cases} \lambda_p \le \dfrac{1}{2}\lambda_к \\ \lambda_p \le 0{,}2\sqrt{\dfrac{5 l_0 q_p}{t}}. \end{cases} \tag{4.37}$$

Кроме того, при использовании критерия течи в оценке прочности листовых конструкций необходимо, чтобы длина поверхностной трещины c_p была меньше расчетной длины сквозной трещины

$$\lambda \le \left(\frac{l_0}{t}\right) q_p\ , \tag{4.38}$$

что видно из условия $\left[\dfrac{a_p}{t} \le \dfrac{c_0}{t}\dfrac{a_p}{c_p} \Rightarrow c_p \le l_0\right]$.

В том случае, когда $\lambda > \lambda_к$, сечение с трещиной находится в хрупком состоянии, однако трещины глубиной $\lambda > \lambda_к$ не приводят к разрушению элементов, если условия нагружения таковы, что $K < K_c$; параметр K рассчитывается по изложенным далее данным. Значения K_c для стали различных марок приведены в табл.4.10.

Таблица 4.10. Значения K_c

Сталь марки	Толщина, мм	K_c, МПа $\sqrt{м}$
Ст3сп5	12	90
	20	85
	25	75
09Г2С	20	90
	36	90
16Г2АФ	16	112
	20	110
ОН6	16	110
ОН9	16	165
	20	160

Поэтому в каждом конкретном случае имеется возможность увеличить расчетный предельный размер трещины. Однако этим можно воспользоваться лишь в том случае, когда расчетное значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) определено с высокой надежностью.

Определение скорости развития усталостной трещины. Развитие поверхностной усталостной трещины, зародившейся от исходного дефекта или в окрестности концентратора, описывается системой уравнений Пэриса [25], записанных для двух направлений развития трещины – вглубь и на поверхности.

$$\begin{aligned} da/dN &= c_0(\Delta K_a)^n; \\ dc/dN &= c_0(\Delta K_c)^n, \end{aligned} \tag{4.39}$$

где a, c – глубина и полудлина поверхностной трещины; ΔK_a, ΔK_c – размах КИН для крайних точек фронта трещины в глубине и на поверхности соответственно; c_0 , n – константы циклической трещиностойкости стали; N – число циклов нагружения.

Расчет КИН поверхностной полуэллиптической трещины производится с помощью выражений, полученных Ньюманом [26]:

$$K_I(\varphi) = (\sigma_R + H\sigma_{\square})\sqrt{\frac{\alpha}{Q}}F_{\varphi}(\lambda, q)\,, \tag{4.40}$$

где $\lambda = a/t$; $q = a/c$; $Q = 1 + 1{,}464q^{1{,}65}$;

$$H = H_1 + (H_2 - H_1)\sin p\varphi;\ p = 0{,}2 + q + 0{,}62;$$

$$H_1 = 1 - 0{,}34\lambda - 0{,}11q\lambda;\ H_2 = 1 + \lambda G_1(q) + \lambda^2 G_2(q);$$

$$G_1(q) = -1{,}22 - 0{,}12q;\ G_2(q) = 0{,}55 - 1{,}05q^{0{,}75} + 0{,}47q^{1{,}5};$$

$$F_{\varphi}(\lambda, q) = \left[M_1(q) + \lambda^2(q)M_2(q) + \lambda^4 M_3(q)\right]f_{\varphi}q;$$

$$M_1(q) = 1{,}13 - 0{,}09q;\ M_2(q) = \frac{-0{,}54 + 0{,}89}{0{,}2 + q};$$

$$M_3(q) = 0{,}5 - 1\ /\ (0{,}65 + q) + 14(1 - q))^{2\varphi};$$

$$f_\varphi = \left[q^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi\right]^{1/4};$$

$$q_\varphi = 1 + (0{,}1 + 0{,}35\lambda^2)(1 - \sin^2 \varphi)^2;$$

σ_R, $\sigma_и$ – растягивающие и изгибающие напряжения; φ – угол в плоскости поверхностной трещины, отсчитываемый от свободной поверхности.

Выражение (4.40) применимо лишь при линейном распределении номинальных напряжений по толщине сечения. При нелинейном распределении напряжений, что часто имеет место в сварных соединениях, аналитические выражения для вычисления КИН отсутствуют, а численные (МКЭ, ГИУ) трудоемки и дорогостоящи. В связи с этим при нелинейном распределении напряжений по толщине сечения используется приближенное уравнение [30]

$$\frac{K_{(\varphi)}^4}{6\pi^2 \sigma_{н.ср} \sigma_н^3} + \frac{K_{(\varphi)}^2 \rho(\varphi)}{\pi \sigma_{н.ср} \sigma_н} = \frac{ac}{2}, \qquad (4.41)$$

где $\sigma_н$ – номинальное напряжение в точке фронта трещины, для которой определяется КИН; $\sigma_{н.ср}$ – номинальное напряжение, взятое на уровне $z = 2a/3$, если КИН определяется в точке a и $z = 0$, если КИН вычисляется в точке c, где z – расстояние от поверхности элемента до точки фронта трещины, в которой вычисляется КИН; $\rho(\varphi)$ – радиус трещины, при $\varphi = 0$, $\rho = c$; при $\varphi = \pi/2$, $\rho = a$.

Уравнение (4.41) применимо при $a/c \geq 0{,}3$. При прорастании поверхностной трещины в сквозную для описания скорости развития трещины достаточно одного уравнения [25]

$$\frac{dl}{dN} = c_0 (\Delta K)^n, \qquad (4.42)$$

где l – полудлина сквозной трещины; ΔK– размах КИН.

В общем виде выражение для вычисления КИН сквозной трещины имеет вид

$$K = \sigma_н \sqrt{\pi l} \cdot M,$$

где M – параметр, описывающий влияние формы элемента, способа нагружения, близости свободной поверхности и т.д.

Для неограниченной пластины с центральной трещиной длиной $2l$, находящейся под действием равномерного растягивающего напряжения $\sigma_н$, приложенного на бесконечности, параметр $M = 1$. Для многих характерных случаев развития трещин значения поправочной функции M приведены в монографиях [27, 28].

Параметры c и n, входящие в уравнения (4.39) и (4.42), характеризуют сопротивление стали распространению усталостных трещин; они зависят от температуры и от свойств окружающей среды. Поэтому при составлении уравнений (4.39) и уравнения (4.42) требуется использовать значения c_0 и n, полученные при тех же условиях, в которых работает рассматриваемая конструкция. Методика экспериментального определения c_0 и n регламентирована [37].

Результаты испытаний представляются в виде диаграмм циклической трещиностойкости, построенных в координатах $\lg v$ – $\lg \Delta K$. Для примера на рис.4.13 представлены диаграммы циклической трещиностойкости стали марки 09Г2С, экспериментально полученные в диапазоне эксплуатационных температур. В табл.4.11 приведены значения c_0 и n полученные при обработке диаграмм для околошовной зоны, по которой, как правило, происходит разрушение стыкового соединения.

Определение усталостного ресурса элементов конструкции. Усталостный ресурс элемента с развивающейся трещиной определяется интегрированием системы уравнений (4.39) и уравнения (4.42) в пределах от начальных размеров трещины a_0 и c_0 до критических. Начальные размеры определяются либо при натурном обследовании конструкции, либо на основании имеющихся допусков на размеры дефектов. Предельные размеры дефектов находятся предварительно в соответствии с условиями хрупкого разрушения. Интегрирование уравнений осуществляется пошаговым методом с использование специальной программы для ЭВМ [36].

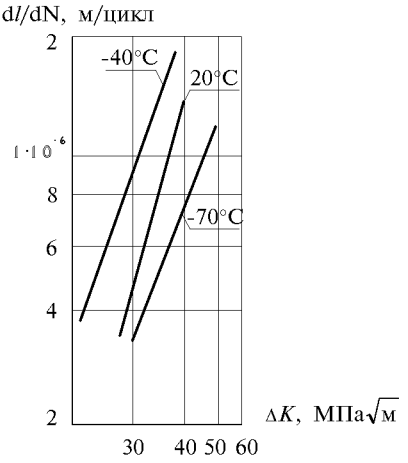


Рис.4.13. Диаграмма циклической трещиностойкости стали марки 09Г2С

Таблица 4.11. Значения c_0 и n

Т, °С	$c_0 \frac{M/\text{ цикл}}{\left(\text{МПа }\sqrt{M}\right)^n}$	n
20	$2\cdot10^{-12}$	3,19
-40	$1{,}5\cdot10^{-12}$	3,31
-70	$2{,}2\cdot10^{-11}$	2,61

Программа оценки усталостного ресурса учитывает следующие дополнительные факторы, оказывающие влияние на скорость развития трещин:

- *остаточные сварочные напряжения.* С увеличением уровня остаточных сварочных напряжений $\sigma_{ост}/R_y$ при низких уровнях действующих напряжений σ^n/R_y скорость развития трещин увеличивается. В программе имеется функция влияния $\sigma_{ост}/R_y$ на скорость развития трещин. Скорость развития трещин под влиянием сварочных напряжений может увеличиться в 2–4 раза;
- ρ – *коэффициент асимметрии цикла,* $\rho = \sigma^n_{min}/\sigma^n_{max}$. С увеличением ρ от –1 до 0,8 скорость развития трещин на прямолинейном Пэрисовском участке может увеличиваться до 10 раз. Функции влияния ρ зависят от материала [27];
- *влияние локальных пластических зон.* С увеличением уровня нагружения σ^n/R_y возрастает размер пластической зоны $\tau_т$ у вершины трещины. Функция влияния пластической зоны на скорость развития трещин построена от уровня нагружения σ^n/R_y. Так, при увеличении уровня нагружения до $\sigma^n/R_y = 0{,}9$ учет наличия пластических зон приводит к увеличению расчетных скоростей развития трещин до 4–5 раз;
- *влияние температуры эксплуатации* учитывается путем введения в уравнения (4.39), (4.42) констант циклической трещиностойкости c_0 и n, полученных при температуре эксплуатации. Как правило, для строительных сталей характерно увеличение сопротивления развитию трещин с уменьшением температуры (скорость роста трещин падает в несколько раз), однако при понижении температуры уменьшаются предельные размеры трещин, поэтому влияние пониженных температур на усталостный ресурс элементов неоднозначно. При повышени температуры эксплуатации до 600 °С скорость развития трещин может увеличиваться в 10 раз и более, усталостный ресурс элементов падает;

• *учет статистического рассеяния* характеристик стали и размеров исходных дефектов. Как показывает опыт экспериментальных исследований характеристики циклической прочности и трещиностойкости стали, а также анализ распределений размеров исходных дефектов, такие характеристики, как предел текучести, константы трещиностойкости c_0 и n, предельные и начальные размеры трещин являются случайными величинами. Для получения функции усталостной долговечности элемента применен метод статистического моделирования Монте-Карло.

В соответствии с этим методом область определения перечисленных параметров разбивается на равные интервалы, каждый из которых задается средним значением и вероятностью, с которой это значение реализуется. Затем с помощью датчика случайных чисел, вырабатывающего числа, равномерно распределенные в интервале 0–1, из распределений параметров формируется исходный вектор начальных данных. Вероятность присутствия каждого из значений параметров в векторе исходных данных определяется распределение этого параметра. Для каждого вектора исходных данных находится свое значение ресурса.

Для построения функции усталостной долговечности элемента с приведенным набором начальных данных используется обычно ~ 400 векторов. Полученный массив значений усталостного ресурса обрабатывается, и строится функция усталостной долговечности, в которой каждому числу циклов ставится в соответствие вероятность разрушения. Таким образом может быть определено расчетное число циклов, при котором вероятность разрушения не выше определенного уровня, например 1% и т.п.;

• *учет взаимодействия усталостных трещин.* Как показывает анализ случаев усталостного разрушения циклически нагружаемых сварных элементов МК, формирование магистральной трещины часто происходит путем объединения отдельных усталостных трещин, развивающихся на соседних участках. Анализ данных дефектоскопического контроля сварных соединений свидетельствует о том, что исходные дефекты типа непроваров, подрезов, пор и т.п. могут быть расположены на небольших расстояниях один от другого, а в некоторых случаях расстояние между ними оказывается сравнимым с размерами самих дефектов. Учет объединения усталостных трещин, развивающихся на соседних участках, может снизить расчетное значение усталостного ресурса в несколько раз.

В связи с вышеизложенным в программе предусмотрен учет взаимодействия развивающихся усталостных трещин. В соответствии с разработанной методикой и на основании статистических данных о размерах дефектов и расстояниях между ними формируется расчетный шов длиной L, на котором исходные трещиноподобные дефекты расположены случайным образом. Предполагается, что трещины на соседних участках развиваются одновременно. Их развитие описывается уравнениями (4.39), (4.42). При сближении трещин происходит увеличение скоростей их развития, что учитывается введением в уравнения (4.39), (4.42) поправочных функций на взаимодействие усталостных трещин. Расчет прекращается, когда одна из трещин, в том числе и образовавшаяся в результате объединения, не достигнет критических размеров (по условию хрупкого разрушения);

• *учет характера нагружения.* В качестве базового процесса нагружения при оценке усталостного ресурса элементов принят гармонический цикл с постоянной амплитудой и постоянными значениями $\sigma^n_{\min}$ и $\sigma^n_{\max}$. В программе предусмотрена возможность учета изменения трещиностойкости стали в зависимости от температуры и свойств окружающей среды. Это достигается путем организации блоков нагружения. В пределах каждого блока константы циклической трещиностойкости c_0 и n принимаются постоянными. На практике число типов блоков может соответствовать числу времен года и т.п.

В том случае, когда нагружение носит случайный характер, предусмотрено два варианта схематизации процесса нагружения. В первом варианте реальный процесс нагружения схематизируется гармоническим, эквивалентным реальному по статистическим характеристикам. Средний уровень гармонического процесса σ_m принимается равным математическому ожиданию случайного процесса $\overline{M}(\sigma)$, а амплитуда напряжений σ_a принимается равной $\sqrt{2D(\sigma)}$, где $D(\sigma)$ – дисперсия процесса.

Такой подход применим для узкополосных процессов. Во втором варианте реальный процесс заменяется эквивалентным по повреждаемости процессом. Этот эквивалентный процесс представляется базовым гармоническим и последовательностью выбросов (перегрузок) разного уровня. После воздействия растягивающей перегрузки скорость развития трещины замедляется. Чем выше перегрузка, тем больше эффект замедления. Учет воздействия перегрузок на скорость развития трещин является отличительной особенностью данного подхода, что позволяет повысить расчетные значения усталостного ресурса в несколько раз.

4.9.3. Пример расчета циклической прочности стыкового сварного соединения. Определение числа циклов до зарождения усталостной трещины. Соединение выполнено из стали марки 09Г2С t = 20 мм, 12-й категории поставки, содержит исходный подрез глубиной 2 мм, длиной 50 мм, радиусом закругления 0,5 мм и подвержено одноосному растяжению (рис.4.14). Для примера расчета выбраны две температуры эксплуатации Т = -70°С и Т = 20°С. Исходные данные для оценки числа циклов до зарождения усталостной трещины приведены в табл.4.12.

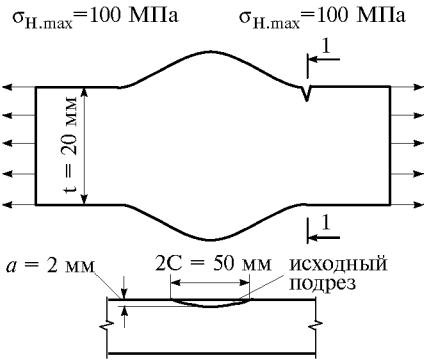


Рис.4.14. Расчетная схема стыкового сварного соединения

Таблица 4.12. Исходные данные

Параметр	Т °С	
	−70	+20
Предел текучести $\sigma_т$, МПа	438	340
Предел усталости σ_{-1}, МПа	260	196
Уровень остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{св}^{max} = 0{,}8$	0,8	0,8
Коэффициент релаксации сварочных напряжений $\sigma_{св}^{0}$	1	0,95
$\sigma_{н.min}$, МПа	0	0
$\sigma_{н.max}$, МПа	100	100
Коэффициент концентрации напряжений α_σ	3,65	3,65
То же, упругопластических деформаций K^*	3,65	3,8
Функция пластичности C, C_ψ^*, МПа	31710	34440

Коэффициент концентрации напряжений $\alpha_{\sigma н}$ определяется геометрическими характеристиками соединения, а также размерами подреза. Для соединения, при-

веденного на рис.4.14, коэффициент концентрации, обусловленный влиянием формы соединения, составляет α_σ^{Φ}=1,66. Коэффициент концентрации, обусловленный влиянием подреза $\alpha_\sigma^{\text{п}}$ находится по формуле

$$\alpha_\sigma^{\text{п}} = 1 + 0{,}58\sqrt{t_{\text{п}}/\rho} = 2{,}2\,.$$

В соответствии с табл.4.7 итоговый коэффициент концентрации $\alpha_\sigma = \alpha^{\Phi}_\sigma \cdot \alpha^{\text{п}}_\sigma$ = =1,66 · 2,2 = 3,65. Коэффициенты концентрации найдены по рис.4.11 и приведены в табл.4.12.

Подставляя исходные данные в формулы (4.29)—(4.30), получим число циклов, необходимых для зарождения усталостной трещины в стыковом сварном соединении при температуре T = 20 и T = –70°C. Расчетные значения $N_{э1}$, $N_{э2}$ представлены ниже:

число циклов	−70°C	+20°C
$N_{э1}$	10734	7678
$N_{э2}$	12891	12008

Определение усталостного ресурса на стадии развития усталостной трещины. Ресурс соединения на стадии развития усталостной трещины определяется числом циклов, соответствующих развитию усталостной трещины от исходного размера до критического. Исходные размеры зародившейся от подреза трещины зависят от размеров самого подреза: $a_0 = 2$ мм, $2c_0 = 50$ мм.

Определение предельных размеров трещин. В соответствии с формулой (4.33) определяем вторую критическую температуру хрупкости стали $T_{к2}$:

$n_2 = 5{,}5 + 0{,}11 \cdot 20 = 7{,}70;$

$m_2 = -188 + 0{,}825 \cdot 20 = -161{,}5;$

$T_{к2} = -161{,}5 + 1{,}66 \cdot 7{,}70 - 15 = -163{,}5$°C.

Для вычисления предельных размеров трещин при $T_э = -70$°C, находим коэффициенты A и C по формулам (4.32), (4.34) и табл.4.9:

$A = -163{,}5 + 80 = -83{,}5$°C;

$C = -163{,}5 + 15 + 10 + 10 + 70 = -58{,}6.$

Отношение $C/A = 0{,}71$, следовательно, предельная глубина поверхностной трещины при $T = -70$°C составит (4.31)

$$\lambda_к = 1 - \sqrt{1 - 0{,}71} = 0{,}46\,.$$

Для определения предельных размеров трещин при $T_э = 20$°C находим соответствующие значения коэффициентов A и C:

$A = -163{,}5 + 80 = -83{,}5$°C;

$C = -163{,}5 + 15 + 10 + 10 - 20 = -148{,}5$°C.

Отношение $C/A = 148{,}5/83{,}5 = 1{,}77 > 1$, следовательно, при T = 20°C в соединении могут быть допущены сквозные трещины.

Таким образом, определена предельная глубина трещин из условия возможности хрупкого разрушения. Однако этих условий недостаточно. В соответствии с (4.36) накладываются дополнительные условия на соотношение полуосей поверхностной трещины $q = a/c$. Окончательно расчетные предельные размеры трещины в стыковом сварном соединении при $T_э = -70$°C определяются системой неравенств (4.37)

$$\begin{cases} \lambda_p = \lambda_к / 2 = 0{,}23; \\ \lambda_p = 0{,}2\sqrt{\dfrac{5l_0 q_p}{t}} = 0{,}2\sqrt{\dfrac{5 \cdot 50 q_p}{20}} \cong 0{,}707\sqrt{q_p} \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \lambda_p = 0{,}23; \ a \le 4{,}6 \text{мм}; \\ q_p \ge 2\lambda_p^2; \ q_{p\ge} \dfrac{a_p^2}{200}. \end{cases}$$

При $T_э$ = 20°С $\lambda_к > 1$, поэтому в соединении допускаются сквозные трещины. При этом необходимо, чтобы длина поверхностной трещины $2c_p$ не превышала предельной длина сквозной трещины $2l_0$, т.е. условия (4.38). В данном примере $2l_0$ = 50 мм.

Расчет, выполненный по программе с применением ЭВМ, показал, что при $T_э$ = −70°С усталостный ресурс соединения на стадии распространения трещины от начальных размеров до критических составляет $N_p = 2{,}8 \cdot 10^5$ циклов; а при $T_э$ = 20°С $N_p = 1{,}03 \cdot 10^6$ циклов. Расчетное значение ресурса определяется делением полученных результатов на коэффициент запаса по числу циклов n_N = 10. Таким образом $N_p[T = -70°\text{C}] = 2{,}8 \cdot 10^4$ циклов и $N_p[T = +20°\text{C}] = 1{,}03 \cdot 10^5$ циклов.

Суммарная циклическая долговечность соединения определяется сложением расчетных значении N_p с полученными ранее расчетными значениями $N_з$ (см.выше). При $T_э$ = −70°С

$$N = N_з + N_р = 10734 + 28000 = 38734 \text{ (циклов);}$$

при $T_э$ = 20°С

$$N = N_з + N_р = 7678 + 103000 = 110678 \text{ (циклов).}$$

Результаты приведенного примера расчета показывают, что даже при изменении одного фактора (температуры) циклическая долговечность меняется почти в 3 раза. Меняется соотношение стадий зарождения и развития трещин, так при $T_э$ = –70°С стадия зарождения трещины $N_з$ составляет 27% ресурса, а при $T_э$ = = 20°С $N_з$ составляет всего около 7% общего ресурса, что связано как с изменением сопротивления зарождению и развитию трещин, так и с изменением предельных размеров трещин.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

A	–	площадь сечения брутто
A_n	–	площадь сечения нетто
$C_\psi^* = \dfrac{E}{4}\ln\dfrac{1}{1-\psi^T}$	–	функция, характеризующая пластические свойства стали при температуре T °С
E^T	–	модуль упругости материала при расчетной температуре
J_t	–	момент инерции кручения
J_w	–	секториальный момент инерции
K^*	–	коэффициент концентрации упругопластических деформаций
K_c	–	вязкость разрушения
ΔK	–	размах коэффициента интенсивности напряжений

N – предельная сила, число циклов нагружения

$N_з$ – число циклов до зарождения усталостной трещины

N_p – число циклов, за которое трещина развивается от исходных размеров до критических

R – коэффициент асимметрии цикла

$R_1 = 2100$ кг/см^2 – базовое расчетное сопротивление

R_S – расчетное сопротивление сдвигу

R_u – расчетное сопротивление по временному сопротивлению

R_y – расчетное сопротивление по пределу текучести

$T_{к2}$ – вторая критическая температура хрупкости для конструкции

$T_{с1}$ – критическая температура хрупкости стали для элементов со сквозными трещинами

$T_э$ – температура эксплуатации

$\Delta T_в$ – температурный запас вязкости

$\Delta T_{св}$, $\Delta T_{ст}$, $\Delta T_н$, $\Delta T_{кон}$ – смещения второй критической температуры хрупкости вследствие влияния остаточных сварочных напряжений, длительного воздействия повышенных температур, двуосности напряженного состояния, концентрации напряжений

$W_с$ – момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна

a – длина пластинки, глубина поверхностной трещины

b – ширина пластинки, полудлина поверхностной трещины

c – коэффициент для расчета на прочность с учетом пластических деформаций

e – эксцентриситет силы

f – начальная стрелка погиба

$\tilde{f} = f/l$ – безразмерная стрелка погиба

h – высота

i – радиус инерции сечения

$k_с$ – коэффициент влияния формы сечения

k_R – коэффициент влияния прочности стали

l – длина, пролет, полудлина сквозной трещины

$m = eA/W_с$ – относительный эксцентриситет

$m_{ef} = m\eta$ – приведенный относительный эксцентриситет

n – показатель степени

$r_т$ – радиус пластичности зоны у вершины трещины

t – толщина листа

v – скорость развития усталостной трещины

α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений

γ_c – коэффициент условий работы

$\gamma_н$ – коэффициент надежности по временному сопротивлению

ε – продольная относительная деформация

$\tilde{\varepsilon}$ – приведенная продольная деформация

η – коэффициент влияния формы сечения

$\lambda = l_{ef}/i$	–	гибкость
λ_{ef}	–	приведенная гибкость стержня сквозного сечения
ν	–	коэффициент Пуассона
σ	–	нормальное напряжение
$\tilde{\sigma}$	–	безразмерное нормальное напряжение
σ_a	–	амплитуда номинальных напряжений
σ_{max} ; σ_{min}	–	номинальные максимальные и минимальные напряжения в расчетном сечении
σ_a^*	–	амплитуда местных условных напряжений
σ_{-1}^{T}	–	предел выносливости стали
$\sigma_{-1}^{*,T}$	–	предел выносливости стали с учетом влияния остаточных сварочных напряжений
$\sigma_{max}^{св}$	–	уровень остаточных напряжений
$\sigma_{о.св}$	–	коэффициент снижения остаточных сварочных напряжений при циклическом нагружении
τ	–	касательное напряжение
τ_T	–	предел текучести на сдвиг
φ	–	коэффициент продольного изгиба
φ_e	–	коэффициент продольного изгиба при внецентренном сжатии
ψ^T	–	коэффициент поперечного сужения круглого образца при разрыве при заданной температуре T °С, %

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ржаницын А.Р.** Теория расчета строительных конструкций на надежность. –М.: Стройиздат, 1978.
2. СНиП П-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования.
3. **Грудев И.Д., Симон Н.Ю**. Расчет зон пластичности при сжатии первоначально-искривленного стержня. –Изв.ВУЗов. Строительство и архитектура, 1984, №7.
4. Eurocode №3: Design of steel structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings, V.1, Issue 3, Brussel, 1990.
5. Прочность, устойчивость, колебания. Т.3. –М: Машиностроение, 1968.
6. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП П-23-81*). –М.: ЦИТП, 1989.
7. **Бельский Г.Е., Одесский П.Д.** О едином подходе к использованию диаграмм работы строительных сталей. – Промышленное строительство. – 1984. – №7.
8. **Вольмир А.С.** Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967.
9. **Киселев В.А**. Строительная механика: Спец. курс. Динамика и устойчивость сооружений. –М.: Стройиздат, 1980.
10. **Конаков А.И.** Критическая жесткость элементов, раскрепляющих сжатые стержни. – Строительная механика и расчет сооружений. – №5, 1990.
11. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы.
12. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий.
13. Справочник по строительной механике корабля. Т.1. Общие понятия. Стержни. Стержневые системы и перекрытия. – Л.: Судостроение, 1982.

14. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический. – М.: Стройиздат, 1972.
15. **Конаков А. И.** К вопросу об учете влияния общей изогнутости элементов решетчатых металлоконструкций // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1980. – №1.
16. **Броуде Б.М**. Устойчивость пластинок в элементах стальных конструкций. – М.: Машиздат, 1949.
17. **Тимошенко С.П**. Устойчивость упругих систем. – М.: Гостеориздат, 1955.
18. **Броуде Б.М., Моисеев В.И**. Устойчивость прямоугольных пластинок с упругим защемлением продольных сторон // Строительная механика и расчет сооружений. – 1982. – №1.
19. **Моисеев В.И.** Расчет устойчивости пластинок в металлических конструкциях за пределом упругости на основе принципа равноустойчивости стержня и элементов поперечного сечения // Дис. д-ра техн. наук. – М.: 1989.
20. **Моисеев В.И., Бирюкова Г.Е**. Расчет устойчивости стенок внецентренносжатых стержней с учетом уровня напряженного состояния стержня // Строительная механика и расчет сооружений. – 1982. – №1.
21. **Моисеев В.И.** Расчет местной устойчивости при внецентренном сжатии с учетом равноустойчивости стержня и элементов его сечения // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1964, №11. – 13–18 с.
22. **Клыков Н.А.** Расчет характеристик сопротивления усталости сварных соединений. – М.: 1984.
23. СНиП III-18-75. Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1976.
24. Fatigue Hand Book off Shore Steel Structures. Tapir Publishers, Oslo, 1985.
25. **Пэрис П., Эрдоган Ф**. Критический анализ законов распространения трещины. Труды АОИМ, серия Д. – Т.М. 1963, №4.
26. **Newman T.C., Roju I.S**. An Empiricul Stress – intensity Factor Equation for the Surface Crack. End. Fract. Mech. 1981, v.15, №1–2, pp185–192.
27. **Партон В.З., Морозов Е.М.** Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985.
28. **Броек Д**. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980.
29. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. – М.: 1973.
30. **Злочевский А.Б., Островский А.В**. Определение коэффициентов интенсивности напряжений для поверхностных трещин методом сечений // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: Госстройиздат, 1986. –№5.
31. **Лейтес С**.Д. Устойчивость сжатых стальных стержней. – М.: Гостройиздат, 1954.
32. **Лейтес С.Д.** Справочник по определению свободных длин элементов стальных конструкций. – М.: Проектстальконструкция, 1967.
33. **Кархин В.А., Копельман Л.А**. Концентрация напряжений в сварных соединениях. – Сварочное производство. – 1976. – №2.
34. **Махутов Н.А.** Деформационные критерии и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: 1981.
35. **Школаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А.** Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. – М.: 1971.
36. **Злочевский А.Б**. Экспериментальные методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1983.
37. Методические указания. расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик сопротивления развитию трещины (трещиностойкости) при циклическом нагружении. – Львов: Изд. Б.И., 1979.

ГЛАВА 5

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

5.1. Динамические нагрузки и воздействия

5.1.1. Обзор динамических нагрузок на конструкции. Металлические конструкции могут подвергаться различным динамическим воздействиям. Причины их возникновения могут быть природными или искусственными. К природным воздействиям могут быть отнесены ветровые и сейсмические нагрузки. Искусственные нагрузки связаны с возведением и функционированием сооружения. Это технологические нагрузки, вызванные работой различного оборудования (вибрационные, ударные, подвижные), а также аварийные, связанные с ошибками при проектировании, возведении или эксплуатации объекта.

Вибрационные нагрузки на строительные конструкции связаны с широким применением высокопроизводительных машин и механизмов, а также транспортных систем. Вибрации являются причиной инициирования трещин и усталостных разрушений. Источниками интенсивных вибрационных нагрузок являются механизмы с конструктивно неуравновешенными элементами. Такие нагрузки (например, от работы поршневых насосов и компрессоров, вибрационных центрифуг, типографских машин и др.) могут быть рассчитаны и учтены при проектировании. Номинально уравновешенные механизмы (центрифуги, вентиляторы и т.п.) могут вызывать вибрации вследствие недостаточной их балансировки. Вибрации такого происхождения представляют случайный процесс, параметры которого устанавливают экспериментальными методами.

Наиболее важным случаем вибрационных нагрузок на конструкции промышленных зданий являются нагрузки периодического характера и в частном случае – гармонические. При сложных законах изменения вибрации во времени анализ воздействий проводят разложением в ряд Фурье.

Распространенной причиной технологических вибраций конструкций в цехах машиностроительных предприятий является работа машин с конструктивно неуравновешенными частями. Импульсные (ударные) нагрузки на конструкции создаются работой кузнечно-прессового и штамповочного оборудования. Особенностью таких нагрузок является их неоднократность и кратковременность воздействия каждого удара. При проектировании металлоконструкций, воспринимающих такие нагрузки, обеспечивается прочность от общего действия; местное действие ударной нагрузки, как правило, не рассматривается. Кроме того, при расчете конструкций на ударную нагрузку ограничивают амплитуды их скоростей и ускорений, безвредных для обслуживающего персонала. Ударные нагрузки возникают также в различных аварийных ситуациях (падение грузов на перекрытие, удары при работе кранов, устанавливающих грузы на конструкции и т.д.).

При оценке прочности и надежности объектов атомной энергетики рассматривают возможность ударного нагружения строительных конструкций от падения самолета и его частей при авиакатастрофе. При этом проверке подлежат: прочность строительных конструкций, примыкающих к вероятному месту удара (локальная прочность), конструкций, удаленных от места удара (глобальная прочность), а также общая устойчивость объекта к опрокидыванию. Согласно ПиН АЭ–5.6 (изд. Минатомэнерго, 1986) расчет ведется на падение самолета массой 20 т со скоростью 200 м/с. Заметим, что возникающий при таком ударе импульс эквивалентен взрыву заряда конденсированного взрывчатого вещества нормальной мощности с массой примерно 3 т.

Подвижные нагрузки на металлоконструкции создаются при перемещении грузов с высокими скоростями, когда время перемещения имеет порядок периода основного тона собственных колебаний конструкции. Однако на практике столь высокие скорости перемещения грузов или движения кранов неосуществимы. Более важной представляется нагрузка, действующая на подкрановые конструкции при торможении кранов, а также при наезде крана на буфера. Переменные нагрузки возникают также при подъеме краном груза и его перемещении в горизонтальной плоскости. При прохождении краном стыков рельс возникают вертикальные динамические нагрузки, которые учитываются коэффициентом толчков $K_т$. При движении крана со скоростями до 60, от 60 до 120 и свыше 120 м/мин коэффициент $K_т$ имеет значения соответственно 1,1; 1,2; 1,3.

Горизонтальная сила инерции учитывается коэффициентом перегрузки $n = 1{,}3$. Динамическая сила перекоса определяется по значениям ускорения крана и массы груза.

Наибольшую опасность представляют природные катастрофы (землетрясения, ураганы, лавины), а также сейсмовзрывные нагрузки при авариях на взрывоопасных производствах, хранилищах конденсированных и сжиженных взрывчатых материалов и энергоносителей. Аварии на различных объектах, связанные с производством, хранением и транспортировкой взрывчатых и других энергоемких материалов, вызывают необходимость обеспечения взрывобезопасности при проектировании соответствующих сооружений. Исключительно важной является и проблема обеспечения сейсмостойкости объектов.

Динамические (взрывные, сейсмические, ветровые, ударные, вибрационные) воздействия в общем случае – переменные по времени и пространству. Их особенностью является сложный характер взаимодействий с сооружениями, при которых вырабатываются нагрузки, вызывающие колебательные движения конструкций и массовые – инерционные силы.

Сложность решения динамических задач связана с необходимостью изучения эволюционного процесса нагружения и поведения конструкций, а также фиксации моментов времени и соответствующих экстремальных значений параметров движения и напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов. При интенсивных нагрузках следует учитывать отличные от статических динамические свойства конструкционных материалов, проявляющиеся в физической нелинейности зависимостей сопротивления и прочности от деформаций и скоростей напряжения и деформирования.

Динамические задачи формулируют в виде систем дифференциальных уравнений, замкнутых соотношениями, характеризующими механические свойства (реологию) материалов и грунтовой среды. Для решения уравнений обычно используют численные методы, реализуемые на ЭВМ. Для приближения к практике проектирования используют также различные приближенные (инженерные) методы, основанные на упрощенной схематизации сооружения. Наиболее широкое распространение в инженерной практике получил метод расчета на эквивалентные статические нагрузки. Это – статический расчет на экстремальное значение динамической (сейсмической) нагрузки, скорректированное системой коэффициентов (взаимодействия, динамичности и т.д.), полученных решением динамических задач и представленных в виде графиков или таблиц. Этот метод рекомендуется как один из основных в различных нормативных документах.

5.1.2. Эксплуатационные нагрузки. Из распространенных эксплуатационных нагрузок, передаваемых на металлоконструкции, наиболее важными являются ударные нагрузки и нагрузки от работающих машин и механизмов, вызывающих колебания (вибрации) конструкций. Общие вопросы динамики упругих конструкций

под действием ударных, подвижных и вибрационных нагрузок, а также методы гашения колебаний (виброизоляция) рассмотрены в [27].

Основные трудности проектирования металлоконструкций, подверженных эксплуатационным нагрузкам, состоят в подборе оптимального значения основной частоты собственных колебаний ω, определяемой жесткостью и массой конструкции. При ударах со скоростью V падающим грузом массой M_0 эквивалентная статическая нагрузка $P_э$ равна произведению ударного импульса $I = M_0 V$ на частоту ω. Отсюда видно, что снизить расчетную нагрузку от удара можно, уменьшив частоту, т.е. жесткость конструкции. Однако уменьшение жесткости вызовет возрастание амплитуды прогиба при колебаниях от удара. Поэтому при подборе сечений конструкций, подверженных ударным нагрузкам, нужно исходить из допустимого значения прогиба, не вызывающего остаточных деформаций.

Приведем простой пример расчета удара груза по центру шарнирно опертой балки пролетом l, погонной массой m, с изгибной жесткостью EI. Пренебрегая массой груза в сравнении с массой балки, запишем для нее формулы, определяющие основную частоту, изгибающий момент и прогиб в середине пролета:

$$\omega = \frac{\pi^2}{l^2}\sqrt{\frac{EI}{m}}\ ; \quad M = \frac{P_э l}{4}\ ; \quad Y = \frac{P_э l^3}{48EI}\ .$$

Подставляя выражение $P_э = \omega I$, запишем формулы для момента и прогиба:

$$M = \frac{\pi^2 I}{4l}\sqrt{\frac{EI}{m}}; \quad Y = \frac{\pi^2 I\, l}{48\sqrt{mEI}}\ .$$

Как видно, снижение жесткости EI конструкции в равной степени ведет к уменьшению внутренних усилий и возрастанию перемещений. Однако, если учесть, что с уменьшением жесткости убывает и масса m, то получим более интенсивное изменение прогиба.

Опасность от вибраций возникает при частотах вынуждающих колебаний, близких собственным частотам конструкции, в результате резонанса, поскольку обычно металлоконструкции представляют слабодемпфированные системы. Если не представляется возможным выбрать подходящую частоту, опасность резонанса можно снизить, применяя дополнительное демпфирование.

В противоположность ударным нагрузкам, при вибрациях внутренние усилия в конструкциях с увеличением их жесткости уменьшаются. Это обстоятельство следует учитывать, поскольку часто заранее не представляется возможным иметь полные данные об ожидаемых частотах вынуждающих колебаний, представляющих случайный процесс. Следует также иметь в виду, что болтовые и заклепочные соединения лучше воспринимают вибрационную нагрузку, чем сварные, что объясняется демпфированием за счет сил трения в соединяемых элементах.

Вибрационные нагрузки от машин периодического действия классифицируют по диапазонам частот [22]. К первой группе относят машины с частотой ≤ 400, ко второй 400–900 и к третьей – более 2000 циклов/мин. Поскольку собственные частоты вертикальных колебаний промышленных зданий находятся в диапазоне 8–20 Гц, т.е. 480–1200 циклов/мин, то ясно, что опасность могут представлять среднечастотные машины второй группы. Для горизонтальных колебаний зданий с собственными частотами до 2–3 Гц наиболее опасны низкочастотные машины первой группы. При проектировании используют также показатели машин по динамичности, оцениваемой амплитудой инерционных сил при колебаниях. Диапазон возможных перегрузок от машин, создающих вибрации, весьма широк – от единиц до 10 кН и более.

Методы расчета конструкций на действие вибрационных нагрузок от машин и механизмов, в том числе – виброизолированных, одиночных и групповой установок, с линейными и нелинейными характеристиками, в различных режимах (пусковом, рабочем и остановочном) приведены в [22, 27].

Подвижные нагрузки на металлоконструкции возникают от перемещений мостовых и подвесных кранов. При рабочих скоростях кранов нагрузки от них, как правило, представляют статические воздействия. Динамические нагрузки возникают при пуске, торможении и возможных ударах о буферные устройства. Значения нагрузок от кранов установлены ГОСТ 25546–82* и СНиП 2.01.07–85. Нормативное значение горизонтальной нагрузки, действующей вдоль кранового пути, при торможении моста электрического крана принимают 0,1 от полного нормативного значения вертикальной нагрузки на тормозные колеса. Горизонтальную тормозную нагрузку поперек кранового пути принимают: для кранов с гибким подвесом груза 0,05, с жестким подвесом 0,1 от суммы подъемной силы крана и веса тележки.

При расчете тупиковых упоров и их креплений учитывают ударную нагрузку согласно приложению 2 СНиП 2.01.07–85. Регламентированы также значения коэффициентов надежности для крановых нагрузок и коэффициентов динамичности для различных групп режимов работы кранов.

5.1.3. Пульсационные ветровые нагрузки и их статистические характеристики. Многие современные сооружения, обладающие большой гибкостью, легкостью, значительными периодами собственных колебаний и весьма слабым демпфированием, характеризуются высокой чувствительностью к воздействию турбулентного ветрового потока, возникающего в атмосфере. Так, для многих высотных сооружений ветровая нагрузка является решающей.

Давление ветра на сооружение принято разделять на среднюю (статическую) и пульсационную составляющие, вызываемые соответствующими составляющими скорости ветра. Для каждой точки пространства вводится понятие средней скорости, получаемой осреднением истинной скорости в интервале времени до 1 ч. Выбор времени осреднения в 1 ч обусловлен данными наблюдений, из которых следует, что в спектре скорости Ван-дер-Ховена, существует «провал» в интервале периодов от нескольких минут до нескольких часов, разделяющий синоптическую (низкочастотную) и турбулентную (высокочастотную) области. Если средние скорости ветра получены при осреднении на интервале времени τ, не равном 1 ч, то для пересчета можно использовать следующие данные:

τ, *c*	2	5	10	30	60	100	200	500	1000	3600
$\overline{v}_\tau / \overline{v}_0$	1,53	1,47	1,42	1,28	1,24	1,18	1,13	1,07	1,03	1

Здесь приведены приближенные значения отношений максимумов средних скоростей $\overline{v}_\tau$ при интервале осреднения τ к скорости $\overline{v}_0$ с часовым осреднением [18]. Эти показатели получены для открытой местности на высоте 10 м над поверхностью земли. В настоящее время принят 10-минутный интервал осреднения.

На основе анализа скоростей ветра на стандартной высоте анемометра (10 м) в условиях незащищенной местности по данным сети метеостанций бывш. СССР разработаны карты скоростей ветра различной обеспеченности. Расчетные значения средних скоростей для каждого из районов установлены на основе закона распределения вероятностей типа Вейбулла.

Нормативное давление ветра соответствует средней скорости, превышаемой в среднем один раз в пять лет. Расчетное давление ветра может быть получено умножением нормативного значения на коэффициент надежности по нагрузке (γ_f), причем в СНиП 2.01.07–85 принято $\gamma_f = 1{,}4$.

Распределение скоростей ветра по высоте характеризуется вертикальным профилем, описываемым степенным законом с показателем α в зависимости от типа местности (в зарубежных исследованиях показано, что при сильном ветре профили средних скоростей лучше описываются логарифмическим законом). В СНиП 2.01.07–85 приняты три типа местности, для которых $\alpha = 0{,}15;\ 0{,}2;\ 0{,}25$.

Разница между истинной и средней скоростями ветра в данной точке называется пульсационной составляющей скорости.

Турбулентное движение воздуха по своей природе является случайным процессом, и для его описания применяются статистические методы. Доказано, что в общем хорошее описание распределения скоростей в нижнем 300-метровом слое атмосферы дает нормальное (гауссово) распределение вероятностей, весьма удобной особенностью которого является то, что оно полностью определяется средним значением и средним квадратом (дисперсией) скорости, эквивалентным энергии процесса. Распределение этой энергии по частотам гармонических составляющих характеризуется спектральной плотностью процесса.

Спектры трех компонент скорости ветра при нейтральных условиях различаются в основном в низкочастотной области, а в инерционном интервале частот практически совпадают и достаточно точно описываются «законом – 5/3» Колмогорова.

При расчетах сооружений на пульсационное воздействие ветра обычно используется эмпирический спектр продольной компоненты пульсации скорости, полученный Давенпортом более чем из 100 отдельных спектров, построенных при сильных ветрах для высот от 10 до 150 м в различных местах земного шара

$$S_v(n) = \sigma_v^2 S_v^{\text{н}}(n) = \frac{2\sigma_v^2 u^2}{3n(1+u^2)^{4/3}} \ ,$$

где $\sigma_v = \overline{v}_0\sqrt{6k_0}$ – стандарт пульсации скорости; k_0 – коэффициент шероховатости подстилающей поверхности (для открытой местности $k_0 = 0{,}005$); $n = \omega/2\pi$ – частота, Гц; ω – круговая частота; $u = nL/\overline{v}_0$; $L = 1200$ м – масштаб длины.

Длина волны, соответствующая максимуму в спектре $S_v(n)$, равна $L_0 = \left(\overline{v}_0 / n\right)_{\max} = L/\sqrt{3} \approx 700$ м.

Экспериментальным данным лучше удовлетворяют спектры, зависящие от высоты z, типа Хино или Кеймала

$$S_v(n, \text{z}) = \frac{2\sigma_v^2 f}{3n(1+f)^{5/3}} \ ,$$

где $f = 50n\text{z}/v(\text{z})$.

Для вертикальной компоненты известны спектры Пановского и Мак–Кормика, а также Кеймала.

Для характеристики пространственной протяженности вихрей в турбулентном ветровом потоке используется функция пространственной корреляции $R_{12}(n)$, зависящая от расстояния между точками 1, 2.

На основе испытаний в аэродинамической трубе и в естественных условиях Давенпортом получено

$$R_{12}(n) = \exp\left(-c\frac{n}{\overline{v}}\left|\text{z}_2 - \text{z}_1\right|\right) ,$$

где $c \approx 6...8$ – по высоте; $c = 20$ – по горизонтали поперек потока.

Продольный масштаб турбулентности может быть выражен через длину волны, при которой спектральная плотность скорости имеет максимум

$$L_{vx} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{\overline{v}}{n}\right)_{\max}.$$

Практический интерес представляют поперечные горизонтальные (L_{vy}) и вертикальные (L_{vz}) масштабы турбулентности, которые по данным Шиотани и Дикона равны:

$$L_{vy} \approx (0{,}3...0{,}4)\, L_{vx};$$
$$L_{vz} \approx (0{,}5...0{,}6)\, L_{vx}.$$

Статистические характеристики скорости ветра используются для определения параметров ветровой нагрузки. Считается, что среднее значение аэродинамической силы в пульсирующем потоке такое же, как в установившемся потоке с той же средней скоростью. Зависимости между скоростью ветра, его давлением и реакцией сооружения практически являются линейными. Поскольку распределение вероятности скоростей подчиняется нормальному закону, то для давлений и реакции сооружения распределение вероятностей также будет нормальным.

Возмущающие силы, вызывающие колебания сооружения в турбулентном ветровом потоке, определяются путем линейного преобразования скорости потока с помощью аэродинамической передаточной функции, зависящей от соотношения размеров сооружения и турбулентных вихрей. При малых поперечных размерах сооружения по сравнению с размерами вихрей аэродинамическая передаточная функция близка к единице, и параметры воздействия выражаются через характеристики невозмущенного потока.

5.1.4. Сейсмические нагрузки и макросейсмические характеристики землетрясений. Расчетная интенсивность вызываемых землетрясениями сотрясений в баллах определяется по карте сейсмического районирования территории бывш. СССР при средней повторяемости один раз в 100, 1000 и 10000 лет. Сейсмические сотрясения на данной строительной площадке являются результатом прохождения сейсмических волн от возможных очаговых зон землетрясений, обычно связанных с активными тектоническими разломами. Каждое землетрясение представляет собой случайное событие, характеризуемое такими макросейсмическими параметрами как величина высвобожденной энергии, координаты эпицентра и глубина фокуса и т.п. В качестве меры высвобожденной энергии в очаге землетрясения принимается магнитуда M.

При произвольном расстоянии R (км) от эпицентра землетрясения магнитуда M может определяться через амплитуду a_0, мкм, поверхностной волны по формуле

$$M = \lg a_0 + 1{,}32 \lg R.$$

Энергия W, Дж, излучаемая в очаге землетрясения, имеет связь с магнитудой, характеризуемой по Гутенбергу и Рихтеру эмпирической формулой

$$\lg W = aM + b,$$

где $a = 1{,}8$; $b = 4$.

Существует связь между магнитудой M и длиной разрыва L, км, на поверхности, которая для данных по всему миру в среднем характеризуется зависимостью

$$M = 6{,}03 + 0{,}76 \lg L.$$

Повторяемость землетрясений определенной магнитуды по данным Гутенберга и Рихтера подчиняется экспоненциальному распределению

$$f(M) = a_1 e^{-b_1 M},$$

где $f(M)$ – функция плотности вероятности M в данном объеме земной коры; a_1, b_1 – региональные константы.

Для оценки частоты повторяемости сильных землетрясений в первом приближении обычно применяется модель Пуассона, в соответствии с которой значения магнитуд считаются независимыми и одинаково распределенными во времени. При этом вероятность появления N сильных землетрясений с магнитудой, превышающей M, в течение отрезка времени t определяется по формуле

$$P(N,t) = \frac{(\lambda t)^N}{N!} e^{-\lambda t} ,$$

где λ – среднее число землетрясений в единицу времени.

При оценке сейсмической опасности для малых объемов земной коры статистические данные часто противоречат пуассоновской модели. Однако при суперпозиции сотрясений от нескольких очагов, каждый из которых представляет собой источник потока землетрясений, не являющегося пуассоновским, в результате возникает поток сотрясений, приближающийся к пуассоновскому. Это позволяет получать приемлемую во многих случаях оценку сейсмического риска, не прибегая к более сложным моделям, описанным, например, в [17].

В сейсмологии принято использовать эмпирические зависимости, связывающие число N землетрясений класса K, отнесенных к одному году и площади 10000 км^2 или к площади некоторого района.

$$\lg N = a_2 K + b_2 ,$$

где $K = \lg W$ – энергетический класс землетрясения.

Например, для территории Кавказа $a_2 = 0{,}56$; $b_2 = 5{,}7$.

Интенсивность I сотрясений на строительной площадке, характеризуемая обычно по 12-балльной шкале, связана с магнитудой землетрясения, расстоянием до очага, его механизмом, грунтовыми условиями и т.п. При достаточном удалении от очага землетрясения получены регрессионные зависимости вида

$$I = a_3 + b_3 M - c_3 \lg \sqrt{R^2 + H^2} ,$$

где H – глубина очага, км; a_3, b_3, c_3 – региональные константы.

Например, для условий России (Н.В.Шебалин) $a_3 = 3$; $b_3 = 1{,}5$; $c_3 = 3{,}5$; для Мексики (Эстева) – $a_3 = 7{,}9$; $b_3 = 1{,}45$; $c_3 = 5{,}7$. Риск появления на строительной площадке сотрясения интенсивностью более I за некоторый период времени t определяется по формуле

$$\overline{R} = 1 - P[\, I(t) \le I],$$

где $P[\, I(t) \le I\,]$ – вероятность того, что за время t интенсивность сотрясения не превышает I.

Сейсмический риск оценивается с учетом сотрясений расчетной интенсивности, распространяющихся от всех возможных очагов землетрясений, расположенных вблизи строительной площадки.

В основу отечественных и зарубежных норм по строительству в сейсмических районах положена концепция максимальных сейсмических ускорений. Так, расчетной сейсмичности I, определяемой по карте сейсмического районирования, приписаны максимальные ускорения грунта $a_m = Ag$, где g – ускорение силы тяжести, $A = 0{,}1$; $0{,}2$; $0{,}4$ соответственно для 7, 8 и 9 баллов.

В нормативных документах США, Австралии и других подобная величина трактуется как эффективное максимальное ускорение, зависящее от магнитуды и механизма землетрясения, расстояния от очага, местных грунтовых условий и т.п. Выбор значения a_m, не имеющего точного статистического смысла, в качестве единственной меры интенсивности землетрясения затрудняет решение проблем нормирования нагрузок.

Для различных регионов имеются эмпирические зависимости, связывающие с магнитудой M и расстоянием R до очага землетрясения такие параметры воздействия, как максимальные сейсмические ускорения и скорости, продолжительность сильных колебаний и др. [17].

Для перехода от сейсмических ускорений грунта a_m к расчетным сейсмическим нагрузкам, приложенным к массам сооружения, в нормативных документах служит система коэффициентов, позволяющих в какой-то мере учитывать степень ответственности сооружения, распределение его масс и жесткостей, местные грунтовые условия, а также динамический эффект воздействия, связанный со спектром колебаний грунта. Такой подход широко распространен при расчете традиционных сооружений, для которых накоплен достаточный опыт проектирования и эксплуатации, позволяющий привязаться к принятой в нормах системе коэффициентов. Появление новых типов сооружений с повышенными требованиями к степени их надежности вызывает необходимость разработки адекватных моделей и методов расчета, с учетом наличия сейсмологической информации и последних достижений при решении инженерных задач. Вместе с тем основным средством для предварительных и проверочных расчетов остаются упрощенные методы, рекомендуемые нормативными документами.

Учитывая значительный разброс оценок максимумов сейсмических ускорений грунта и недостаточность единственного параметра для описания уровня воздействия, в качестве альтернативной его меры возможно принятие [12] модифицированной интенсивности Ариаса (кумулятивный квадрат ускорений)

$$I_A = \int_0^t a^2(t)dt ,$$

где $a(t)$ – зависимость ускорений грунта от времени (акселерограмма). Стандарт σ ускорения связан с I_A зависимостью $\sigma^2 = I_A / \bar{t}$, где $\bar{t}$ - продолжительность интенсивной фазы землетрясения.

По данным обработки множества записей двух горизонтальных компонент ускорений при сильных землетрясениях для аппроксимации может быть использована зависимость вида

$$I_A = a_4 e^{b_4 M - c_4 R} R^{c_5} ,$$

где a_4, b_4, c_4, c_5 – региональные константы.

При статистической обработке данных Лаи (1982) в диапазоне $15 < R < 100$ км и $5{,}6 < M < 7{,}2$ получено [12], что среднее значение $\bar{t}$ составляет около 9 с, а его стандарт σ_t более 6 с. Тогда $\bar{t} + \sigma_t \approx 15$ с. Близкие значения $\bar{t}$ приняты для нестационарных моделей сейсмического воздействия, предложенных в ряде работ.

При таком подходе сейсмическое воздействие характеризуется не случайным максимумом ускорения грунта при землетрясении, а более устойчивой характеристикой, связанной с энергетическим спектром и выраженной непосредственно через магнитуду землетрясения, расстояние до очага и продолжительность воздействия. Эта информация может быть непосредственно использована для прогнозирования вероятного уровня сейсмической реакции сооружения на основе статистической концепции.

5.1.5. Импульсные воздействия при взрывах. Взрыв представляет собой кратковременный процесс превращения вещества с выделением большого количества энергии в результате химической реакции (конденсированные, жидкие, газообразные взрывчатые вещества – ВВ) или ядерной (ядерные боеприпасы – ЯБ). К взрывам, вызванным физическими причинами, относят взрывы резервуаров со сжатым

(сжиженным) газом и паровых котлов. Опасность представляют хранилища ВВ, различные взрывоопасные производства и средства транспортировки взрывоопасных материалов, в том числе трубопроводные. Ниже приведены параметры нагрузок на сооружения при взрывах конденсированных (твердых) ВВ и газовоздушных смесей (ГВС), возникающих при утечках или авариях на хранилищах сжиженных газов.

Для описания взрыва (детонации) заряда промышленного ВВ используют схему точечного взрыва – мгновенного выделения энергии в точке, являющейся центром распространяющейся воздушной ударной волны. При взрыве над поверхностью грунта (воздушный взрыв) первоначально образуется сферическая ударная волна, а при взрыве на грунте (наземный) – полусферическая волна. В фиксированной точке пространства, от проходящей ударной волны давление P в воздухе изменяется со временем по закону, показанному на рис.5.1.

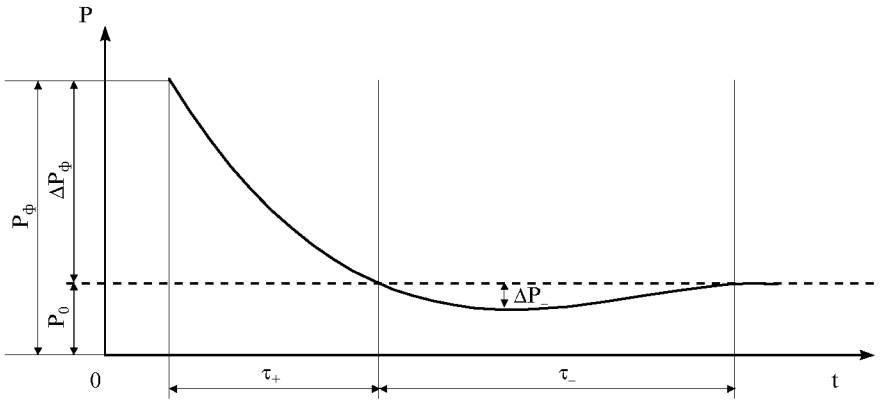


Рис.5.1. Изменение давления в ударной волне со временем в фиксированной точке

Основными параметрами ударной волны, определяющими ее разрушительное действие, являются избыточное давление на фронте волны $\Delta P_ф$, удельный импульс I и длительность фазы сжатия τ_+. Выбор метода расчета конструкции на взрывную нагрузку определяется отношением τ_+ к периоду релаксации конструкции τ_R (для упругой системы время τ_R равно ее периоду основного тона собственных колебаний T). При $K_R = \tau_+ / \tau_R \le 0{,}25$ действие взрыва определяется величиной импульса I, поскольку в данном случае $\Delta P_ф$ и вид функции $\Delta P(t)$ влияют несущественно. При $K_R > 0{,}25$ учитывают закон изменения давления в фазе сжатия.

Давление $\Delta P_ф$, МПа, на расстоянии r от взрыва заряда массой C определяется по формуле Садовского (при $0{,}9 \le R \le 10$; $R = r/q^{1/3}$, м/Кг$^{1/3}$)

$$\Delta P_ф = 0{,}84\sqrt[3]{q}/r + 0{,}27\sqrt[3]{q^2}/r^2 + 0{,}7\,q/r^3, \quad q = K_{вв}\eta C, \qquad (5.1)$$

где коэффициент $K_{вв}$ учитывает вид ВВ, а η – вид взрыва.

Для тротила (ТНТ) $K_{вв} = 1$; гексогена 1,31; ТЭНа 1,39; октогена 1,28; аммотола 80/20 0,98; дымного пороха 0,66; пентолита 50/50 (ТЭН/ТНТ) 1,13; оксиликвитов 0,9–1. Для воздушного взрыва $\eta = 1$. Для наземного взрыва и средних грунтов $\eta =$ 1,3, для плотных суглинков и глин $\eta = 1{,}6$. Для ядерных взрывов C представляет тротиловый эквивалент по ударной волне, равный половине полного эквивалента (калибра) ЯБ. Приводимые здесь формулы для параметров взрыва, перекрывают практический диапазон расчетных давлений $\Delta P_ф \cong 0{,}01...1.{,}4$ МПа [4,16].

Максимальное давление на поверхности земли при воздушном взрыве зависит от его высоты H, однако для небольших высот и при $r > H$ применима формула

(5.1). В этом случае, как и при наземном взрыве, ударная волна движется вдоль земной поверхности с вертикальным фронтом. Импульс ударной волны I, кПа·с, определяется по формуле

$$I = Aq^{\alpha} / r \quad (0{,}9 \le R \le 10), \tag{5.2}$$

где A, α – эмпирические коэффициенты. Для ВВ нормальной мощности (ТНТ) $A = 0{,}46$, $\alpha = 2/3$.

Изменение со временем избыточного давления в волне $\Delta P(t)$ в фазе сжатия определяют зависимостью

$$\Delta P(t) = \Delta P_{\text{ф}}(1 - t/\tau_{+})^{n}\ ,\ n = \Delta P_{\text{ф}}\tau_{+}/I - 1$$

или линейной аппроксимацией с эффективным временем фазы сжатия $\tau_{\text{э}}$

$$\Delta P(t) = \Delta P_{\text{ф}}(1 - t/\tau_{\text{э}})\ ,\ \tau_{\text{э}} = 2\tau_{+}/(n+1).$$

Время τ_{+}, с, определяется по формуле

$$\tau_{+} = 1{,}5 \cdot 10^{-3}\sqrt[6]{q}\sqrt{r}\ ,$$

а максимальное разрежение ΔP_{-}, МПа, и длительность этой фазы τ_{-}, с, – из выражений:

$$\Delta P_{-} = -0{,}03\sqrt[3]{q}/r\ ;$$

$$\tau_{-} = 0{,}013\sqrt[3]{q}\ .$$

Динамическое действие ударной волны определяется в значительной степени скоростным напором $P_{\text{ск}} = \dfrac{1}{2}\rho v^{2}$ (зависящим от плотности ρ и скорости частиц v воздуха в волне), изменение которого аппроксимируют в виде

$$P_{\text{ск}}(t) = P_{\text{скф}}(1 - t/\tau_{+\text{ск}})^{2}\exp(-\beta t/\tau_{+\text{ск}}).$$

Динамическая нагрузка от скоростного напора, определяется произведением $C_p P_{\text{ск}}$.

Скоростной напор $P_{\text{скф}}$ и температура $T_{\text{ф}}$ на фронте ударной волны, распространяющейся в воздухе при температуре T_0 и атмосферном давлении P_0, определяются по формулам

$$P_{\text{скф}} = 2{,}5\Delta P_{\text{ф}}\Delta P'_{\text{ф}} / (\Delta P'_{\text{ф}} + 7)\ ,\ \Delta P'_{\text{ф}} = \Delta P_{\text{ф}}/P_0\ ;$$

$$T_{\text{ф}} = T_0(\Delta P'_{\text{ф}} + 1)(\Delta P'_{\text{ф}} + 7) / (6\Delta P'_{\text{ф}} + 7)\ .$$

Длительность скоростного напора $\tau_{+\text{ск}}$ несколько превышает время τ_{+}, но часто принимают $\tau_{+\text{ск}} = \tau_{+}$. Параметр $\beta = 0{,}75 + 3{,}5\,\Delta P'_{\text{ф}}$ при $\Delta P'_{\text{ф}} \le 1$. Коэффициенты давления C_p получают экспериментально продувкой моделей объекта в аэродинамической трубе. Значения C_p для различных сооружений и объектов приведены в [4]. При расчетах на ударно-волновые нагрузки используют параметры международной стандартной атмосферы на уровне моря (МСА): $P_0 = 0{,}101325$ МПа, $\rho = 1{,}2249$ кг/м^3, $T_0 = 288{,}16$ К, $C_0 = \sqrt{1{,}4P_0 / \rho_0} = 340{,}31$ м/с.

Нагрузки на элементы сооружений вырабатываются в результате взаимодействия с ними воздушной ударной волны. Максимальное давление возникает при нормальном отражении волны от стен. При набегании ударной волны на объект произвольной формы он подвергается воздействию нестационарных давлений. Поле давлений зависит от параметров волны, характеристик объекта, размеров и ориентации элементов относительно фронта волны.

Различают две фазы взаимодействия ударной волны с объектом: дифракции и установившегося обтекания. В фазе дифракции малой длительности в процессе охвата объекта волной нагрузки существенно нестационарны. В связи с отражени-

ем максимальные давления на некоторые элементы значительно превышают давление $\Delta P_{\text{ф}}$, однако они быстро убывают, достигая величины, соответствующей второй фазе.

Максимальные давления в фазе дифракции возникают на плоских фронтальных элементах при нормальном отражении. Здесь давление скачком достигает величины, равной давлению отражения от твердой стенки $\Delta P_{\text{отр}}$

$$\Delta P_{\text{отр}} = 2\Delta P_{\text{ф}}(7 + 4P'_{\text{ф}}) / (7 + \Delta P'_{\text{ф}}).$$

Затем в процессе обтекания давление на фронтальной стенке уменьшается, а к концу фазы дифракция при $t = \tau_s$ становится квазистационарным. По мере продвижения фронта волны и погружения в нее объекта нагружается его остальная часть поверхности.

Длительность τ_s фазы дифракции волны на фронтальной стене замкнутого объекта определяется скоростью фронта, волны $D_{\text{ф}}$: (C_0 – скорость звука в воздухе)

$$D_{\text{ф}} = C_0\sqrt{1 - \tfrac{6}{7}\Delta P'_{\text{ф}}}$$

и величиной S', равной наименьшему из размеров стены h или $b/2$: $\tau_s = 3S'/D_{\text{ф}}$. Спад давления на передней стене обусловлен волнами разрежения, распространяющимися от ее ребер.

Нагрузки в фазе дифракции, действующие на верхнюю и боковые поверхности объекта, развиваются в процессе набегания ударной волны. Поэтому максимальные значения нагрузок запаздывают во времени тем больше, чем дальше от фронтальной стены объекта расположен элемент. Тыльная стена нагружается в последнюю очередь затекающей ударной волной от периферии к центру стены. Длительность фазы дифракции τ для объекта в целом имеет порядок $\tau = K_1 L / D_{\text{ф}}$, $K_1 = 3...5$, где L – размер объекта вдоль потока. Время $\tau_s < \tau$, так как дифракция на объекте заканчивается позже, чем на передней стене.

Фаза установившегося обтекания имеет длительность порядка фазы сжатия τ_+, и нагрузки здесь убывают постепенно. Давления ΔP_* на элементы объекта в этой фазе складываются из давления в волне ΔP и динамического давления скоростного напора, возникающего вследствие торможения частиц потока,

$$\Delta P_* = \Delta P + C_p P_{\text{ск}}.$$

Здесь вторым членом учтено давление скоростного напора, угасающего более интенсивно, чем статическое давление ΔP.

На рис.5.2 даны графики изменения средних давлений на элементы прямоугольных сооружений (закрытых и с проемами). При наличии проемов ударная волна затекает в сооружение, и расчетные давления на элементы равны разности внешнего и внутреннего давлений.

Для сооружений с проемами (до 30 % площади в передней и задней стенах), но без внутренних перегородок значение S' является средним расстоянием (для передней стены) от центра секции до края проема.

Возможные схематизации нагрузок, действующих на, различные элементы прямоугольных сооружений, приведены на рис.5.3, где под Q подразумевается избыточное давление или средняя нагрузка, изменяющиеся во времени. Данные по нагрузкам на сооружения криволинейных очертаний (арочные, цилиндрические и др.) приведены в [4,16].

Отметим также возможность аварийного взрыва заряда ВВ массой C, кг, на поверхности преграды (контактный взрыв). В этом случае полный импульс I_0 кН·с, переданный конструкции, равен $I_0 = K_{\text{ВВ}} A_1 C$, где для ВВ нормальной мощности (ТНТ) $A_1 = 1$ кН·с/кг.

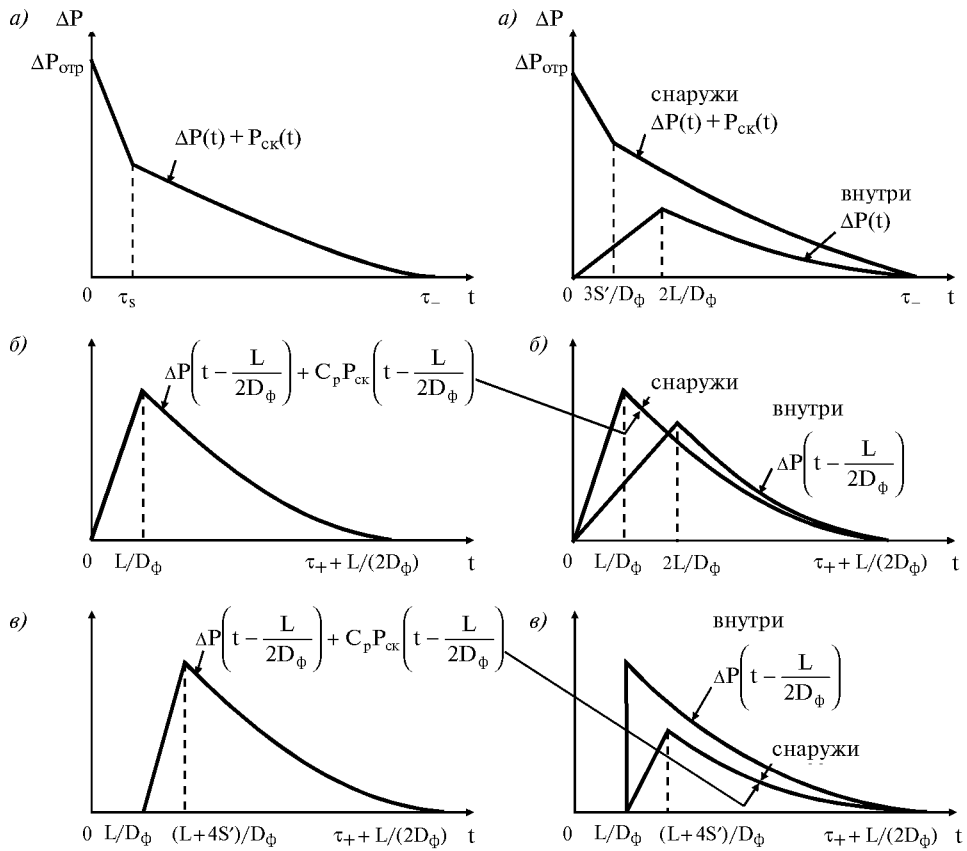


Рис.5.2. Нагрузки взаимодействия ударной волны с объектом прямоугольной формы закрытым (слева) и с проемами (справа)
а – фронтальная стена, *б* – боковые стены и крыша, *в* – тыльная стена

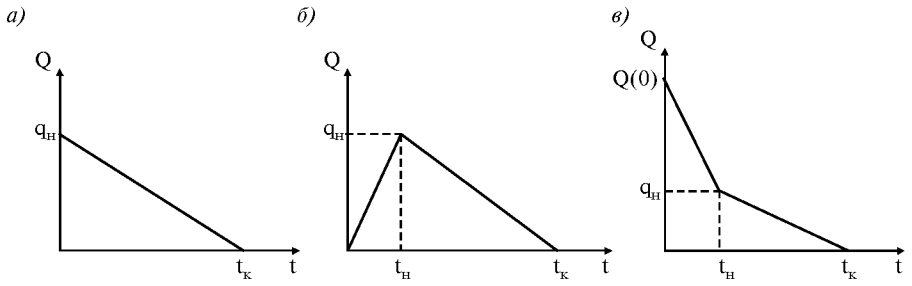


Рис.5.3. Схематизация нагрузок на элементы сооружений

Взрывы газопаровоздушных и пылевоздушных смесей образуют класс объемных взрывов. В зависимости от давления и температуры вещество может находиться в различных агрегатных состояниях. Сжиженные углеводородные газы, хлор, аммиак, фреоны, находящиеся под сверхатмосферным давлением при температуре выше или равной температуре окружающей среды в сосудах, резервуарах и другом технологическом оборудовании, являются перегретыми жидкостями. В теплоизолированных (изотермических) резервуарах при отрицательных температурах хранят сжиженные газы (метан, азот, кислород). Вещества другой группы (пропан, бутан,

аммиак, хлор) хранят в жидком состоянии под давлением в однослойных сосудах и резервуарах при температуре окружающей среды.

При полном разрушении емкостей с криогенными жидкостями и веществами с точкой кипения ниже, чем в окружающей среде (сжиженный нефтяной газ, пропан, бутан, аммиак, хлор), происходит их выброс в атмосферу, вскипание с быстрым испарением и образованием облаков газопаровоздушных смесей. Аварийное вскрытие емкостей с негорючей или горючей перегретыми жидкостями сопровождается взрывом и опасным действием осколков. Воспламенение облака газопаровоздушной смеси (ГПВС) происходит при наличии источника зажигания. При этом возможен переход дозвукового дефлаграционного режима с ускоряющимся пламенем к детонационному – сверхзвуковому.

При взрывах ГПВС в оболочках начальная скорость осколков разрушаемой оболочки

$$v_0 = \sqrt{2\beta Q_в} ,$$

где β – отношение масс газа и оболочки с ограничением на v_0 при $\beta \le (\gamma-1)/(\gamma+1)$; γ – показатель изентропы газа, $Q_в$ – теплота взрыва. Для смеси газов из трехатомных молекул $\gamma = 1{,}17$, двухатомных 1,28, смеси газов из двух- и трехатомных молекул $\gamma = 1{,}2...1{,}25$. Для аммиака $Q_в$ = 2,37, метана 2,76, пропана 2,80, этилена 3,01 МДж/кг.

При взрыве емкости под избыточным давлением $\Delta P = P - P_0$ инертного газа (смеси газов) с плотностью ρ

$$v_0 = \sqrt{2\beta Q} , \quad Q = \Delta P / \left(\rho(\gamma - 1)\right),$$

где Q – удельная энергия сжатого газа, P_0 – атмосферное давление. Если в емкости содержится взрывоопасный газ под давлением, в расчет вводят его суммарную энергию

$$v_0 = \sqrt{2\beta\left[Q_в + \Delta P / \left(\rho(\gamma - 1)\right)\right]},$$

причем плотность ρ определяется из уравнения изентропы

$$P/P_0 = (\rho/\rho_0)^{\gamma}.$$

5.1.6. Взрывные нагрузки при авариях на объектах химической и нефтехимической промышленности. Выброс в атмосферу горючих газов или паров в результате аварий на объектах промышленности или средствах транспортировки приводит к образованию облака газо- или паровоздушной смеси (ГПВС), которое может взорваться в силу различных случайных причин. Различают два основных типа взрыва – детонационный и дефлаграционный. Самым опасным типом взрыва, при котором в окружающем пространстве образуется интенсивная ударная волна, является детонационный взрыв [1, 16].

При наземном взрыве облако ГПВС приближенно представляют в виде полусферы, в центре которой инициируется взрыв (рис.5.4). Объем облака

$$V = \frac{22{,}4 \cdot 100 æ G}{\mu C_{стх}}, \qquad (5.2)$$

где G – масса выделившегося вещества, кг; æ – коэффициент, зависящий от вида вещества и способа хранения (для газов, хранящихся при атмосферном давлении æ = 1; для сжиженных под давлением газов æ = 0,5; для сжиженных путем охлаждения газов æ = 0,1; при растекании легковоспламеняющихся жидкостей æ = 0,02...0,07); μ – молекулярная масса вещества, кг; $C_{стх}$ – объемная концентрация стехиометрической смеси, %. Значения μ, $C_{стх}$ и другие характеристики наиболее распространенных ГПВС приведены в табл.5.1.

Таблица 5.1. Физико-химические характеристики наиболее распространенных газо- и паровоздушных смесей, образующихся при авариях в химической и нефтехимической промышленности [3]

Горючий компонент газовоздушной (ГВС) или паровоздушной смеси (ПВС)	Тип смеси	Химическая формула	Температура кипения, °С	Относительная молекулярная масса горючего, μ	$\rho_{стх}$, кг/м^3	$C_{стх}$, об. %	Удельная массовая энергия взрыва стехиометрической смеси, q_m, кДж/кг	Отношение теплоемкостей для продуктов взрыва стехиометрической смеси
Водород	ГВС	H_2	-252,8	2	0,933	29,59	3425	1,248
Метан	ГВС	CH_4	-161,58	16	1,232	9,45	2763	1,256
Этан	ГВС	C_2H_6	-88,63	30	1,250	5,66	2797	1,257
Пропан	ГВС	C_3H_8	-42,6	44	1,315	4,03	2801	1,257
Бутан	ГВС	C_4H_{10}	-0,5	58	1,328	3,13	2776	1,270
Пентан	ПВС	C_5H_{12}	36,7	72	1,340	2,56	2797	1,258
Гексан	ПВС	C_6H_{14}	68,74	86	1,340	2,16	2797	1,261
Ацетилен	ГВС	C_2H_2	-83,6	26	1,278	7,75	3387	1,259
Этилен	ГВС	C_2H_4	-103,7	28	1,285	6,54	3010	1,259
Пропилен	ГВС	C_3H_6	-47,75	42	1,314	4,46	2922	1,259
Бутилен	ГВС	C_4H_8	-6,25	56	1,329	3,38	2892	1,260
Дивинил	ГВС	C_4H_6	-4,47	54	1,330	3,68	2962	1,260
Бензол	ПВС	C_6H_6	80,1	78	1,350	2,84	2937	1,261
Толуол	ПВС	C_7H_8	110,63	92	1,350	2,23	2843	1,260
Ксилол	ПВС	C_6H_{10}	144,41	106	1,355	1,96	2830	1,259
Циклогексан	ПВС	C_6H_{12}	80,75	84	1,340	2,28	2797	1,248
Метанол	ПВС	CH_4O	64,7	32	1,300	12,3	2843	1,253
Этанол	ПВС	C_2H_6O	78,37	46	1,340	6,54	2804	1,256
Ацетон	ПВС	C_3H_6O	56,24	42	1,210	4,99	3112	1,259
Аммиак	ГВС	NH_3	-33,4	17	1,180	19,72	2365	1,248
Окись углерода	ГВС	CO	-191,5	28	1,280	29,59	2930	1,256
Диэтиловый эфир	ПВС	$C_4H_{10}O$	35,6	74	1,360	3,38	2840	1,261
Дихлорэтан	ПВС	$C_2H_4Cl_2$	57,3	99	1,490	6,54	2164	1,265
Винилхлорид	ГВС	C_2H_3Cl	13,9	62,5	1,400	7,75	2483	1,260
Бензин (авиационный)	ПВС	$C_{6\text{-}8}H_2$	От 53 до 174	93,6	1,350	2,1	2973	—

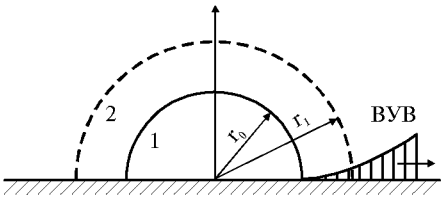


Рис.5.4. Схема детонационного взрыва ГПВС
1 – облако ГПВС, *2* – область разлета продуктов взрыва ($r_1 \approx 1{,}7r_0$)

Радиус полусферы, м,

$$r_0 = 0{,}78\sqrt[3]{V} .$$

Параметры детонационной волны, распространяющейся в облаке ГПВС, определяются по следующим формулам.

Избыточное давление на фронте

$$\Delta P_{\text{дет}} = 2(K-1)q_m - P_0 ,$$

где K – отношение теплоемкостей для продуктов взрыва; q_m – удельная массовая энергия (теплота сгорания) взрывчатой смеси стехиометрического состава, кДж/кг; P_0 – атмосферное давление (нормальное значение 101,3 кПа).

Скорость движения фронта детонационной волны, м/с

$$D_\partial = \sqrt{2000(K^2-1)q_m} .$$

При аппроксимации фазы сжатия треугольником эффективное время $\tau_э$, с, действия детонационной волны при $0{,}3 \le r/r_0 \le 1$

$$\tau_э \approx 1{,}96 \cdot 10^{-2} r_0 (r / r_0)^{0{,}27} / \sqrt{q_m} , \qquad (5.3)$$

где r – расстояние от центра облака ГПВС, м.

На вертикальную конструкцию, расположенную в пределах облака ГПВС, действует избыточное давление отражения, значение которого приблизительно в 2,5 раза больше давления на фронте детонационной волны [16], а эффективное время действия в 1,25 раза меньше, чем рассчитанное по формуле (5.3).

При достижении детонационной волной поверхности облака ГПВС в окружающем воздухе начинает распространяться воздушная ударная волна (ВУВ), давление на фронте которой определяется в зависимости от приведенного расстояния $\overline{R}$, м/кДж$^{1/3}$,

$$\overline{R} = r / \sqrt[3]{2E} \qquad (r > r_0) ,$$

где E – полная энергия, выделяющаяся при детонации ГПВС, кДж,

$$E = \rho_{\text{стх}} q_m V .$$

Избыточное давление на фронте ВУВ, кПа:

$$\Delta P_\Phi = 1{,}374 \cdot 10^{-2} / \overline{R}^{3{,}4} \qquad (0{,}043 \le \overline{R} \le 0{,}05);$$

$$\Delta P_\Phi = 2{,}265 / \overline{R}^{1{,}7} \qquad (0{,}05 < \overline{R} \le 0{,}186);$$

$$\Delta P_\Phi = 3{,}65 / \overline{R} + 0{,}53 / \overline{R}^2 + 0{,}059 / \overline{R}^3 \qquad (\overline{R} > 0{,}186) .$$

Продолжительность фазы сжатия τ_+, с, и удельный импульс ВУВ i, Н·с/м^2, определяются по формулам:

$$\tau_+ \approx 0{,}35 \cdot 10^{-3} \sqrt[6]{2E}\sqrt{r} ;$$

$$i \approx 0{,}36 \sqrt[3]{(2E)^2} / r .$$

Значение импульса при отражении от преграды увеличивается в среднем в 3 раза.

5.2. Механические характеристики металлических материалов при динамических воздействиях

5.2.1. Экспериментальные методы определения динамических характеристик материалов. В динамически нагруженных конструкциях металл находится в сложном напряженно-деформированном состоянии, изменяющемся во времени. Проявляющиеся при этом свойства могут существенно отличаться от статического поведения (при низких скоростях деформации). Для определения этих свойств используют специальное оборудование и малоинерционную аппаратуру, регистрирующую быстроизменяющиеся напряжения и деформации. Сложности при анализе динамических испытаний металлов возникают в связи с волновыми процессами в образцах, когда инерционные силы накладываются на внутренние усилия, характеризующие свойства материалов. Поэтому результаты опытов анализируют на основе теории волновых процессов с использованием предположительно описывающих реологию материалов математических моделей, выбор которых в значительной степени основывается на макроскопических экспериментальных фактах и интуиции.

Изучение механических свойств начинают со статических испытаний. Затем в динамических опытах устанавливают некоторые корректирующие коэффициенты или функции. Основным типом статического эксперимента является одномерный опыт, в котором образец подвергают осевой деформации растяжения. В опытах, проводимых при малых скоростях относительной деформации $\dot{\varepsilon} \sim 10^{-4}$ с$^{-1}$ и постоянной температуре, измеряют деформации и напряжения и строят соответствующую изотермическую зависимость (диаграмму) напряжение–деформация $\sigma - \varepsilon$. Зависимость касательных напряжений от угловой деформации строят на основе экспериментов на чистый сдвиг, реализуемых при кручении трубчатых образцов.

Аналогичные опыты в режиме циклических нагрузок проводят в целях построения полной (знакопеременной) диаграммы, а также для изучения малоцикловой усталости. В опытах на ползучесть к образцу прикладывают ступенчатую нагрузку и фиксируют накопление деформаций во времени. В опытах на релаксацию образец скачком деформируют на некоторую величину и фиксируют уменьшение напряжений во времени. Опыты на циклическое нагружение, ползучесть и релаксацию в определенных диапазонах являются неизотермическими, сопровождаются инерционными эффектами и относятся к динамическим.

Динамические эксперименты представляют интерес, если при быстром нагружении проявляются временны́е (скоростные) эффекты и поведение материала заметно отличается от статического. Динамические эксперименты более сложны, чем статические, и обычно проводятся по одномерной схеме в режимах постоянной скорости средней деформации, постоянной скорости напряжения, внезапно приложенного постоянного напряжения и удара. В таких экспериментах в образце реализуется сложное напряженное состояние, однако для рабочей части образца при обработке результатов испытаний принимают гипотезу однородности (гомогенности) деформаций и напряжений в направлении действия внешней нагрузки. Такую гипотезу используют почти во всех динамических испытаниях, которые называются квазистатическими (неволновыми). При постановке квазистатических экспериментов необходимо соблюдать требования, обеспечивающие достаточно реальный уровень гомогенности.

В опытах при постоянной скорости растяжения (сжатия) регистрируют изменения во времени t напряжений $\sigma(t)$ и деформаций $\varepsilon(t)$. Затем, исключая t, строят динамическую диаграмму σ–ε металла.

Для сталей с явно выраженной площадкой текучести, чувствительных к скорости деформации, регистрируют зависимость времени запаздывания динамической

текучести τ от напряжения, превышающего статический предел текучести $\sigma_т$. Такие эксперименты проводят в режиме внезапно приложенного постоянного напряжения $\sigma(t) = \text{const} > \sigma_т$.

Распространенным видом динамических испытаний образцов сталей в режиме постоянной скорости в диапазоне скоростей деформации до 20 $с^{-1}$, соответствующих условиям их работы в динамически нагруженных конструкциях, является их быстрое растяжение (сжатие) на разрывной машине при постоянной скорости v задающего привода машины, а также на копровой установке при скорости удара v достаточно большой массы.

Данные испытаний образцов представляют в зависимости от скорости средней относительной деформации $\dot{\varepsilon}$ на базе измерений L_0. Переход от скорости v к $\dot{\varepsilon}$ осуществляется с учетом жесткости нагружающей цепи

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L_0} - \lambda\dot{\sigma}, \quad \lambda = \frac{F_0}{L_0}\left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\right),$$

где L_0, F_0 – начальные рабочая длина, и площадь сечения образца; $\dot{\sigma}$ – скорость напряжения в рабочей части образца; K_1, K_2 – жесткость привода машины и жестких участков образца, работающих упруго.

При упругой работе образца $\dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon}$ и скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ будет

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L_0}\left(1 + \frac{K_0}{K_1} + \frac{K_0}{K_2}\right)^{-1}; \quad K_0 = \frac{F_0 E}{L_0}; \quad K_2 = \frac{F_2 E}{L_2},$$

где E – модуль Юнга; K_0 – жесткость рабочей части образца; F_2, L_2 – площадь сечения и суммарная длина жестких участков образца; K_1 – определяется согласно паспорту испытательной установки или из опыта.

В пластической стадии работы образца закон Гука неприменим и функция $\dot{\sigma}(t)$ неизвестна. Если предположить, что динамическая зависимость σ–ε при $v(t) = \text{const}$ соответствует диаграмме Прандтля (без деформационного упрочнения), то в пластической стадии $\dot{\sigma} = 0$ и $\dot{\varepsilon} = v / L_0$, т.е. упругая деформация всей системы заморожена, что приводит к увеличению скачком скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ при переходе через предел текучести. Отсюда видно, что режим постоянной скорости деформации строго неосуществим и, чтобы уменьшить влияние деформативности нагружающей цепи, следует применять образцы с возможно малой площадью сечения F_0.

Кроме того, в целях поддержания некоторой допустимой степени неоднородности напряжений и деформаций по длине образца, следует ограничить длину его рабочей части величиной [5]

$$L_0 \le \alpha_0 \sigma_т / (\dot{\varepsilon}_* \sqrt{E\rho}),$$

где $\sigma_т$ – статический предел текучести; $\dot{\varepsilon}_*$ – верхняя граница скорости деформации в серии опытов; ρ – плотность металла, α_0 – коэффициент, равный отношению рабочей скорости v захвата машины (или скорости удара копровой установки) к критической скорости $v_к = \sigma_т / \sqrt{\rho E}$, вызывающей начало пластического деформирования.

По данным [5] для надежной фиксации динамического предела текучести рекомендуется принимать $\alpha_0 = 0{,}04$.

Важное место в оценке сопротивляемости металла хрупкому разрушению занимают ударные испытания по оценке вязкости разрушения. Однако данные по ударной вязкости не могут быть явно включены в уравнения динамики сооружений и служат в основном для выбора материала конструкций, работающих под

воздействием динамических нагрузок. Подробный обзор методов динамических испытаний металлов с указаниями по выбору опытных образцов приведен в [4, 5].

5.2.2. Динамический предел текучести и запаздывание текучести конструкционных сталей. Динамические свойства малоуглеродистых конструкционных сталей (с явно выраженным пределом и площадкой текучести) существенно отличаются от статических, причем различие свойств наблюдается за пределом текучести (динамические и статические константы упругости практически неразличимы). Чувствительность к временны́м (скоростным) эффектам уменьшается с увеличением содержания углерода и других легирующих примесей. Высокопрочные легированные стали практически нечувствительны к скоростному нагружению и их динамическая диаграмма σ–ε весьма близка к статической.

Наиболее чувствителен к режиму нагружения и скорости $\dot{\varepsilon}$ динамический предел текучести и область малых деформаций диаграммы σ–ε. С ростом деформации ε влияние скорости уменьшается. Динамический предел текучести возрастает с увеличением скорости $\dot{\varepsilon}$ и уменьшается с ростом статического предела текучести $\sigma_т$. Для сталей с содержанием углерода до 0,8 % наблюдается динамическая площадка текучести, причем ее протяженность и напряжение текучести возрастают с увеличением скорости и понижением температуры.

Динамический предел текучести σ_d возникает вследствие задержки (запаздывания) текучести. Если к образцу внезапно приложить напряжение $\sigma(t) = \sigma_d > \sigma_т$, то пластическая деформация возникает через время запаздывания τ. Для напряжений, превышающих $\sigma_т$, логарифм времени запаздывания уменьшается линейно по мере роста как растягивающих, так и сжимающих напряжений. При $\sigma(t) = \sigma_т$ экспериментальные значения $\tau = t_*$ неустойчивы и определяются экстраполяцией $t_* = \tau\big|_{\sigma \to \sigma_т}$. Зависимость $\tau(\sigma_d)$ в режиме $\sigma(t) = \text{const}$ имеет вид

$$\tau = t_*(\sigma_d \,/\, \sigma_т)^{-\alpha}.$$

Режим постоянной скорости $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ (или $\dot{\sigma} = \text{const}$) является более мягким, и время τ, отсчитываемое от начала нагружения, будет бóльшим

$$\tau = t_*(\alpha + 1)(\sigma_d \,/\, \sigma_т)^{-\alpha}.$$

Отсюда можно получить зависимость динамического предела текучести от скоростей деформации $\dot{\varepsilon}$ и напряжения $\dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon}$ (для режима $\dot{\varepsilon}(t) = \text{const}$)

$$\sigma_d = \left[t_* \sigma_т^{\alpha}(\alpha + 1)\dot{\sigma}\right]^{1/(\alpha+1)} = \left[E t_* \sigma_т^{\alpha}(\alpha + 1)\dot{\varepsilon}\right]^{1/(\alpha+1)}.$$

Эти выражения можно представить в форме, соответствующей теории дислокаций,

$$\sigma_d \,/\, \sigma_т = (\dot{\sigma} \,/\, \dot{\sigma}_*)^n = (\dot{\varepsilon} \,/\, \dot{\varepsilon}_*)^n,$$

$$\dot{\sigma}_* = E\dot{\varepsilon}_* = n\sigma_т \,/\, t_*, \qquad n = 1 \,/\, (\alpha + 1).$$

Изучение механических свойств конструкционных сталей в динамике осложняется эффектом запаздывания текучести, влиянием технологических факторов, химического состава и, по-видимому, комбинациями на различных этапах нескольких дислокационных механизмов с различными активационными характеристиками.

В динамически нагруженных конструкциях скорости меняются. Кемпбеллом был предложен основанный на теории дислокаций интегральный критерий для вычисления динамического предела, текучести $\sigma_d = \sigma(\tau)$ в произвольном режиме изменения напряжений $\sigma(t)$

$$\int_0^{\tau} \left[\sigma(t) \,/\, \sigma_т\right]^{\alpha} dt = t_* \qquad \left(|\sigma(\tau)| > \sigma_т\right) \tag{5.4}$$

обобщающий приведенные выше соотношения для простых режимов нагружения. Материальные константы этого критерия α и t_* определяют в опытах при $\varepsilon^{\bullet} = \text{const}$ с использованием линейного соотношения $\lg\sigma(\tau) \sim \lg\varepsilon^{\bullet}$. Если экспериментальные точки σ_1, $\varepsilon^{\bullet}_1$; σ_2, $\varepsilon^{\bullet}_2$ лежат на прямой, то константы находят по формулам:

$$\alpha = -1 + 1 / n_0 , \quad n_0 = \lg(\sigma_2 / \sigma_1) / \lg(\varepsilon^{\bullet}_2 / \varepsilon^{\bullet}_1) ;$$

$$t_* = C\sigma_{\text{т}}^{\alpha} , \qquad \lg C = \frac{a}{n_0} - \lg\frac{E}{n_0} ,$$

$$a = \lg\left(\sigma_1 / (\varepsilon^{\bullet}_1)^{n_0}\right) .$$

На практике в связи с разбросом экспериментальных данных константы определяют корреляционным анализом – построением прямой регрессии.

Из опытов при $\sigma(t) = \text{const}$ формулы для констант следующие:

$$\alpha = -\lg(\tau / t_*) / \lg(\sigma / \sigma_{\text{т}}) , \quad t_* = \tau\big|_{\sigma \to \sigma_{\text{т}}} .$$

В качестве параметра $\sigma_{\text{т}}$ следует принимать нормативное сопротивление по пределу текучести по госстандартам и ТУ на сталь. По данным [19] при температуре 296 К для сталей Ст3 $\alpha = 11{,}7$; Ст45 $\alpha = 13{,}9$ (ИМАШ), для сталей с содержанием 0,09 С, 0,45 Mn $\alpha = 7{,}2...9{,}7$. Для сталей с различной термической обработкой, в которых содержание углерода 0,01–0,31 % и марганца 0,39–1,01 % при комнатной температуре $\alpha = 9...16$. Значение $t_* \sim 1$с. По данным [4] для арматурных сталей классов А-I, А-II, А-III соответственно $\alpha = 17$, 20, 25; $t_* = 0{,}895$, 0,50, 0,32 с.

В случае сложного напряженного состояния и при использовании условия текучести Мизеса функция $\sigma(\tau)$ в (5.4) имеет смысл изменяющейся со временем интенсивности напряжений в опасной точке конструкции. Критерий (5.4) хорошо согласуется с экспериментальными данными. Это объясняется тем, что данный критерий соответствует кинетической природе накопления микроповреждений в материалах и является следствием кинетического уравнения типа Аррениуса.

5.2.3. Модели динамического поведения металлов в прочностных расчетах. Для описания механических свойств металлов, слабо чувствительных к временным эффектам, применяют упругопластическую модель Рахматулина – нелинейную зависимость для простого напряженного состояния при нагружении $\sigma = F(\varepsilon)$ с ветвями линейно-упругой разгрузки и повторного нагружения (статический подход).

Д.Ф.Беллом указанная зависимость конкретизирована для ряда материалов в форме параболической зависимости

$$\sigma = \beta\sqrt{\varepsilon}$$

или

$$\sigma = (2 / 3)^{r/2}\mu(0)B_0(1 - T / T_m)\sqrt{\varepsilon} ,$$

где $\mu(T)$ – модуль сдвига; T – температура; $B_0 = 0{,}028$ – универсальная константа; $r = 1,2,3$ ... – индекс формы; T_m – температура плавления.

Постоянные упругости и коэффициенты параболы в этой формуле связаны набором квантованных значений как для различных материалов, так и для разных диапазонов работы каждого материала.

Для расчета конструкций, подверженных циклическим (сейсмическим, сейсмовзрывным) воздействиям, когда реализуется знакопеременная существенно нестационарная обратная пластичность, используют одну из моделей мейзинг-типа с гистерезисом – модель упругопластического материала Ромберга–Осгуда. В плоскости $\sigma - \varepsilon$ модель представляет синтез скелетной ветви 1 (рис.5.5) первичного нагружения, проходящей через начало координат

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_т} + \alpha_1 \left| \frac{\sigma}{\sigma_т} \right|^r \operatorname{sgn} \sigma \right), \qquad \varepsilon_0 = \frac{\sigma_т}{E(\alpha_1 + 1)} \tag{5.5}$$

и ветвей разгрузки и повторного нагружения

$$\varepsilon = \varepsilon_* + \varepsilon_0 \left[\frac{\sigma - \sigma_*}{\sigma_т} + 2\alpha_1 \left| \frac{\sigma - \sigma_*}{2\sigma_т} \right|^r \operatorname{sgn}(\sigma - \sigma_*) \right], \tag{5.6}$$

где $\sigma_т$ – условный предел текучести; $r > 1$ (целое число) и α_1 – константы материала; σ_* , ε_* – напряжение и деформация в начале разгрузки или повторного нагружения, причем секущая на начальном участке диаграммы согласована с законом Гука (при $\sigma = \sigma_т$ $\varepsilon = \sigma_т / E$).

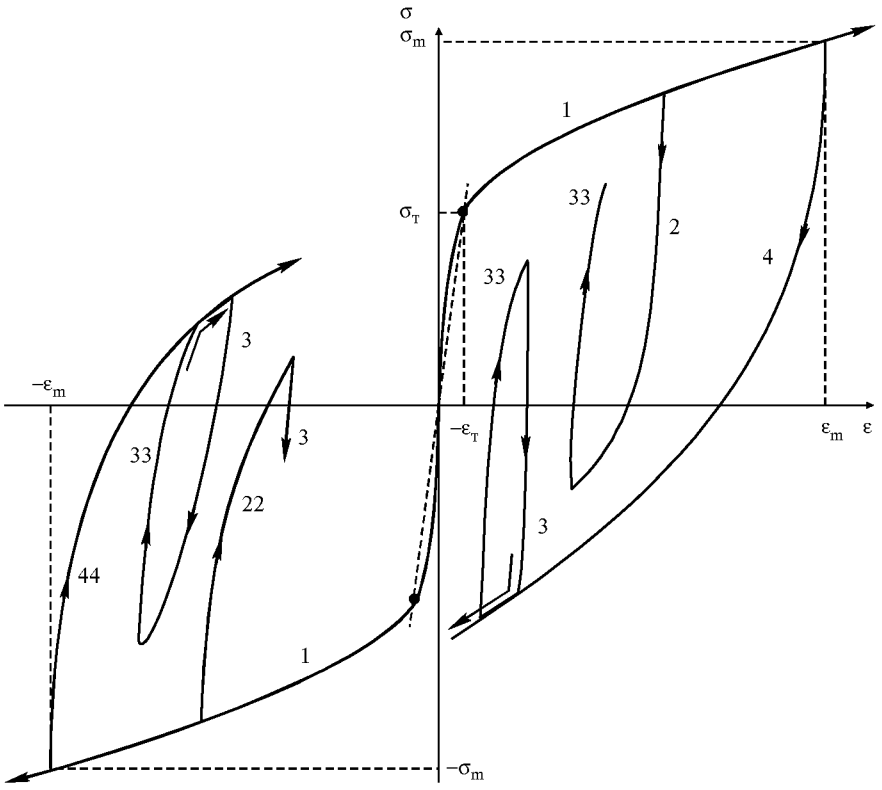


Рис.5.5. Диаграмма упругопластического материала Мейзинг-типа для циклического нагружения металлов

При $r \to \infty$ данная модель переходит в идеальную упругопластическую диаграмму Прандтля.

Опыт применения этой модели в динамических расчетах металлоконструкций при нестационарных циклических колебаниях показал недостаточность соотношений (5.5), (5.6), а именно модель дает нереальные выбросы напряжений и требует введения ряда логических операторов. При реализации данной модели в программах расчета конструкций в ЦНИИПСК использована более сложная процедура, схематически показанная на рис.5.5, где предусмотрены все возможные варианты изменения деформационного режима. Кривая *1* соответствует выражению (5.5), а предельные кривые *4* и *44* – формуле (5.6), и эти линии ограничивают область напряжений.

При разгрузках с ветви *1* используется формула (5.6) для ветвей *4* и *44* с фиксацией новых предельных кривых *4* и *44*, когда напряжение и деформация по модулю превысят соответственно значения σ_m и ε_m точек подвеса предельных кривых на предыдущем временном шаге. При повторных нагружениях и разгрузках производится усечение напряжений предельными кривыми *4* и *44*. Для кривых *3* и *33* также используется (5.6), но для точек подвеса внутри области допустимых напряжений. При численной реализации модели выражения (5.5), (5.6) аппроксимируются кубическими сплайнами и σ по значению ε определяется интерполяцией; значения констант $\alpha \sim 0{,}5$, $r = 7...8$.

Для металлов, чувствительных к временны́м эффектам, предлагались различные уравнения. Наиболее простой является динамическая диаграмма Прандтля с обратной текучестью рис.5.6. В отличие от статической диаграммы напряжения $\sigma_{т1}$, $\sigma_{т2}$ определяются с помощью критерия (5.4).

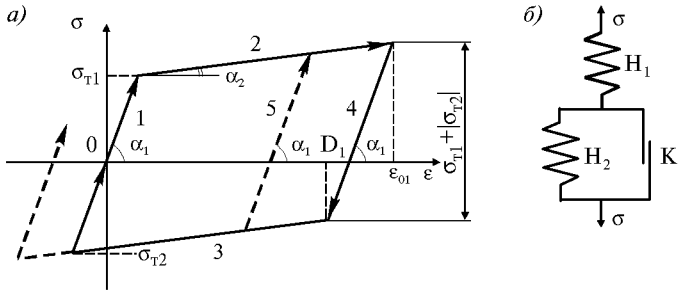


Рис.5.6. Диаграмма упругопластического материала с деформационным упрочнением и обратной текучестью с модулем упругости $E = \operatorname{arctg} \alpha_1$ и упрочнения $\nu = \operatorname{arctg} \alpha_2$ (*а*) и эквивалентная реологическая модель с жесткостями C_1 (для элемента Гука H_1), C_2 (H_2) и трением $\sigma_т$ (для элемента Кулона); $C_1 = E$, $CC_1/(C_1 + C_2) = \nu$, $\sigma_т = \sigma_{т1}$ (растяжение), $\sigma = \sigma_{т2}$ (сжатие) (*б*)

Более полно временны́е эффекты учитываются в моделях, содержащих зависимость напряжения от скорости деформации в пластической стадии. В.Соколовским и Л.Мальверном предложена формула такого типа

$$E\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} + \Phi\big(\sigma - \varphi(\varepsilon)\big) \qquad \big(\sigma - \varphi(\varepsilon) > 0\big)\,, \tag{5.7}$$

где $\varphi(\varepsilon)$ – статическая диаграмма σ–ε.

Более общий вариант предложен Н.Кристеску

$$f(\sigma, \varepsilon)\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} + g(\sigma, \varepsilon)\,.$$

Для конструкционных углеродистых и некоторых марок легированных сталей применяют формулу, соответствующую теории дислокаций

$$\sigma = D(\dot{\varepsilon})^n\,, \tag{5.8}$$

где D, n – константы, зависящие от диапазона деформаций и температуры.

В программах динамического расчета металлоконструкций, разработанных в ЦНИИПСК, используется модель вида (5.8), в которой напряжение зависит от скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}_p$ (рис.5.7)

$$\sigma = \sigma_т K\big(\dot{\varepsilon}_p\big)^n \;\text{ или }\; \sigma / \sigma_т = \big(\dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_*\big)^n \qquad \big(t > \tau,\ |\sigma| > \sigma_т\big) \tag{5.9}$$

где $n = 1/(\alpha + 1)$, $K = (E\varepsilon_* / (n\sigma_т))^n$, $\dot{\varepsilon}_* = \sigma_т n / (Et_*)$ – предельная скорость деформации при статическом пределе текучести.

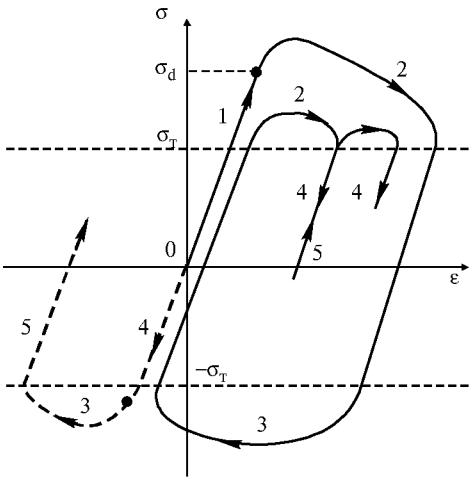


Рис.5.7. Упругопластическая дислокационная модель металлов, чувствительных к скорости деформации

1 – упругость, *2, 3* – упругопластическая стадия, *4, 5* – упругая разгрузка и повторное нагружение

Разделяя деформации на упругую $\varepsilon_e = \sigma / E$ и пластическую $\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e$ компоненты, получим зависимость, содержащую упругопластическую деформацию ε,

$$\dot{\sigma} = E\left[\dot{\varepsilon} - K_1\left(\frac{\sigma}{\sigma_т}\right)^{\alpha+1}\right],$$

$$K_1 = K^{-\alpha-1} = \sigma_т / \left[Et_*(\alpha+1)\right].$$

Интегрируя это уравнение на интервале временно́го шага Δt $(t_j \le t \le t_{j+1})$ и центрируя интеграл двухшаговым методом, получим соотношения для реализации в программах для ЭВМ:

$$\sigma_{j+1} - \sigma_j = \int_{t_j}^{t_{j+1}} f(\sigma, \dot{\varepsilon})dt\,,$$

$$\sigma_{j+1/2} = \sigma_j + \tfrac{1}{2}\Delta t f(\sigma_j, \dot{\varepsilon}_j)\,,$$

$$\sigma_{j+1} = \sigma_j + \Delta t f(\sigma_{j+1/2}, \dot{\varepsilon}_{j+1/2})\,,$$

причем $\dot{\varepsilon}_{j+1/2} = \tfrac{1}{2}(\dot{\varepsilon}_j + \dot{\varepsilon}_{j+1/2})$.

Эти формулы представляют явный двухшаговый метод второго порядка точности (типа Рунге–Кутта).

В программах для ЭВМ использованы формулы, в которых учитывается возможность реверсирования напряжений:

$$\sigma_{j+1/2} = \sigma_j + \tfrac{1}{2}\Delta tE\left[\dot{\varepsilon}_j - K_1\left(\left|\sigma_j\right| / \sigma_т\right)^{\alpha+1} \operatorname{sgn}\sigma_j\right],$$

$$\sigma_{j+1} = \sigma_j + \Delta tE\left[\dot{\varepsilon}_{j+1/2} - K_1\left(\left|\sigma_{j+1/2}\right| / \sigma_т\right)^{\alpha+1} \operatorname{sgn}\sigma_{j+1/2}\right]$$

Сопоставив формулу (5.9) о уравнением (5.7), можно определить при $|\sigma| \ge \sigma_т$ вид функции Ф. Для случая $\varphi(\varepsilon) = \sigma_т$, обозначив $\chi = \sigma - \sigma_т$, получим

$$\Phi(\chi) = \frac{\sigma_т}{t_*(\alpha+1)}(1 + \chi / \sigma_т)^{\alpha+1} \qquad (\chi \ge 0)\,. \tag{5.10}$$

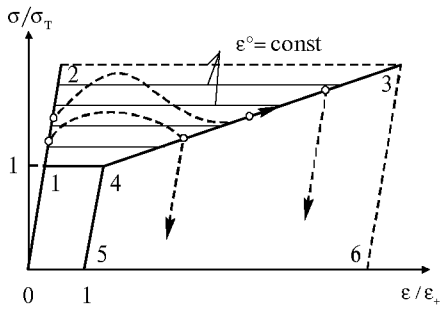


Рис.5.8. Диаграмма σ ~ ε стали, чувствительной к скорости деформации, с деформационным упрочнением

Чтобы учесть динамический предел текучести σ_d, ограничение для (5.10) следует заменить на $\chi \ge \chi_0$, где $\chi_0 = \sigma_d - \sigma_т$.

Полная система соотношений для упругопластической модели, в которой учитывается упругая стадия, динамический предел текучести, скоростные эффекты в пластической стадии и деформационное упрочнение, формулируется следующим образом [4, 8].

В упругой стадии на линии *02* (рис.5.8) сталь рассматривается как линейно-упругий материал, подчиняющийся закону Гука

(при условии)

$$\sigma = E\varepsilon_e \quad \left\{\int_0^t \left[\sigma(\xi) / \sigma_т\right]^{\alpha} d\xi \equiv A(t) < t_*\right\}. \tag{5.11}$$

В пластической стадии (область – *1234*), возникающей при $t = \tau$ по условию

$$A(\tau) = t_* , \quad |\sigma(\tau)| > \sigma_т ,$$

принимается закон деформирования (5.9)

$$\sigma / \sigma_т = K(\dot{\varepsilon}_p)^n \quad \left(A(t) > t_* , \ |\sigma| > \sigma_т , \ \varepsilon_p < \varepsilon_p^*\right) ,$$

где $K = \left[(\alpha + 1)Et_* / \sigma_т\right]^n$, $n = 1 / (\alpha + 1)$, т.е. при $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ получаем набор динамических диаграмм Прандтля.

Закон динамического упрочнения при нагружении ($\dot{\sigma} > 0$, линия *43*) принимается в линейном виде

$$\sigma = \sigma_т + \left(\varepsilon - \varepsilon_+ - \sigma_т / E\right)æ$$

$$\left(|\sigma| > \sigma_т, \ \varepsilon_p \equiv \varepsilon_p^* > \varepsilon_+\right).$$

Деформации в этом выражении соответствуют протяженности динамических площадок текучести ε_p^* в режиме $\dot{\varepsilon} = \text{const}$, наименьшая из которых ε_+ – есть протяженность статической площадки; æ – модуль упрочнения.

Момент времени $t = \theta$ перехода к упрочнению ($\dot{\sigma}(\theta) > 0$) или к разгрузке с линии упрощения ($\dot{\sigma}(\theta) \le 0$) фиксируется условием

$$\varepsilon_p(\theta) = \varepsilon_p^*(\theta) .$$

Разгрузка с уровня $\sigma_т$ и с линии упрочнения и повторные нагружения в областях *0145* и *5436* даются законом Гука (5.11) и выражениями:

$$\dot{\varepsilon}_p = 0 , \quad \left(\varepsilon_p^*\right)^{\cdot} = 0 .$$

Скорости упругопластических деформаций определяются по формулам

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_p ; \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \left(\varepsilon_p^*\right)^{\cdot} .$$

5.3. Расчет конструкций. Общие принципы

5.3.1. Методы расчета по упругой стадии. Расчет на динамические нагрузки выполняют с учетом начальных статических напряжений $\sigma_{нач}$. При этом независимый расчет на статику и динамику с суммированием деформаций и внутренних усилий справедлив при упругой работе конструкции, если сумма эквивалентных напряжений $\sigma_{сум}$ от статической $\sigma_{нач}$ и динамической σ нагрузок в опасных точках конструкции не превысит динамический предел текучести σ_d , т.е. $\sigma_{сум} = \sigma_{нач} + \sigma < \sigma_d$. При $\sigma_{нач} < 0{,}2\sigma_т$ динамический расчет обычно ведут без учета начальных напряжений.

В инженерных динамических расчетах применяют методы приведения реальной конструкции к системе с конечным числом n степеней свободы. Для получения соответствующей системы n уравнений движения можно использовать уравнение Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial K}{\partial \dot{y}_j} - \frac{\partial}{\partial y_j}(K - U) = Q_j - \frac{\partial F}{\partial \dot{y}_j} ,$$

где y_j – обобщенные координаты системы; K, U – кинетическая и потенциальная энергии; Q_j – обобщенная нагрузка; F – диссипативная функция Релея; j = = 1,2,3...n; точка сверху означает производную по времени t.

Другой метод приведения – Бубнова–Галеркина, согласно которому решение дифференциального уравнения в частных производных

$$L(v) = q \tag{5.12}$$

разыскивается в виде линейной комбинации

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} T_i X_i \ , \tag{5.13}$$

где L – дифференциальный оператор; X_i – некоторые функции, принадлежащие полной системе и удовлетворяющие граничным условиям задачи.

Подставив (5.13) в (5.12) $L\left(\sum_{i=1}^{\infty} T_i X_i\right) - q = 0$, запишем систему уравнений, удовлетворяющую исходному уравнению, благодаря полноте системы функций X_i :

$$\int_0^l \left[\left(\sum_{i=1}^{\infty} T_i X_i\right) - q\right] X_j dx = 0 \, .$$

На практике используют ограниченное число членов ряда или один член. В последнем случае приходят к уравнению движения осциллятора – системы с одной степенью свободы. Получим, для примера, одночленное приближение для однопролетной балки, работающей в упругой стадии, из уравнения технической теории изгиба

$$\prod\left[y(x,t)\right] \equiv EIy^{\mathrm{IV}} + my^{\cdot\cdot} - q(t) = 0 \ , \tag{5.14}$$

положив

$$y(x,t) = y_0(t)X(x) \ , \quad X(x) = X_q(x) \,/\, X_q(x_0) \tag{5.15}$$

где m – погонная масса; x_0 – координата точки приведения (совмещенная, с центром пролета); $X_q(x)$ – базисная функция, которую берут по статической форме изгиба балки, загруженной равномерной нагрузкой некоторой интенсивности $q_{\text{н}}$, т.е, $X_q(x)$ – есть решение уравнения статического изгиба $EIX_q^{\mathrm{IV}} = q_{\text{н}}$ и статический прогиб в точке приведения $y_q = X_q(x_0)$; $(*)^{\mathrm{IV}} = \partial^4(*) \,/\, \partial x^4$; $(*)^{\cdot\cdot} = \partial^2(*) \,/\, \partial t^2$.

Подставив (5.15) в (5.14), умножив на $X(x)$ и проинтегрировав по пролету l

$$\int_0^l \prod\left[y(x,t)\right] X(x)dx = 0 \, ,$$

получим обыкновенное дифференциальное уравнение (индекс < 0 > опущен, $(*)^{\cdot} = d(*) \,/\, dt$:

$$y^{\cdot\cdot} + \omega^2 y = Q \ ; \quad Q = \omega^2 q(t) \,/\, (q_{\text{н}} \,/\, y_q), \tag{5.16}$$

$$\omega^2 = \frac{q_{\text{н}} \,/\, y_q}{K_1}, \quad K_1 = \int_0^l \left[X(x)\right]^2 dx \,/\, \int_0^l X(x)dx,$$

для которого следует задать начальные условия $y(0) = y_0$, $y^{\cdot}(0) = v_0$.

Здесь ω – аналог основной частоты собственных колебаний, а значения $q_{\text{н}}/y_q$ и K_1 имеют смысл жесткости упругой системы и коэффициента приведения нагрузки-массы.

При расчетах на сейсмические и вибрационные воздействия следует учитывать демпфирующие свойства конструкций. В этих целях в уравнение (5.16) вводят вязкость ν. При использовании гипотезы вязкого демпфирования Фойгта получаем

$$y^{\cdot\cdot} + 2\nu y^{\cdot} + \omega^2 y = Q(t) \, . \tag{5.17}$$

Функцию y(t) представляют в виде суммы $y = y_1 + y_2$, где y_1 – свободные колебания, зависящие от начальных условий, y_2 – вынужденные колебания от нагрузки Q. Решение уравнения (5.17) для слабо демпфированной системы ($\nu << \omega$):

$$\left.\begin{aligned} & y = A\exp(-\nu t)\sin(\omega_\nu t + \varphi_0) + \frac{1}{m\omega_\nu}\int_0^t Q(\xi)\exp(-\nu(t-\xi))\sin\omega_\nu(t-\xi)d\xi \\ & A^2 = y_0^2 + (\nu y_0 + v_0)^2 / \omega_\nu^2 ; \qquad \operatorname{tg}\varphi_0 = \omega_\nu y_0 / (\nu y_0 + v_0) ; \\ & \omega_\nu^2 = \omega^2 - \nu^2 ; \qquad \omega^2 = C / m ; \qquad C = q_н / (K_1 y_q) . \end{aligned}\right\} \quad (5.18)$$

Для сложных нагрузок $Q(t)$ решение обычно получают численным методом с учетом возможного перехода на режим свободных колебаний после окончания действия нагрузки.

Вводя безразмерные переменные $D \equiv y/y_q$, $S \equiv \omega t$, получим безразмерную форму уравнения движения $\left((*)^{\cdot} = d(*)/dS\right)$:

$$D^{\cdot\cdot} + 2\beta D^{\cdot} + D = P(S) , \qquad P = q / q_н \quad (5.19)$$

с начальными условиями: при $S = 0$ $\quad D = y_0 / y_q$, $\quad D^{\cdot} = v_0 / (\omega y_q)$.

Здесь $\beta = \nu/\omega = \delta/\pi$ – относительное демпфирование; δ – логарифмический декремент колебаний.

Функция $D(S)$ называется функцией динамичности, а ее максимум – коэффициентом динамичности $K_д \equiv D_{max} = y_{max}/y_q$. С помощью коэффициента $K_д$ динамический расчет конструкций сводится к статическому на действие эквивалентной статической нагрузки

$$q_{экв} = K_д q_н . \quad (5.20)$$

Зависимость $K_д$ от безразмерных параметров задачи называется ударным спектром смещения. Для упругих систем с одной степенью свободы спектры внутренних усилий (реакций), деформаций и смещений совпадают. Спектры $K_д$ получают решением (5.19) при варьировании безразмерных параметров, число которых зависит только от типа нагрузки. На рис.5.9–5.11 приведены спектры для трех основных типов импульсных нагрузок.

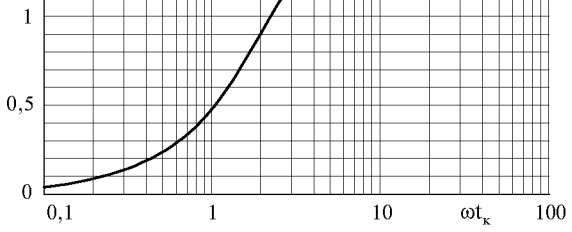


Рис.5.9. Ударный спектр для упругой системы и треугольного импульса с вертикальным фронтом по рис.5.3,*а*

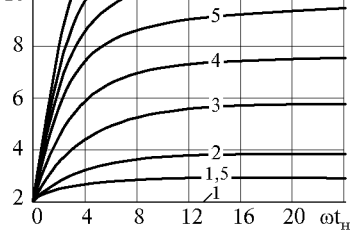


Рис.5.10. Ударный спектр для упругой системы и нагрузки с фазой дифракции по рис.5.3,*в* при $t_к \to \infty$ ($Ф = Q(0)/q_н$)

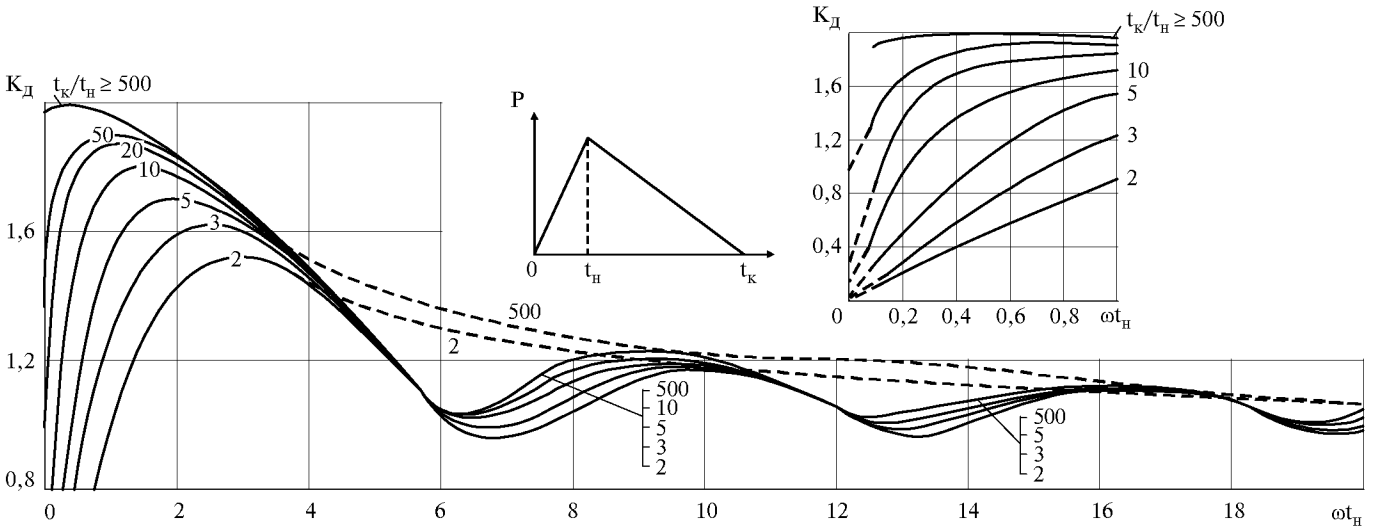


Рис.5.11. Ударный спектр для упругой системы и треугольного импульса с линейным наростанием нагрузки по рис.5.3,*б* (штриховые линии – огибающие для значений $t_к / t_н = 2$ и 500)

При коротких взрывных нагрузках ($\omega\tau_э < 0{,}25$) их форма слабо влияет на эффект воздействия, эквивалентная статическая нагрузка определяется по формуле ($t_к = \tau_э$)

$$q_{экв} = I\omega\xi, \tag{5.21}$$

$$I = \int_0^{\tau_э} q(t)dt\,, \quad \xi = \sin(\omega\tau_э / 2) / (\omega\tau_э / 2) \le 1$$

и с некоторым запасом можно принять $\xi = 1$, что соответствует мгновенному импульсу.

Нагрузку по рис.5.3,*в* иногда можно представить начальным мгновенным импульсом I и следующей за ним нагрузкой треугольной формы $P = q/q_н = 1 - S/S_к$ ($S_к = \omega t_к$). Соответствующий ударный спектр приведен на рис.5.12, где кроме коэффициентов $K_д$ даны зависимости времени достижения максимума смещения $S_m = \omega t_m$ от параметров $S_к$ и $D_0^{\cdot} = \omega I / q_н$.

При упругом расчете конструкций как систем с конечным числом степеней свободы широко используют метод Фурье, реализуемый численными методами. Для динамического расчета, сложных плоских и пространственных стержневых систем, работающих в упругой стадии, используют различные программные комплексы для ЭВМ. Для статического и динамического расчета металлоконструкций может быть рекомендована программа РАСК ЦНИИПСК, позволяющая вести расчет систем произвольной конфигурации, содержащих до нескольких тысяч элементов.

В ЦНИИПСК разработан программный комплекс SHOCK [7] для динамического упругого расчета металлоконструкций каркасов промышленных зданий и сооружений на действие взрывных, сейсмических и вибрационных нагрузок. Объект схематизируют плоской стержневой системой произвольной формы с большим числом узлов на пересечении стержней, где сосредоточена инерция системы.

Стержни удлиняются, а также деформируются по статической форме изгиба от линейных и угловых перемещений своих концов (узловых масс). Соотношения между внутренними усилиями в стержнях и деформациями приняты по методу перемещений строительной механики. Линейные и угловые смещения узлов определяются решением дифференциальных уравнений движения узлов с учетом их инерции вращения методом Рунге–Кутта четвертого порядка.

Статические начальные усилия и деформации от собственного веса вычисляются решением нелинейных уравнений движения (с обнуленными ускорениями) методом итераций. В результате расчета выдаются параметры движения, деформации и усилия в конструкции во времени, экстремумы этих функций, а также целевых функций, соответствующих эквивалентным напряжениям.

Уравнение (5.16) может быть записано с коэффициентами, представляющими приведенные параметры:

$$m_{пр}\,y^{\cdot\cdot} + K_{пр}y = P_{пр} \tag{5.22}$$

$$m_{пр} = \int_0^l m_x X^2(x)dx\,,\; K_{пр} = \int_0^l EI_x\left[X''(x)\right]^2 dx\,,$$

$$P_{пр}(t) = \int_0^l P_x(t)X(x)dx\,,$$

где $m_{пр}$, $K_{пр}$, $P_{пр}$ – приведенные масса, жесткость и нагрузка; m_x – погонная масса; P_x – нагрузка, изменяющаяся со временем; EI_x – изгибная жесткость; $X(x)$ – упругая линия от статического действия нагрузки P_x. Формула для приведенного импульса $I_{пр}$ аналогична формуле для $P_{пр}$.

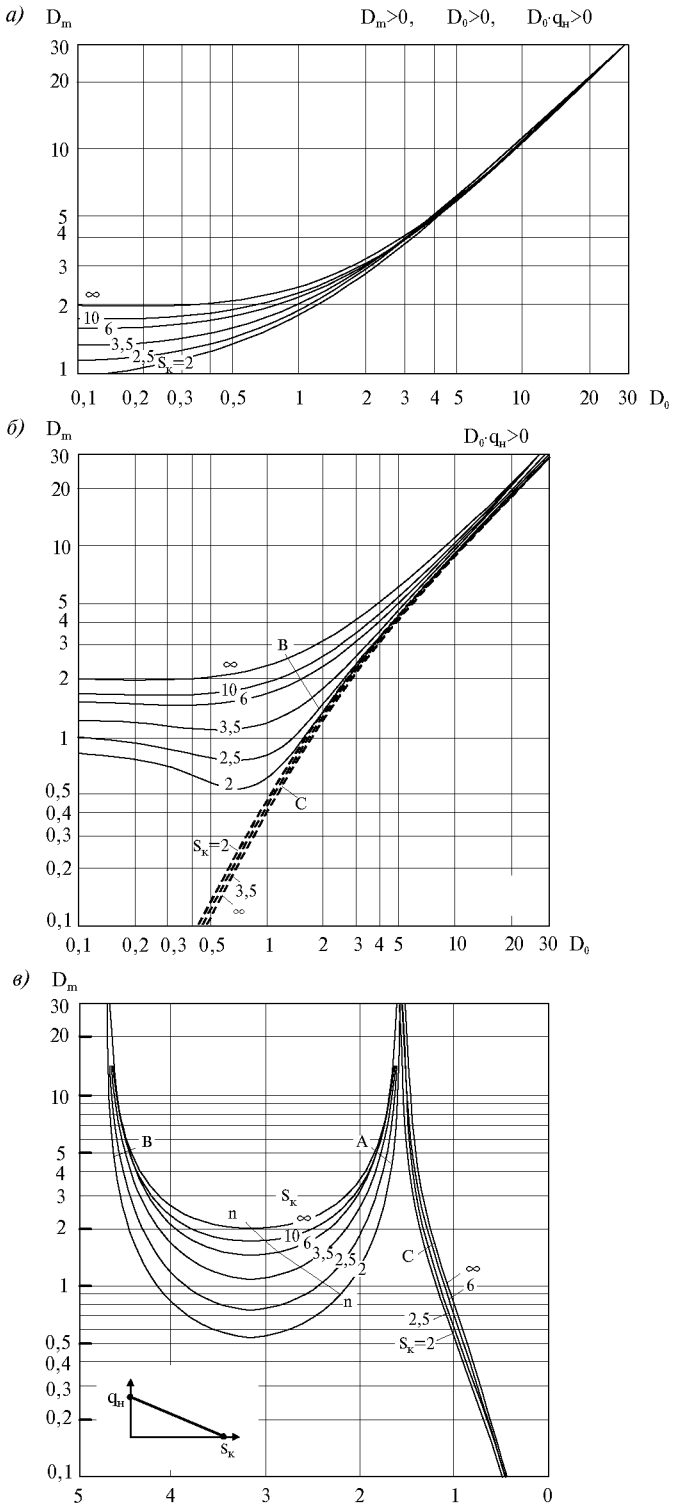


Рис.5.12. Ударный спектр и время $S_m = \omega t_m$ максимума деформации для упругой системы и нагрузки по рис.5.3,*а* в комбинации с мгновенным импульсом

Для однопролетных балок с равномерным распределением параметров по пролету приведенные величины имеют значения: при шарнирном опирании концов $m_{\text{пр}}=0{,}5m_x l$, $K_{\text{пр}}=49EI_x/l^3$, $P_{\text{пр}}=0{,}64P_x l$; при защемленных концах $m_{\text{пр}}=0{,}406m_x l$, $K_{\text{пр}}=246EI_x/l^3$, $P_{\text{пр}}=0{,}53P_x l$. При действии локальных (точечных) нагрузок P_0 принимают $P_{\text{пр}}=P_0$.

Для конструкций из высокопрочных сталей может быть учтена физическая нелинейность материала. В этом случае в уравнение (5.22) вместо линейного сопротивления $K_{\text{пр}}y$ можно ввести нелинейность вида $R(y)=K_{\text{пр}}y^n$. Для продолжительных ударноволновых нагрузок, моделируемых скачком давления $P(t)$ $=\text{const}$, пренебрегая вязким демпфированием, имеем

$$y_{\max}=\left[\frac{n+1}{K_{\text{пр}}}P_{\text{пр}}(t)\right]^{1/n},\quad R(y_m)=(n+1)P_{\text{пр}}(t)$$

а для мгновенного импульса $I_{\text{пр}}$: $y_{\max}=\left[\dfrac{n+1}{K_{\text{пр}}}\dfrac{I_{\text{пр}}^2}{2\text{m}_{\text{пр}}}\right]^{1/(n+1)}$.

5.3.2. Исчерпание упругого ресурса конструкций при интенсивных нагрузках. Исчерпание упругого ресурса элементов динамически нагруженных конструкций (появление пластических деформаций) лимитирует их несущую способность. Соотношения, приведенные в п.5.2.2, можно использовать для фиксации перехода к пластической стадии работы металлоконструкций из сталей, чувствительных к скорости деформации. Для упругоработающей конструкции как приведенной системы с одной степенью свободы запишем соотношение ($S\equiv\omega t$)

$$D=y(S)/y_q=\sigma_{ij}(S)/\sigma_{ijq},\qquad (5.23)$$

где σ_{ij} – тензор динамических напряжений в опасной точке; σ_{ijq} – тензор статических напряжений в этой точке от нагрузки $q_{\text{н}}$.

Если допустить, что исчерпание упругости контролируется одним из компонентов σ_{ij}, то (5.4) с учетом (5.23) запишется в безразмерной форме

$$\int_0^{S_1}D^{\alpha}(S)dS=\eta,\quad \eta=\omega t_*\eta_0^{\alpha},\quad \eta_0=\sigma_{\text{т}}/\left|\sigma_{ijq}\right|\quad \left(\left|D(S_1)\right|\ge\eta_0\right).\qquad (5.24)$$

В случае сложного напряженного состояния и при использовании условия текучести Мизеса функция $D(S)$ будет иметь смысл интенсивности напряжений в опасной точке, а σ_{ijq} – интенсивности напряжений в опасной точке от статической нагрузки $q_{\text{н}}$.

Таким образом, для конструкций как систем с одной степенью свободы исчерпание упругости определяет совместное решение двух уравнений (5.19) и (5.24), содержащих инварианты η, α, η_0 и параметры, характеризующие тип нагрузки, причем функция $D(S)$ не зависит от η_0 при $\left|D(S_1)\right|\ge\eta_0$. Отношение динамического предела текучести $\sigma_d=\sigma(S_1)$ к статическому $\sigma_{\text{т}}$ для простого напряженного состояния (например для условий работы полок двутавровых балок) определяется по формуле

$$\frac{\sigma(S_1)}{\sigma_{\text{т}}}=\frac{D_1}{\eta_0}=D_1\left(\frac{\omega t_*}{\eta}\right)^{1/\alpha}\ge 1,\qquad D_1\equiv D(S_1)=\frac{\sigma(S_1)}{\sigma_q}.\qquad (5.25)$$

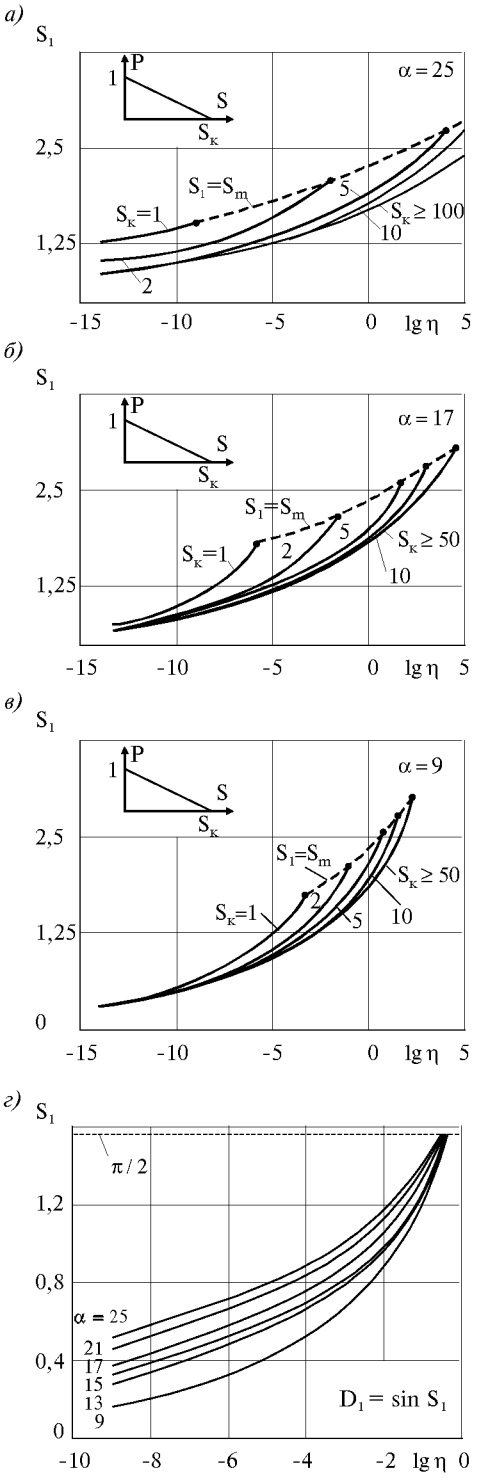


Рис.5.13. Зависимости $S_1(\eta,\ S_к)$ для балок под действием треугольной нагрузки (*а – в*) и мгновенного импульса (*г*)

На рис.5.13 приведены графики зависимостей S_1 от безразмерных параметров η и $S_к=\omega t_к$ для нагрузки по рис.5.3,*а* и мгновенного импульса. Значения D_1 для нагрузки (рис.5.3,*а*) можно вычислить по формуле

$$D_1 = 1 - \frac{S_1}{S_к} - \cos S_к + \frac{1}{S_к}\sin S_к$$

$$(0 < S \le S_к),$$

а для мгновенного импульса $D_1=\sin S_1$.

Для нагрузок по рис.5.3,*б,в* зависимости D_1 (η, $S_н$, Φ) приведены на рис.5.14 ($S_н=\omega t_н$).

При сравнительно низкой интенсивности нагрузки конструкция может сохранить упругость вплоть до максимальных значений прогибов $D=D_m$ ($D_m=D(S_m)$, $\dot{D}(S_m)=0$). При некоторой интенсивности нагрузки возможно совпадение времен $S_m=S_1$, т.е. исчерпание упругости в опасной точке произойдет при максимуме прогиба. Такое поведение конструкции является желательным, если в ней пластические деформации недопустимы (в связи с появлением при $S=S_1$ зон перегрузки, в которых $|\sigma|>\sigma_т$, незначительное накопление пластической деформации произойдет в процессе разгрузки с динамического предела текучести).

Условию оптимальности $S_1=S_m$ для каждого типа нагрузки соответствует зависимость $\eta(\alpha)$. Для ступенчатой нагрузки $P(t)=\text{const}$ ($S_1=\pi$, $D_1=D_m=2$, Γ – гамма-функция)

$$\eta = \sqrt{\pi}\,2^{\alpha}\Gamma\left(\alpha+\frac{1}{2}\right)/\,\Gamma(\alpha+1)\,,$$

и $\sigma(S_1)/\sigma_т$ можно получить из (5.25), подставив значения η, η_0 и $D_1=2$.

Оптимальное соотношение между η и α для мгновенного импульса ($S_1=\pi/2$, $D_1=D_m=1$)

$$\eta = \frac{1}{2}\sqrt{\pi}\,\Gamma\left(\frac{1}{2}\alpha+\frac{1}{2}\right)/\,\Gamma\left(\frac{1}{2}\alpha+1\right).$$

На рис.5.15 показаны функции $\eta(\alpha)$, $K(\alpha)$ для минимального динамического предела текучести σ_{dm} металла в конструкциях, причем для ступенчатой нагрузки и мгновенного импульса соответственно

$$K_{(1)} = \left(\sigma_{dm}/\sigma_{т}\right) / \left(\omega t_{*}\right)^{-1/\alpha} = 2\eta^{-1/\alpha}, K_{(2)} = \eta^{-1/\alpha}.$$

Зависимость напряжений σ_{dm} от параметров α и ωt_{*} приведена на рис.5.16.

Одновременное исчерпание упругости в нескольких, например в двух, опасных точках конструкции ($S_1 = S_2 \le S_m$) возможно при $\eta_1 = \eta_2 \le \eta_{*}$, $\alpha_1 = \alpha_2$, где η_{*} соответствует $S_1 = S_m$. Если $\eta_1 \ne \eta_2$ или $\alpha_1 \ne \alpha_2$, то исчерпание упругости будет неодновременным и, например, при $\alpha_1 = \alpha_2$ произойдет в опасной точке, для которой значение η будет меньшим.

5.3.3. Упругопластический расчет конструкций. Впервые динамический расчет конструкций с учетом пластических деформаций применен в 1943 г. А.А.Гвоздевым (жесткопластический метод) и в 1947 г. И.М.Рабиновичем (упругопластический метод). В этих работах использована диаграмма Прандтля, связывающая сопротивление системы с перемещением. Идеальная упругопластическая диаграмма Прандтля основана на соответствующей экспериментальной статической зависимости σ–ε для конструкционных сталей с явно выраженной площадкой текучести. Однако динамические диаграммы таких сталей чувствительны к скорости деформации и указанные методы нуждались в корректировке.

Полную несущую способность и запасы прочности динамически нагруженных конструкций устанавливают методами, в которых учитывают увеличение упругого ресурса и повышенное сопротивление неупругих деформаций в связи с влиянием временны́х (скоростных) эффектов на механические характеристики конструкционных сталей.

В работах [8, 9] предложен принципиально новый подход и метод расчета балочных конструкций из сталей и железобетона с учетом временны́х эффектов. Формулировка метода учитывает развитие зон перегрузки (сверх $\sigma_{т}$), пластичности и упрочнения, обусловленных запаздыванием дина-

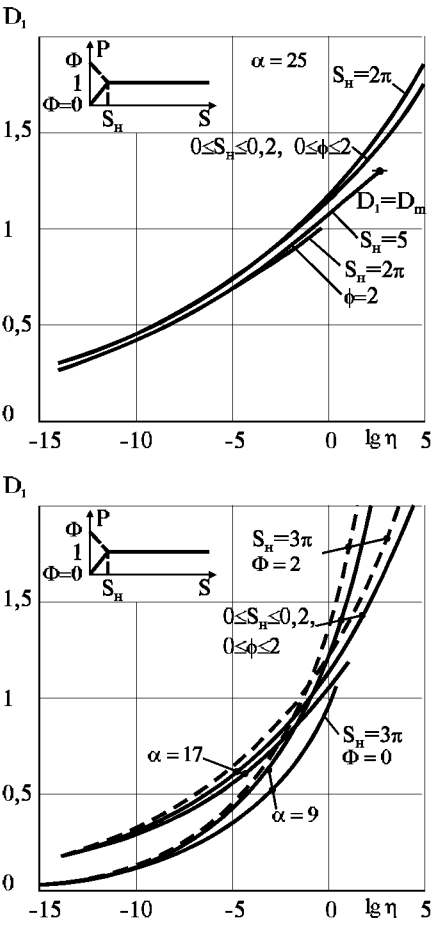


Рис.5.14. Зависимость $D_1(\eta, S_н, \Phi)$ для балок под действием нагрузок по рис.5.3,*в*. В интервале $0 < S < S_н = \omega t_н$ нагрузка при $\Phi = 0$ нарастает, а при $\Phi = 2$ убывает, а затем остается постоянной

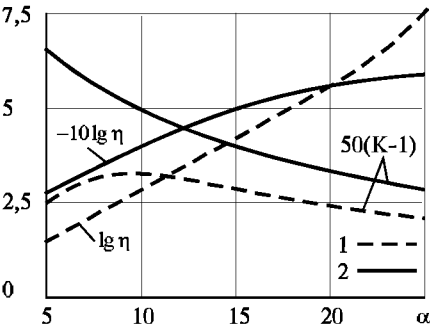


Рис.5.15. Зависимости $\eta(\alpha)$ и $K(\alpha)$ для минимального динамического предела текучести в конструкциях, нагруженных ступенчатой нагрузкой (*1*) и мгновенным импульсом (*2*). При значениях η, больших, чем дает график, конструкция работает упруго

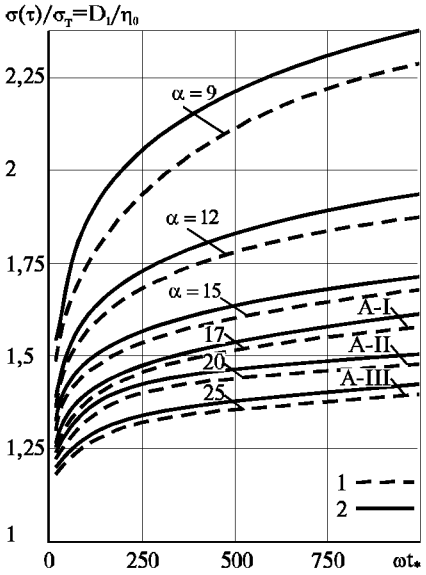


Рис.5.16. Зависимость минимального динамического предела текучести в конструкциях от ωt_* и α
1 – ступенчатая нагрузка, *2* – мгновенный импульс

мической текучести стали, а также достаточно реальные реологические соотношения, учитывающие нелинейную зависимость напряжений от скорости пластической деформации. Учет временны́х эффектов существенно усложняет расчет конструкций и ориентирован на применение ЭВМ [10, 16, 25, 29].

В инженерных приложениях используют некоторые упрощения указанного подхода. Одно из таких упрощений состоит в использовании динамической диаграммы Прандтля, отличающейся от аналогичной статической диаграммы $\sigma-\varepsilon$ тем, что напряжения за пределом упругости принимаются соответствующими динамическому пределу текучести. Для сталей с выраженным зубом текучести используют диаграмму $\sigma-\varepsilon$ с законом Гука до динамического предела текучести и постоянным уровнем напряжения, находящимся в пределах между значениями $\sigma_т$ и σ_d.

В рамках такого подхода решают уравнение движения нелинейного осциллятора

$$K_{mi}D^{\cdot\cdot} = \hat{P} - R - \mu D^{\cdot},$$

$$\hat{P} = P(S - S_p) + K_{mi}D_z^{\cdot\cdot}(S - S_z)$$

с начальными условиями при $S = 0$ $D = 0$, $D^{\cdot} = D_0^{\cdot}$, где K_{mi} – переменный коэффициент приведения, нагрузки-массы; $P = q / q_н$ – безразмерная нагрузка; $R = r / r_q$ – безразмерное сопротивление системы; $r_q = K_1 y_q$, $S = \omega t$ $\left(\omega^2 = K_1/m_1\right)$; K_1, m_1 – приведенные жесткость и масса упругой системы; μ – коэффициент демпфирования; $\hat{P}$ – суммарная нагрузка; $D_z^{\cdot\cdot} = d^2D_z / dS^2$ – кинематическое возмущение (безразмерное ускорение вибрации или сейсмики опорных точек конструкции); S_p, S_z – безразмерное время начала действия нагрузки и ускорения.

Приведение различных конструкций к системе с одной степенью свободы на различных (*i*-тых) стадиях работы производится, например, методом Бубнова–Галеркина с учетом форм движения, соответствующих упругой линии и схемам образования «пластических шарниров». Так, принимают, что при переходе однопролетной шарнирно опертой балки из упругой стадии работы в пластическую, упругая линия $X(x)$ переходит в схему $\Psi(x)$ двух линейных элементов, соединенных в середине пролета пластическим шарниром, в котором действует предельный пластический момент. При этом требование сохранения кинетической энергии приводит к скачку скорости приведенной системы

$$K_{v1} = \frac{D^{\cdot}(+S_1)}{D^{\cdot}(-S_1)} = \left(\int_0^l X^2(x)dx \Big/ \int_0^l \Psi^2(x)dx\right)^{1/2} = 1{,}23\,.$$

Для этой балки $K_{m1}=1$, $K_{m2}=0{,}8468$, $\eta_0=\sigma_т/\sigma_q=8\sigma_т W/(q_н l^2)$, $\omega^2=97{,}54EI/(ml^4)$, m – погонная масса, W – момент сопротивления сечения.

Однопролетная балка, защемленная по концам, при интенсивной нагрузке может работать в трех стадиях: упругой, упругопластической (пластические шарниры у опор) и пластической (пластический шарнир в пролете). Отношения скоростей приведенной системы при переходе на вторую стадию $K_{v1}=0{,}898$, а на третью $K_{v2}=1{,}23$; $K_{m1}=1$, $K_{m2}=1{,}033$, $K_{m3}=0{,}875$, $\eta_{0i}=\sigma_т/\sigma_{qi}$, $\eta_{01}=12\sigma_т W/(q_н l^2)$, $\eta_{02}=2\eta_{01}$, $\omega^2=504EI/(ml^4)$.

Сопротивление системы (с односторонней текучестью) аппроксимируют трехзвенной диаграммой с ветвью разгрузки $R_p=D-D^*+R^*$, параллельной первому звену,

$$R=\begin{cases} D & (0\le D<D_1)\\ C_2D+(1-C_2)D_1 & (D_1\le D<D_2)\\ C_3D+(1-C_2)D_1+(C_2-C_3)D_2 & (D\ge D_2)\ , \end{cases}$$

где D_i – переходные значения безразмерного перемещения; R^*, D^* – сопротивление и перемещение в момент перехода к разгрузке; C_i – угловые коэффициенты, определяемые через размерные жесткости деформируемой системы $C_i=K_i/K_1$ ($i=1$, 2, 3, $C_1=1$).

Переход с одной стадии на другую осуществляется с помощью соотношений $D_1=D(S_1)$, $D_2=D(S_2)$:

$$\int_0^{S_1}|D(S)|^{\alpha}ds=\eta_1 \qquad \left(|R(S_1)|>\eta_{01}\right)$$

$$\int_{S_1}^{S_2}|N_2(S)|^{\alpha}ds=\eta_2-\eta_1 \qquad \left(|N_2(S_2)|>\eta_{02}\right)$$

$$N_2(S)=(1-B_2)D_1+B_2D(S),\quad B_2=\beta_2/\beta_1,\quad \beta_1=\sigma_q/y_q\ ,$$

$$\eta_i=\eta_{0i}^{\alpha}\omega t_*\ ,\quad \eta_{0i}=\sigma_т/\sigma_{q1}\ ,$$

где β_i – модули перехода от эквивалентных напряжений в опасных точках к прогибу, индекс i у параметров S_i, K_i, K_{vi}, D_i соответствует концу i-й стадии, σ_{qi} – эквивалентное напряжение в опасной точке для i-й стадии.

Подробное описание методов получения параметров приведения различных конструкций дано в [4]. На основании выписанных выше соотношений на ЭВМ проведены расчеты по определению ударных спектров $K_д$ упругопластических балок. При использовании графиков $K_д$ на рис.5.17–5.20 значения D_1 для соответствующих нагрузок и параметров α, η берутся из графиков, приведенных на рис.5.13, 5.14.

На рис.5.21 приведены графики коэффициента динамичности для упругопластических систем с зубом

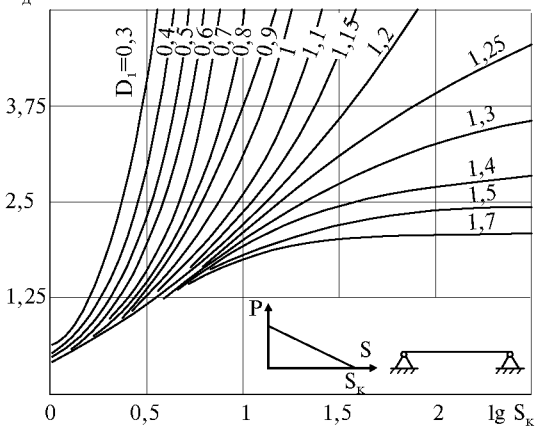


Рис.5.17. Ударные спектры шарнирно опертых упругопластических балок $K_д(D_1, S_к)$ для нагрузки $P=1-S/S_к$

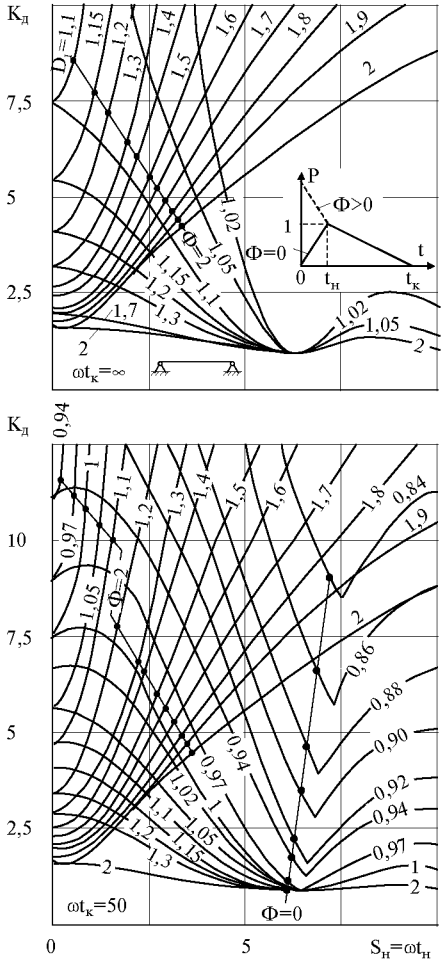


Рис.5.18. Ударные спектры шарнирно опертых упругопластических балок $K_Д(D_1, S_н, Ф)$ при двух значениях $S_к = ωt_к$ и $Ф = P(0)/P_н$

текучести. Поскольку $K_д$ явно не зависит от η_0, полагается, что: $\Pi \geq \eta_0$. Штриховые линии на рисунке соответствуют числу упругих прогибов Z_m, по которому можно нормировать предельные состояния металлоконструкций. Более полные данные по расчету упругопластических конструкций с учетом временны́х эффектов на действие различных динамических нагрузок обобщены в монографии [4, 16].

Приведем формулы для аналитического расчета конструкций как систем с одной степенью свободы с динамической диаграммой сопротивления Прандтля на действие продолжительной ударно-волновой нагрузки $P_{пр}(t) = \text{const}$ и мгновенного импульса $I_{пр}$. В формулах учитываются начальные деформации от собственного веса и других статических нагрузок.

Если на конструкцию, нагруженную статической силой $P_{ст}$, подействует продолжительная динамическая нагрузка $P_{пр}$, то при $P_{ст}+P_{пр} < K_{пр}f < P_{ст}+2P_{пр}$ конструкция получит конечные упругопластические деформации с максимумом прогиба

$$y_m = \frac{f^2 - y_{ст\,1}^2 - 2y_{ст\,1}y_{ст\,2}}{2(f - y_{ст\,1} - y_{ст\,2})},$$

где $y_{ст1}$, $y_{ст2}$ – статические перемещения, соответствующие нагрузкам $P_{ст}$, $P_{пр}$ ($y_{ст1} = P_{ст}/K_{пр}$, $y_{ст2} = P_{пр}/K_{пр}$); f – упругий прогиб на динамическом пределе текучести; $K_{пр}$ – приведенная жесткость системы.

При действии мгновенного импульса $I_{пр} > \omega mf$ на конструкцию с приведенной массой $m_{пр}$ прогиб

$$y_m = \frac{f + y_{ст1}}{2} + \frac{I_{пр}^2}{2m_{пр}K_{пр}(f - y_{ст1})}.$$

Если по конструкции, нагруженной статической силой $P_{ст}$, произведен удар падающим грузом массой m_1 со скоростью v_0, то при $y_m > f$, $P_{ст}+m_1g < fK_1$ конструкция получит конечный упругопластический прогиб

$$y_m = \frac{K' - (0{,}5P_{ст} + m_1g)P_{ст}/K_{пр} + 0{,}5f^2K_{пр}}{fK_{пр} - P_{ст} - m_1g}, \quad K' = \frac{m_1v_0^2}{2}\left[1 - \frac{m_{пр}(1-e^2)}{m_{пр}+m_1}\right],$$

где e – коэффициент восстановления при ударе, равный отношению высоты h отскока к высоте свободного падения h_0: $e = h/h_0$, $h_0 = v_0^2/(2g)$.

При абсолютно неупругом ударе $e = 0$, при абсолютно упругом $e = 1$.

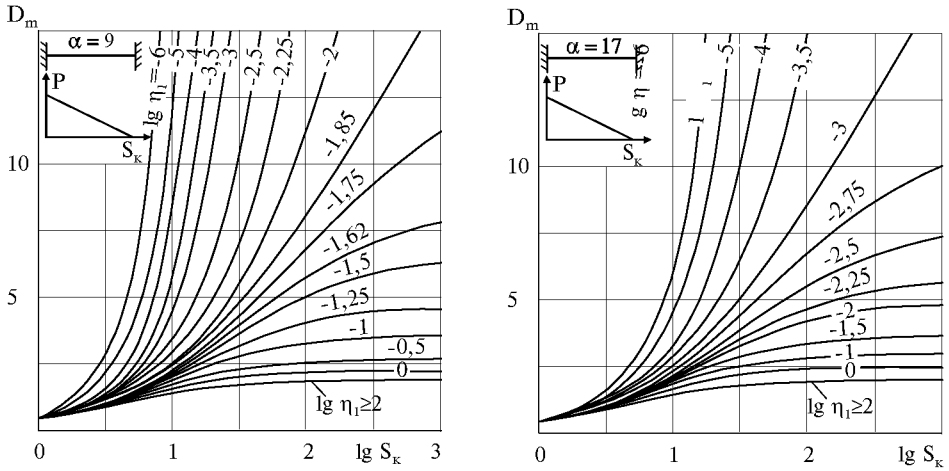


Рис.5.19. Ударные спектры упругопластических балок с защемленными концами $K_Д(\eta_1, S_к)$ для нагрузки $P = 1 - S/S_к$

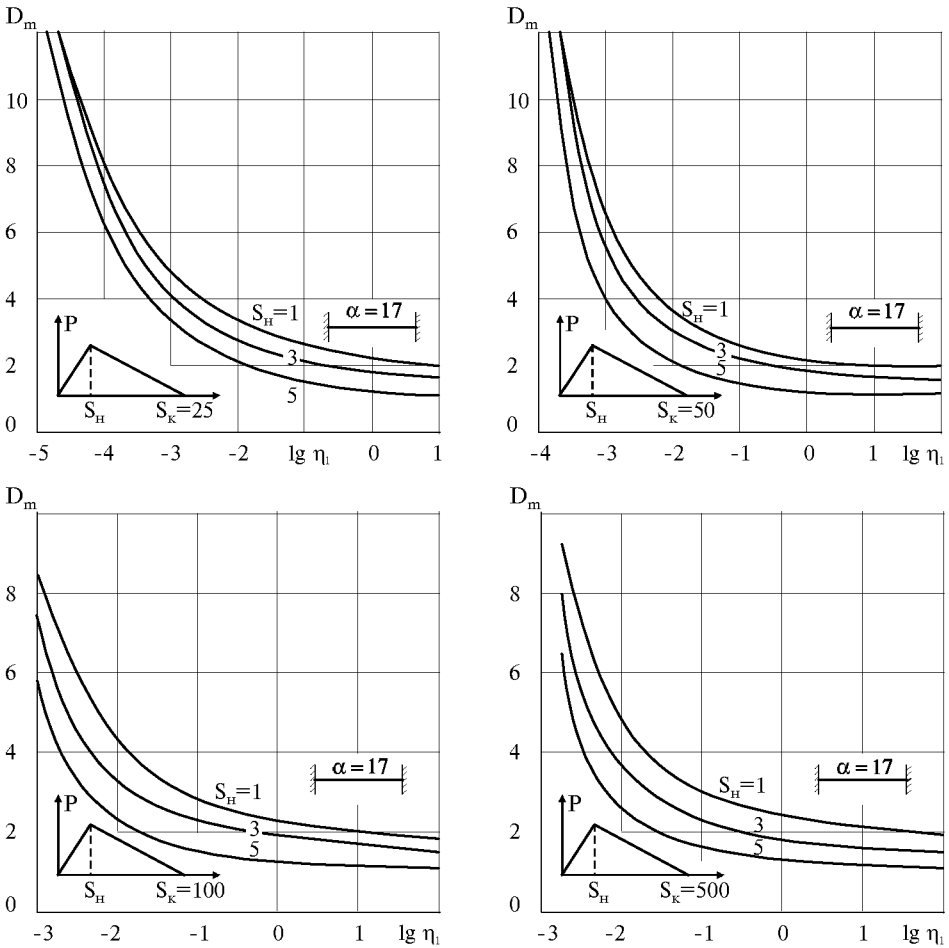


Рис.5.20. Ударные спектры упругопластических балок с защемленными концами $K_Д(\eta_1, S_н)$ при четырех значениях $S_к = \omega t_к$

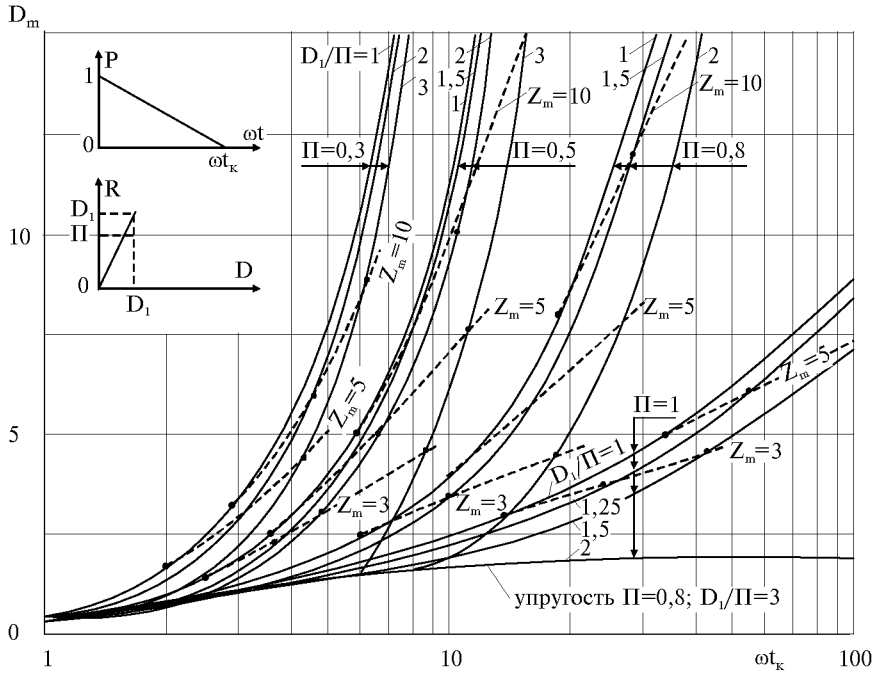


Рис.5.21. Ударные спектры упругопластических систем с зубом текучести $D_1 = \eta_0\sigma_d / \sigma_т$, $П = \eta_0\sigma'_т / \sigma_т$, $\sigma'_т \geq \sigma_т$ – уровень напряжений за пределом динамической текучести

5.4. Расчет на пульсационные воздействия ветра

5.4.1. Динамический расчет сооружений на ветровые нагрузки. Средняя ($\overline{v}_j$) и пульсационная $v_j(t)$ части продольной составляющей скорости ветра вызывают в каждой точке j сооружения среднюю и пульсационную возмущающую силы, соответственно определяемые по формулам:

$$\overline{P}_j = w_0 c_j k(z_j) F_j \ ;$$

$$P_{0j}(t) = 2\overline{P}_j v_j(t) / \overline{v}_j \ ,$$

где $w_0 = 0{,}5\rho\overline{v}_0^2$ – нормативное значение ветрового давления на высоте $z = 10$ м; c_j – аэродинамический коэффициент; ρ – плотность воздуха; $k(z_j) = \overline{v}_j^2 / \overline{v}_0^2$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления с высотой; F_j – площадь проекции сооружения в уровне j на плоскость, нормальную к направлению ветра.

Стандарт возмущающей силы

$$\sigma_{P_j} = \overline{P}_j \frac{2\sigma_v}{\overline{v}_j} .$$

Нормативное значение возмущающей силы $P_{0j} = r\sigma_{P_j}$, где r – коэффициент обеспеченности (число стандартов). В нормах (СНиП II–6–74, СНиП 2.01.07–85) коэффициент r учтен в неявном виде, при назначении коэффициентов пульсации

$$\zeta_j = r \frac{2\sigma_v}{\overline{v}_j} .$$

Динамические перемещения или усилия в сооружении от действия случайных сил $P_{0j}(t)$, вызванных пульсациями скорости ветра, обычно могут быть представлены в виде разложения в ряд по формам собственных колебаний α_{ij} сооружения:

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_{ij} f_i(t).$$

Тогда для каждой i-й обобщенной координаты $f_i(t)$, соответствующей полному разделению переменных в уравнениях колебаний, можно получить следующее уравнение:

$$\ddot{f}_i + \frac{\delta_i}{\pi} p_i \dot{f}_i + p_i^2 f_i = Q_i / M_i^{\circ},$$

где p_i, δ_i – круговая частота собственных колебаний сооружения по i-й форме и логарифмический декремент колебаний соответственно; $Q_i = \sum_{k=1}^{n} P_{0k}\alpha_{ik}$ – обобщенная сила; $M_i^{\circ} = \sum_{k=1}^{n} m_k \alpha_{ik}^2$ – обобщенная масса; m_k – масса, сосредоточенная в точке k сооружения.

Дисперсия (средний квадрат) реакции сооружения в точке j

$$\sigma_j^2 = \sum_{i=1}^{N}\sum_{r=1}^{N} \alpha_{ij}\alpha_{rj}\overline{f_i f_r}\ , \qquad (5.26)$$

где

$$\overline{f_i f_r} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S_{Q_i Q_r}(\omega)\Phi_i(i\omega)\Phi_r(-i\omega)d\omega\ ;$$

$\Phi_i(i\omega)$, $\Phi_r(-i\omega)$ – i-я комплексная и r-я комплексно-сопряженная (механические) передаточные функции системы.

Взаимная спектральная плотность обобщенных сил

$$S_{Q_i Q_r}(\omega) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} S_{kl}(\omega)\alpha_{ik}\alpha_{rl}\ ,$$

где

$$S_{kl}(\omega) = \sigma_{P_k}\sigma_{P_l} S_v^{\text{н}}(\omega) R_{kl}(\omega) -$$

– взаимная спектральная плотность возмущающих сил; σ_{P_k}, σ_{P_l} – стандарты возмущающих сил в точках k, l; $S_v^{\text{н}}(\omega)$, $R_{kl}(\omega)$ – соответственно нормированная спектральная плотность пульсации скорости ветра и функция взаимной корреляции гармоник пульсации в точках k, l.

Численное решение задачи с использованием представленных зависимостей на практике может вызывать затруднения даже в простых случаях. Поэтому при инженерных расчетах сооружений на пульсационные воздействия ветра обычно применяются обоснованные в той или иной мере приемы, позволяющие обойти вычислительные трудности.

Если пульсация скорости полностью коррелирована в точках k, l, т.е. $R_{kl}(\omega) = 1$, то при $i = r$

$$S_{Q_i}(\omega) = S_v^{\text{н}}(\omega)\left(\sum_{k=1}^{n}\sigma_{P_k}\alpha_{ik}\right)^2.$$

Тогда для каждой i-й формы колебаний из (5.26) можно получить:

$$\sigma_{ij}^{*2} = \alpha_{ij}^2 f_i^2 = p_i^{-4} \xi_i^2 \eta_{ij}^2 \ ;$$

$$\xi_i^2 = p_i^4 M_i^{o2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_v^{н}(\omega) \left|\Phi_i(i\omega)\right|^2 d\omega \ ;$$

$$\eta_{ij} = \alpha_{ij} \sum_{k=1}^{n} \sigma_{P_k} \alpha_{ik} \ / \ M_i^{o} \ .$$

Значение коэффициента динамичности ξ может определяться по черт.2 СНиП 2.01.07–85 в зависимости от параметра $\varepsilon = \sqrt{\gamma_f w_0} \ / \ 940 f_1$ и логарифмического декремента, колебаний δ (в зависимости от типа сооружения $\delta = 0{,}15$ или $0{,}3$), где γ_f – коэффициент надежности по нагрузке; f_1 – первая частота собственных колебаний сооружения, Гц.

В работах М.Ф.Барштейна, положенных в основу СНиП II–6–74, перемещение высотного сооружения при его колебаниях по i-й форме и соответствующая пульсационная нагрузка определяются как для полностью коррелированного по высоте процесса, а высотная корреляция учитывается с помощью коэффициента ν_i .

В этом случае стандарты перемещений по i-й форме и соответствующих нагрузок в точке j:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{*} \nu_i = p_i^{-2} \xi_i \eta_{ij} \nu_i \ ;$$

$$P_{ij} = m_j \xi_i \eta_{ij} \nu_i \ .$$

Для получения нормативных величин соответствующие стандарты умножаются на коэффициент обеспеченности, а для получения расчетных величин – соответствующие нормативные величины умножаются на коэффициент надежности по нагрузке γ_f .

Очевидно, при таком подходе должно соблюдаться условие $\sum_{k=1}^{n} \sigma_{P_k} \alpha_{ik} \neq 0$, в противном случае $\nu_i \to \infty$ (например, при кососимметричной форме колебаний). В СНиП коэффициент ν_i определен лишь для основной формы (i=1) колебаний сооружения (в виде квадратной параболы).

В СНиП 2.01.07–85 коэффициент ν (табл.9) учитывает пространственную корреляцию не динамической реакции сооружения, а ветрового давления на его поверхности. При этом учитывается лишь первая форма собственных колебаний сооружения, а при необходимости учета высших форм колебаний рекомендуется производить динамический расчет. Такая необходимость обычно возникает при проектировании высотных и протяженных сооружений.

5.4.2. Определение реакции высотных и протяженных сооружений на пульсационные воздействия ветра. Высотные сооружения типа башен, мачт с оттяжками, труб и т.п. и протяженные (вдоль горизонтальной оси) типа мостов, трубопроводов, ЛЭП и т.п. по своим динамическим и геометрическим характеристикам могут быть объединены в один класс линейно-протяженных сооружений.

Специфическими особенностями, общими для этого класса сооружений, являются большие периоды собственных колебаний, весьма низкие значения логарифмического декремента колебаний и значительные размеры, соизмеримые с масштабами турбулентных вихрей в атмосфере. Указаний действующих нормативных документов по расчету подобных сооружений явно недостаточно, что вызывает затруднения при их проектировании. Представленная методика расчета направлена на восполнение этого пробела.

Учитывая особенности турбулентного ветрового потока, пульсационное воздействие ветра может быть представлено [14, 18] в виде двух частей: квазистатической, с длинами волн, характерными для области максимума энергетического спектра пульсации скорости ветра; резонансной, с мелкомасштабными вихрями в области частот собственных колебаний сооружения, которые обычно существенно выше частоты максимума спектра пульсаций скорости ветра.

Эффект воздействия квазистатической части пульсаций скорости ветра на сооружение близок к статическому, т.е. коэффициент динамичности $\xi=1$, а i-я и r-я обобщенные координаты в разложении динамической реакции по формам собственных колебаний сооружения полностью коррелированы между собой. Тогда нормативное значение равнодействующей квазистатической ветровой нагрузки в точке j сооружения может быть представлено в следующем виде:

$$P_j^{(\text{кс})} = r^{(\text{кс})}\,\sigma_{P_j}\nu = P_j\varsigma_j\nu, \tag{5.27}$$

где $r^{(\text{кс})}$ – коэффициент обеспеченности (число стандартов); $\sigma_{P_j} = 2P_j\sigma_v / v_j$ – стандарт возмущающей силы в точке j; P_j – нормативное значение равнодействующей средней составляющей ветровой нагрузки в точке j; v_j – средняя скорость ветра в точке j; σ_v – стандарт пульсации скорости ветра; $\varsigma_j = 2r\sigma_v / v_j$ – коэффициент пульсаций давления ветра; ν – коэффициент, учитывающий влияние пространственной корреляции квазистатической части пульсаций давления по поверхности сооружения, определяемый по формуле

$$\nu = \sqrt{\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\sigma_{P_k}\sigma_{P_l}R_{kl}}\Bigg/\sum_{k=1}^{n}\sigma_{P_k}\,.$$

Для оценки ν представим коэффициент взаимной корреляции пульсаций скорости R_{kl} в виде

$$R_{kl} = \exp\left(-c\left|z_l - z_k\right|L_{kl}^{-1}\right),$$

где $L_{kl} \approx 0{,}5(L_k + L_l)$; $L_k = v_k / n$; $L_l = v_l / n$ – длины продольных волн, соответствующих частоте n (Гц) максимума спектра на высотах z_k, z_l.

Полагая, что $L_k = L_l = L$ и что корреляцией процессов в точках k, l можно пренебречь, если $R_{kl} < 0{,}05$, получим предельное расстояние $|z_l - z_k| \approx 270$ м. Очевидно, что с уменьшением размеров сооружения $\nu \to 1$. Для высокочастотной, «резонансной» области спектра пульсаций скорости ветра коэффициент корреляции гармоник пульсации R_{kl} зависит от длины волн $L_{ik} = v_k T_i$, соответствующих частотам $p_i = 2\pi / T_i$, и возмущающие силы в точках k, l практически не коррелированы между собой. Так, при периоде $T_i = 3$с, $v_k = v_l = 30$ м/с условию $R_{kl} < 0{,}05$ будет отвечать расстояние $|z_l - z_k| \approx 30$ м.

При действии пульсаций скорости ветра в резонансной области спектра средний квадрат перемещения точки j сооружения может быть представлен в виде

$$\sigma^2_{j(p)} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{r=1}^{N} p_i^{-2}p_r^{-2}M_i^{\text{o}\,-1}M_r^{\text{o}\,-1}\alpha_{ij}\alpha_{rj}\xi_i^*\xi_r^*A_{ir}\sum_{k=1}^{n}\sigma^2_{P_k}\alpha_{ik}\alpha_{rk}\,, \tag{5.28}$$

где α_{ij}, α_{rj}, α_{ik}, α_{rk} – ординаты i-й, r-й форм собственных колебаний сооружения в точках i, j, k, l; M_i^{o}, M_r^{o} – i-я и r-я обобщенные массы; ξ_i^*, ξ_r^* – коэффициенты динамичности при колебаниях сооружения по i-й и r-й формам при действии только резонансной части пульсаций; A_{ir} – коэффициент, учитывающий взаимную корреляцию i-й и r-й обобщенных координат.

В данном случае

$$\xi_i^{*2} = p_i^4 M_i^{o2} \frac{1}{2\pi} \int_{p_i-\Delta\omega/2}^{p_i+\Delta\omega/2} S_v^{н}(\omega)\left|\Phi_i(i\omega)\right|^2 d\omega = 0{,}25\pi \frac{p_i}{\delta_i} S_v^{н}(p_i)\,, \qquad (5.29)$$

где δ_i – логарифмический декремент колебаний по i-й форме; $\Delta\omega$ – ширина полосы пропускания системы.

Коэффициент динамичности ξ_i, принятый в нормах, связан с ξ_i^* зависимостью

$$\xi_i^2 = 1 + \xi_i^{*2}\,.$$

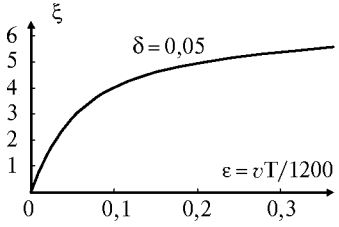


Рис.5.22. Зависимость $\xi(vT)$

График $\xi^*(\varepsilon)$ при $\delta = \delta_0 = 0{,}05$ приведен на рис.5.22 (индекс "i" опущен), значения ξ^* при $\delta \neq \delta_0$ легко определяются по формуле

$$\xi^*(\delta) = \xi^*(\delta_0)\,\Delta\,, \qquad (5.30)$$

где $\Delta = \sqrt{\delta_0/\delta}$; $\delta = \delta_к + \delta_a$; $\delta_к$, δ_a – логарифмический декремент колебаний для конструкционного и аэродинамического демпфирования, соответственно.

Зависимость (5.30) позволяет обойтись графиком зависимости $\xi^*(T)$ при эталонном значении $\delta = \delta_0$ вместо семейства графиков $\xi(T)$ для каждого значения δ, как принято в нормах.

Для учета влияния на эффект воздействия изменения спектра пульсаций скорости по высоте [15] в формулу (5.27) вводится коэффициент μ_k, определенный следующим образом:

$$\mu_k = \xi_i^*(z_k)/\xi_i^* = \sqrt{S_v^{н}(p_i, z_k)/S_v^{н}(p_i)} = 1{,}33\left(\frac{z_k}{10}\right)^{\frac{\alpha-1}{3}}\,,$$

где $S_v^{н}(p_i, z_k)$, $S_v^{н}(p_i)$ – соответственно ординаты спектров Кеймала и Давенпорта на частоте $\omega = p_i$, $\xi_i^*(z_k)$, ξ_i^* – значения коэффициентов динамичности при воздействии, характеризуемом спектром Кеймала (в зависимости от высоты) и спектром Давенпорта, соответственно.

Если изменение спектра пульсаций скорости по высоте не учитывается в соответствии с нормами, то $\mu_k = 1$.

Коэффициент A_{ir} вычисляется следующим образом [14, 15]:

$$A_{ir} = \xi_{ir}^* \,/\, \xi_i^* \xi_r^*\,,$$

где

$$\xi_{ir}^* = p_i^2 p_r^2 M_i^{o} M_r^{o} \frac{1}{2\pi} \mathrm{Re} \int_0^{\infty} \Phi_i(i\omega)\Phi_r(-i\omega) S_v^{н}(\omega) d\omega\,. \qquad (5.31)$$

Для оценки ξ_{ir}^* может использоваться решение интеграла (5.31) при модели воздействия в виде "белого шума".

При очень близких частотах, когда $|p_i/p_r - 1| \,/\, \sqrt{\delta_i \delta_r} < \sim 0{,}25$, может использоваться зависимость

$$A_{ir} \approx 2\sqrt{\delta_i \delta_r} \,/\, (\delta_i + \delta_r)\,.$$

При отсутствии близких частот собственных колебаний сооружения $A_{ii} = 1$, $A_{ir} = 0$ $(i \neq r)$. С другой стороны, при $\sigma_{P_k} \approx \mathrm{const}$ $\sum_{k=1}^{n} \sigma_{P_k}^2 \alpha_{ik} \alpha_{rk} = 0$ $(i \neq r)$.

Тогда

$$\sigma^2_{j(\text{p})} = \sum_{i=1}^{N} p_i^{-4} \xi_i^{*2} \eta_{ij}^{*2} ,$$

где

$$\eta^*_{ij} = \alpha_{ij} \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} \sigma^2_{P_k} \alpha^2_{ik} \mu^2_k}}{\sum_{k=1}^{n} m_k \alpha^2_{ik}} .$$

Тогда нормативное значение резонансной части пульсационной ветровой нагрузки, приложенной в точке j сооружения при его колебаниях по i-й форме, определяется по формуле

$$P^{(\text{p})}_{ij} = r_i^{(\text{p})} m_j \xi_i^* \eta_{ij}^* .$$

Расчетные перемещения (или усилия) в сооружении от действия средней (статической) и пульсационной (квазистатической и резонансной) составляющих следует определять по формуле

$$X = \gamma_f \left(\overline{X} + \sqrt{X^2_{(\text{кс})} + \sum_{i=1}^{N} X^2_{i(\text{p})}} \right),$$

где $\overline{X}$ – нормативное значение усилий в сооружении, вызванных средней составляющей ветровой нагрузки; $X_{(\text{кс})}$ – то же, от действия квазистатической ветровой нагрузки; $X_{i(\text{p})}$ – то же, от действия резонансной ветровой нагрузки при колебаниях сооружения по i-й форме.

Для определения коэффициента обеспеченности может быть использована известная зависимость Давенпорта

$$r_i^{(\text{p})} = \sqrt{2 \ln(T / T_i)} + 0{,}577 \Big/ \sqrt{2 \ln(T / T_i)}$$

при $T = 3600$ с, соответствующем времени осреднения при получении спектров пульсации скорости ветра [18].

Значение коэффициента, обеспеченности $r^{(\text{кс})}$ для квазистатической части воздействия близко к величине, принятой в нормах при назначении коэффициентов пульсации ($r^{(\text{кс})} = 2...3$).

Анализ результатов сопоставления измеренных в натуре и вычисленных различными методами значений реакции высотных сооружений на пульсационное воздействие ветра при учете фактических данных о профиле скорости ветра и стандартах пульсации скорости[1] показывает [14], что расчетные значения реакции сооружения, полученные в предположении о полной корреляции возмущающих сил в квазистатической области спектра ($\nu = 1$) и их статистической независимости в резонансной области, хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет существенно упростить вычисления.

5.4.3. Проверка сооружений на ветровой резонанс. При взаимодействии гибких сооружений с ветровым потоком возможно возникновение различных явлений аэродинамической неустойчивости, типичными представителями которых являются вихревое возбуждение сооружений цилиндрической формы, галопирование плохо обтекаемых конструкций с квадратным, прямоугольным или ромбовидным

[1] Расхождения регламентируемых нормами вертикальных профилей средних скоростей ветра и стандартов пульсации с фактическими обычно приводят к завышению расчетных значений реакции сооружения на ветровые воздействия.

сечением и др. Вихревое возбуждение наблюдается при колебаниях дымовых труб, радиомачт и других гибких сооружений цилиндрической формы и обусловлено периодическим отрывом вихрей Бенара–Кармана, образующих вихревую дорожку, с частотой, определяемой числом Струхаля. При некоторой критической скорости ветра происходит захват частоты отрыва этих вихрей частотой собственных колебаний, что приводит к интенсивному росту амплитуд колебаний цилиндра поперек потока. Это явление, называемое ветровым резонансом, носит автоколебательный характер и вызвано аэродинамической неустойчивостью цилиндра при критической скорости ветра из-за преобладания отрицательного аэродинамического демпфирования над положительным.

Критическая скорость ветра, вызывающая резонансные колебания сооружения, может определяться по следующей формуле

$$v_{i(\text{кр})} = \frac{d}{T_i \text{Sh}} = \frac{5d}{T_i},$$

где T_i – период собственных колебаний сооружения по i-й форме, с; Sh – число Струхаля (для круглого поперечного сечения Sh=0,2); d – диаметр сооружения, м.

Проверка на резонанс сооружений круговой цилиндрической формы требуется при условии $2\sqrt{w_0} \le v_{\text{i(кр)}} < 25$ м/с.

Амплитуду интенсивности аэродинамической силы на высоте z при колебаниях сооружения по i-й форме допускается определять по формуле

$$P_i(\text{z}) = P_{0i}\alpha_i(\text{z}),$$

где $\alpha_i(\text{z})$ – ордината i-й формы собственных колебаний сооружения; $P_{0i}=c_y w_{i(\text{кр})} d$ – амплитуда интенсивности на уровне свободного конца сооружения в виде консоли или в середине пролета сооружения в виде балки с опертыми концами; c_y – аэродинамический коэффициент поперечной силы, принимаемый равным 0,25; $w_{i(\text{кр})} = \rho v_{i\,(\text{кр})}^2 / 2$ – давление ветра, соответствующее критической скорости $v_{i\,(\text{кр})}$; ρ – плотность воздуха.

Усилия и перемещения в сооружении на уровне z при ветровом резонансе допускается определять по формуле

$$X^{(\text{р})}(\text{z}) = \frac{\pi}{\delta} X^{(\text{с})}(\text{z}),$$

где $X^{(\text{с})}(\text{z})$ – прогиб, изгибающий момент или поперечная сила от действия силы $P_i(\text{z})$, приложенной статически; δ – логарифмический декремент колебаний сооружения.

Расчетные усилия и перемещения сооружения при ветровом резонансе допускается определять по формуле

$$X(\text{z}) = \sqrt{\left[X^{(\text{р})}(\text{z})\right]^2 + \left[X^{(\text{с})}(\text{z}) + X^{(\text{д})}(\text{z})\right]^2},$$

где $X^{(\text{с})}(\text{z})$, $X^{(\text{д})}(\text{z})$ – перемещение, изгибающий момент или поперечная сила от статической и пульсационной составляющей ветровых нагрузок при скорости ветра $v_{(\text{кр})}$.

5.5. Расчет на сейсмические воздействия

5.5.1. Методы оценки сейсмической реакции сооружений. Методы расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия, положенные в основу как отечественных, так и зарубежных норм, разработаны с учетом предельных состояний конст-

рукций, при формулировании которых принимаются во внимание такие факторы, как безопасность людей, сохранность ценного оборудования, возможность ремонта и т.п. Это связано с тем, что обеспечение сейсмостойкости зданий и многих сооружений вследствие увеличения их прочности и жесткости считается экономически нецелесообразным и поэтому допускается работа конструкций за пределами упругости и их повреждение при сильных землетрясениях. В нормативных документах различных стран получили распространение в основном следующие практические методы расчета.

Метод сейсмического коэффициента, основанный на допущении возможности определения статических сил, вызывающих реакцию в конструкциях, близкую по величине к реакции, вызываемой действием расчетного землетрясения. При этом перерезывающая сила в основании здания обычно находится как произведение его веса на сейсмический коэффициент, значение которого регламентируется с учетом интегрального влияния таких факторов, как уровень воздействия, его направление, степень риска, динамические характеристики и особенности конструктивных схем зданий. Метод позволяет получить грубую оценку сейсмической реакции и рекомендуется для расчета простейших сооружений.

Спектральный метод, основанный на применении спектров сейсмической реакции, т.е. сглаженных графиков зависимости максимальных параметров реакции линейного осциллятора (системы с одной степенью свободы) от частоты (периода) его собственных колебаний при заданной характеристике затухания (демпфирования). Спектры реакции строятся при известных максимумах параметров движения грунта во время землетрясения на основе оценки расчетной сейсмичности строительной площадки. Использование метода разложения колебаний системы со многими степенями свободы по собственным формам позволяет получить сейсмическую реакцию сооружения как суперпозицию составляющих по отдельным формам колебаний, каждой из которых соответствует ордината в спектре реакции сооружения при известных значениях его периода и характеристики затухания колебаний. Преимуществом этого метода является его простота, к недостаткам следует отнести невозможность оценки вероятности отклонения расчетных значений параметров сейсмической реакции от действительных величин.

Метод определения сейсмической реакции сооружения с помощью численного интегрирования уравнений динамики с использованием натуральных или синтезированных записей землетрясений позволяет описывать поведение расчетной модели сооружения в зависимости от времени. Однако моделирование процесса землетрясений не позволяет выйти за рамки имеющейся сейсмологической информации. Применение метода ограничено из-за больших затрат машинного времени, однако в некоторых случаях он является незаменимым средством динамического анализа нелинейных или неупругих систем.

Вероятностные методы. Среди них наибольшее распространение получил метод, основанный на спектральном представлении теории случайных процессов, который можно трактовать как обобщение спектрального метода. Хотя в принципе любые методы в той или иной мере оперируют с вероятностными оценками различных параметров как сейсмического воздействия, так и реакции на него, данный метод является наиболее последовательным, позволяющим получать непосредственно в аналитическом виде оценки статистических характеристик рассматриваемых параметров. В п.5.5.2 рассмотрен также метод статистического моделирования сейсмических воздействий. Другие статистические методы, более сложные и не получившие широкого распространения в инженерной практике, здесь не рассматриваются.

Анализ записей колебаний грунта при сильных землетрясениях показывает, что при средних расстояниях до очага обычно приемлема амплитудно-нестационарная модель в виде произведения стационарного случайного процесса $\varphi(t)$ на детерми-

нированную функцию огибающей $A(t)$, аппроксимации которой предложены В.В.Болотиным, Шинозука, Лиу, Лином и др. Процесс $\varphi(t)$ обычно представляется в виде фильтрованного белого шума, основной характеристикой которого является спектральная плотность $G(\omega)$ или энергетический спектр, т.е. разложение энергии процесса по частотам (ω) гармонических составляющих.

Дисперсия (средний квадрат) сейсмической реакции линейного осциллятора определяется путем интегрирования в бесконечных пределах произведения квадрата модуля передаточной функции системы (частотной характеристики) на спектральную плотность воздействия. Расчетное значение сейсмической реакции равно произведению ее стандарта на коэффициент обеспеченности, соответствующий вероятности непревышения определенного уровня в течение некоторого времени [17].

Развитие математического аппарата вероятностных методов дает возможность прогнозирования с определенной обеспеченностью параметров сейсмической реакции сложных инженерных сооружений, в частности, пространственных протяженных систем, при расчете которых существенное значение имеет пространственная изменчивость поля сейсмических колебаний грунта основания (см.п.5.5.3).

В основу действующих норм положен спектральный метод, а для расчета ответственных сооружений рекомендуется метод расчета с использованием записей землетрясений. При использовании спектрального метода расчет формально выполняется по упругой расчетной схеме на пониженные условные сейсмические нагрузки, в зависимости от коэффициента K_1, учитывающего допускаемые повреждения в элементах конструкций.

Динамический эффект воздействия в этом случае учитывается с помощью спектрального графика коэффициента динамичности $\beta(T)$, по смыслу представляющего собой отношение максимума абсолютного ускорения линейного осциллятора с периодом собственных колебаний T к максимальному ускорению основания a_m. Введение в соответствии со СНиП II–7–81* коэффициента K_1 по-существу приводит к преобразованию линейного упругого спектра в неупругий. В зарубежных нормах аналогичный коэффициент зависит от периода T.

При расчете по методу использования записей землетрясений расчетная схема сооружения должна учитывать возможность развития упругопластических деформаций в элементах конструкций. Накопление и систематизация численных результатов, получаемых с помощью этого метода, по-видимому, могут быть использованы при дальнейшем совершенствовании спектрального метода, положенного в основу норм.

В предложениях по корректировке норм проектирования зданий в сейсмических районах рекомендуется вводить понижающий коэффициент не к сейсмическим нагрузкам, а к усилиям в элементах конструкций. При определении сейсмических нагрузок должны учитываться как нормативное воздействие, так и максимальное воздействие от землетрясения с редкой повторяемостью. Этим режимам загружения соответствуют разные расчетные схемы зданий и их предельные состояния. Так, если в первом режиме допускаемые повреждения не должны прерывать нормальную эксплуатацию здания на длительный период времени, то во втором режиме допускается такой уровень повреждений, при котором только обеспечивается общая устойчивость здания и безопасность находящихся в нем людей. Предполагается, что такой подход будет способствовать повышению надежности зданий, подверженных сейсмическим воздействиям.

5.5.2. Статистическое моделирование сейсмических воздействий на здания и сооружения. Сейсмические волны, распространяющиеся в грунтовом массиве при землетрясении и взаимодействующие с сооружениями, представляют нестационарный случайный процесс, образуемый семейством (ансамблем) реализаций, с опре-

деленными статистическими свойствами, зависящими от макросейсмических параметров землетрясения. Для ответственных сооружений нормами предусмотрен расчет на особые сочетания нагрузок с учетом сейсмических воздействий, в качестве которых следует использовать инструментальные записи ускорений оснований при землетрясениях, а также синтезированные акселерограммы. В этих целях для анализа поведения конструкций при сейсмических воздействиях наиболее эффективным является метод статистического моделирования (Монте–Карло) при генерировании на ЭВМ ансамбля реализаций со статистическими характеристиками, получаемыми специальной обработкой имеющихся записей (в условиях ограниченности информации).

При статистическом моделировании в целях контроля прочности сооружения выполняют его многократный динамический детерминистический расчет на действие реализаций ансамбля с обработкой данных по параметрам движения и напряженно-деформированного состояния элементов объекта. Далее проводят оценку показателей риска, относительно сейсмического воздействия. Поскольку эти показатели должны быть малыми, статистическое моделирование применяют для оценки показателей условного риска, т.е. вероятности возникновения разрушений при заданном конкретном воздействии (частоте события выброса за пределы области допустимых состояний).

Вводят функцию риска $H(t)$ как дополнение функции безопасности $S(t)$ до единицы [2]

$$H(t) = 1 - S(t), \qquad S(t) = P\{\nu(\tau) \in \Omega_S,\ \tau \in [0, t]\}\ ,$$

где $S(t)$ – вероятность случайного события, которое заключается в том, что в интервале $[0, t]$ не возникнет условий, приводящих к разрушению; ν – вектор типа вектора качества в теории надежности; Ω_S – область безопасности, включающая допустимую область по предельным состояниям.

Если $H(t)$ не очень малая величина, то при статистическом моделировании из N испытаний (расчетов) допустима оценка для $H(t)$ на отрезке

$$\hat{H}(t) = n(t)/N\ ,$$

где $n(t)$ – число испытаний (расчетов), в которых прочностные или деформационные параметры объекта вышли за пределы допустимой области по предельным состояниям.

Предельно допустимое значение риска H_* назначают с учетом ответственности объекта, а также некоторой неопределенности исходной информации (свойства грунтов, геология). Изменчивостью характеристик объекта, по сравнению с изменчивостью сейсмических нагрузок в большинстве случаев можно пренебречь.

Предлагались различные модели математического описания колебаний грунта при землетрясениях. Широкое распространение получила модель В.В.Болотина, основанная на представлении ускорений $Z^{\cdot\cdot}$ в форме, позволяющей учесть изменение во времени спектрального состава колебаний,

$$Z^{\cdot\cdot}(t|S) = \sum_k L_k(t|S)\varphi_k(t|S)\ , \tag{5.32}$$

где S – вектор, характеризующий интенсивность сотрясения, спектральный состав, продолжительность интенсивной фазы (зависит от макросейсмических параметров, местных геологических и грунтовых условий); L_k – квазиогибающие, характеризующие медленное изменение амплитуд во времени на отрезке θ преобладающих периодов сотрясения и нулевые вне отрезка длительности сотрясения θ; φ_k – стационарные случайные функции времени, характеризующие спектральный состав сотрясения, с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Одночленное приближение для (5.32) соответствует допущению о возможности пренебречь изменением спектрального состава. Такой подход применим для аппроксимации нестационарных случайных процессов, близких к стационарному (с медленно меняющейся дисперсией). В этом случае рассматриваемая модель представляет стационарный случайный процесс $\varphi(t)$ с фиксированным спектром, модулированный некоторой детерминированной квазиогибающей $L(t)$:

$$Z^{\cdot\cdot}(t) = \eta q L(t)\varphi(t) \ , \qquad (5.33)$$

где η – единичная функция Хевисайда; q – нормирующий множитель.

Метод статистического моделирования, основанный на представлении (5.32) и (5.33), позволяет получать нужное число реализаций путем умножения генерируемых стационарных случайных функций (со спектральными характеристиками, соответствующими записям прошлых землетрясений) на детерминированные функции L. Таким образом (5.32) или (5.33) используются при анализе, а затем при синтезе акселерограмм, причем анализ проводится с учетом гипотезы об эргодичности стационарного процесса, что позволяет усреднение по множеству реализаций заменить усреднением по времени единственной акселерограммы.

Для детерминированных прочностных расчетов на ЭВМ применяют программы, в которых учитываются нелинейные эффекты.

Ниже приведены данные программы ГАММА [11], основанной на представлении (5.33), выполняющей на ЭВМ ЕС дискретный анализ реальной записи в виде временно́го ряда, а затем генерирование реализаций случайного нестационарного процесса с использованием метода канонических разложений, быстрого преобразования Фурье (БПФ) и сплайн-интерполяции без ограничений на вид аппроксимируемых функций.

Программа сглаживает и балансирует исходный ряд, выделяет и аппроксимирует квазиогибающую и стационарную часть процесса. Стационарный процесс сглаживается косинусным окном, а затем выполняются: анализ Фурье; вычисление амплитудного и фазового частотных спектров, первичной оценки спектральной плотности; сглаживание на смежных частотах дисперсии, окончательно сглаженной оценки спектральной плотности и среднеквадратических отклонений по частотам. Далее выполняется цикл по заданному числу реализаций с синтезом нестационарных процессов – акселерограмм. В каждом таком цикле выполняется цикл по частотам спектра – генерирование (с использованием полученных среднеквадратических отклонений) гауссовых случайных величин (амплитуд) и синтез Фурье стационарной части процесса. Производится сглаживание косинусным окном, удаление среднего и синтез нестационарного процесса с балансировкой и записью на МД.

Необходимость в сглаживании и балансировке временно́го ряда возникает вследствие неточностей при оцифровке, а также систематических ошибок, вносимых аппаратурой при регистрации процесса (например, «дрейфа нуля») и прочих случайных причин. Наличие погрешностей (трендов) может приводить к заметному разбалансу интеграла возмущения по времени к некоторому моменту t_* «успокоения» колебаний почвы.

Сглаживание рядов осуществляется локальным методом наименьших квадратов многочленом третьей степени по пяти точкам. Балансировка ряда $Z^{\cdot\cdot}(t)$ выполняется при сплайн-аппроксимации функций, если имеется разбаланс скорости $Z^{\cdot}(t_*)$ к концу воздействия

$$\int_0^{t_*} z^{\cdot\cdot}(t)dt = z^{\cdot}(t_*) \equiv \delta_1 \neq 0$$

и (или) несоответствие разбаланса перемещения $Z(t_*)$ заданной величине Z_0.

В этом случае исходный массив $\ddot{Z}$ балансируется исключением низкочастотного тренда γ в форме кубического полинома $\ddot{Z}_н = \ddot{Z} - \gamma$, $\gamma = at + bt^2 + ct^3$. Коэффициенты полинома получаются из условий

$$\gamma(t_*) = 0; \quad \gamma(0) = 0;$$

$$\delta_1 = \int_0^{t_*} \gamma(t)dt; \quad \delta_2 = \int_0^{t_*} (\int_0^{\tau} \ddot{Z}(t)dt)d\tau = Z_0 + \int_0^{t_*} (\int_0^{\tau} \gamma(t)dt)d\tau;$$

$$a = 60t_*^{-3}(\delta_2 - Z_0 - \frac{2}{5}\delta_1 t_*) ;$$

$$b = 180t_*^{-4}(-\delta_2 + Z_0 + \frac{7}{15}\delta_1 t_*) ;$$

$$c = 120t_*^{-5}(\delta_2 - Z_0 - \frac{1}{2}\delta_1 t_*) .$$

Если задана скорость $\dot{Z}(t)$, а к моменту $t=t_*$, в который полагается $\dot{Z}(t_*) = 0$, имеется разбаланс по перемещению δ_2

$$\delta_2 = \int_0^{t_*} \dot{Z}(t)dt \neq Z_0 ,$$

то табличная функция преобразуется к $\dot{Z}_н$

$$\dot{Z}_н = \dot{Z} - \gamma_v , \quad \gamma_v = t^2(b + ct), \quad b = -ct_* = 12(\delta_2 - Z_0)t_*^{-3} ,$$

причем $\gamma_v(0) = \dot{\gamma}_v(0) = \gamma_v(t_*) = 0$.

Для выделения квазиогибающей $L(t)$ ряд A, представляющий акселерограмму, разбивается на N_2 интервала, на которых содержится N_N квантов Н. На каждом j-м интервале производится усреднение по времени, т.е. определяется средний квадрат ускорения $\overline{a}_j^2$; величины $\sqrt{\overline{a}_j^2}$ вместе с начальным значением $A(1)$ заносятся в массив огибающей L, элементы которого отнесены соответственно к центрам интервалов и к началу ряда $t=0$. Производится сплайн-аппроксимация огибающей, а затем выделение стационарного процесса φ делением элементов A на интерполированные значения огибающей. В результате имеем $\varphi(t)$ со средним квадратом $\overline{\varphi}^2(t) = 1$ и спектральной плотностью $S(\omega)$, причем

$$\int_0^{\infty} S(\omega)d\omega = 1 .$$

При выборе N_2 длительность интервала должна быть велика в сравнении с характерным временем корреляции процесса φ, но на интервале свойства процесса не могут меняться существенно и функция φ должна удовлетворять условиям стационарности.

Для получения первичной оценки спектральной плотности методом БПФ, временно́й ряд из N_0 элементов на начальном временно́м интервале $T_0 = H(N_0 - 1)$ сглаживается 1/10 косинусным окном. Дискретное прямое преобразование Фурье производится процедурой FFT. Числовой ряд при этом должен содержать $2^м$ элементов (м – целое число), а для хранения коэффициентов Фурье требуется $2^м + 2$ полей памяти. Подбирается значение м и из ряда φ_i формируется массив A_1 с ближайшим к $N_0 + 2$ числом элементов $N_1 + 2 = 2^м + 2 \geq N_0 + 2$, причем добавленные сверх числа N_0 элементы заполняются нулями. В результате работы FFT вычисля-

ются коэффициенты Фурье X_j ($j=1,2...N_1$). Фиксируется временно́й интервал $T=(N_1-1)H$ с учетом добавленных нулей, частотный интервал $\Delta\omega=2\pi/T$, частота среза $\omega_c=\pi/H$, частотный спектр $\omega_k=K\Delta\omega$ ($K=1,2....N=1/2N_1$).

Амплитудный частотный спектр $A_s(\omega_k)$ вычисляется через коэффициенты Фурье: $A_s(\omega_1)=X_1$, $A_s(\omega_N)=X_{N1}$,

$$A_s(\omega_k)=\frac{1}{2}\sqrt{X_j^2+X_{j+1}^2}\quad (j=2K-1,\quad 1<K<N).$$

Первичная оценка спектральной плотности $\tilde{S}(\omega_k)$ корректируется коэффициентом $\beta=1/0{,}875$, чтобы восстановить потерю дисперсии при косинусном сглаживании:

$$\tilde{S}(\omega_1)=\beta X_1^2/\Delta\omega;\qquad \tilde{S}_k=\tilde{S}(\omega_k)=2\beta\left|A_s(\omega_k)\right|^2/\Delta\omega\qquad (k>1).$$

Окончательно сглаженная оценка спектральной плотности получается осреднением первичной оценки на M_1 смежных частотах

$$\hat{S}_k=(S_k+S_{k+1}+\ldots S_{k+M_1-1})/M_1\ .$$

Для генерирования стационарного процесса используется частный случай канонического разложения – разложение случайного процесса в ряд Фурье

$$\varphi(t_i)=U_0+\sum_{k=1}(U_k\cos\omega_k t_i+V_k\sin\omega_k t_i)\ ,$$

где U_0, U_k, V_k – некоррелированные гауссовы случайные величины с вероятностными характеристиками (среднее $<*>$ и дисперсия σ^2) $<U_0>=<U_k>=<V_k>=0$; $\sigma_0^2=\hat{S}_0\Delta\omega/2$; $\sigma_k^2=\hat{S}_k\Delta\omega$; N – учитываемое число частот ω_k в спектре.

С использованием параметров квазиогибающей и распределения дисперсий генерируется заданное число реализаций нестационарного процесса. Для получения реализаций φ используется синтез Фурье, причем гауссовы числа генерируют датчики случайных чисел из математического обеспечения ЭВМ. Нестационарные реализации образуются умножением φ на интерполированные значения огибающей L . Результаты каждого цикла генерирования после сглаживания и балансировки запоминаются, образуя банк данных сейсмической информации, для дальнейшего использования в методе Монте–Карло.

5.5.3. Вероятностный метод расчета протяженных металлоконструкций. Самым распространенным типом движения грунта при землетрясениях, характерным для плотных грунтов и средних фокальных расстояний, являются нерегулярные колебания с преобладающими периодами 0,2–0,5 с продолжительностью 10–40 с. В этом случае наиболее адекватной и распространенной является амплитудно-нестационарная модель сейсмического воздействия.

Частотный состав сейсмического воздействия характеризуется его спектральной плотностью $G(\omega)$, зависящей от доминантной частоты θ и параметра корреляции процесса во времени. Нестационарность процесса обычно учитывается с помощью квазидетерминированной огибающей, аппроксимируемой выражениями, предложенными в работах В.В.Болотина, Лиу, Лина и др.

Сейсмическое возмущение в принципе является многокомпонентным. Обычно компоненты сейсмических ускорений в основании сооружения могут считаться взаимно некоррелированными. Исключение составляют случаи, когда направленность движения грунта основания сильно выражена, как, например, для записей на жестких грунтах при небольших эпицентральных расстояниях и при неглубоком расположении очага землетрясения. В подобных случаях корреляция между компонентами сейсмических ускорений может быть существенной. На основании статистической обработки записей реальных землетрясений для стандартов гори-

зонтальных взаимно ортогональных компонент сейсмического ускорения основания могут быть приняты соотношения: $\sigma_x = \sigma \sin 56^\circ$, $\sigma_y = \sigma \cos 56^\circ$. При этом $\sigma \approx 0{,}25Ag$, где A – коэффициент, значения которого принимаются по СНиП равными 0,1; 0,2; 0,4 соответственно для расчетной сейсмичности 7, 8 и 9 баллов; g – ускорение силы тяжести.

При произвольной ориентации сооружения относительно направления действия сейсмических ускорений в основании стандарты $\sigma_{x\alpha}$, $\sigma_{y\alpha}$ этих ускорений, действующих в направлении горизонтальных осей X, Y сооружения, определяются с помощью формул:

$$\sigma_{x\alpha}^2 = (\sigma_x \cos\alpha_0)^2 + (\sigma_y \sin\alpha_0)^2 \ ;$$
$$\sigma_{y\alpha}^2 = (\sigma_x \sin\alpha_0)^2 + (\sigma_y \cos\alpha_0)^2 \ ; \qquad (5.34)$$

где α_0 – угол между направлениями действия горизонтальных компонент сейсмических ускорений в основании и соответствующими осями X и Y сооружения; в общем случае угол α_0 выбирается так, чтобы загружение было невыгоднейшим; в затруднительных случаях принимается невыгоднейшее из двух загружений:

1) $\alpha_0 = 0$; $\quad \sigma_{x\alpha} = \sigma_x$; $\ \sigma_{y\alpha} = \sigma_y$;

2) $\alpha_0 = \pi/2$; $\ \sigma_{x\alpha} = \sigma_y$; $\ \sigma_{y\alpha} = \sigma_x$;

Для сооружений большой протяженности (в плане) с размерами, соизмеримыми с масштабами корреляции процессов в пространстве, или с характерными длинами сейсмических волн, приходится считаться с пространственной изменчивостью поля сейсмических колебаний грунта. Движения отдельных опор таких сооружений во время землетрясений в принципе могут происходить по различным случайным законам во времени и пространстве из-за сложного характера движения грунта в результате многократного отражения и преломления сейсмических волн при прохождении через различные пласты грунта. Традиционный подход, основанный на предположении о синфазных колебаниях грунта в разных точках, пригоден только для сооружений, размеры которых (в плане) значительно меньше длин сейсмических волн. Для учета изменчивости сейсмических ускорений вдоль линии распространения волны может быть использована обобщенная функция взаимной спектральной плотности $G(\omega, x_k, x_l)$ [13] ускорений. Сейсмическая реакция сооружения может быть получена как суперпозиция реакций на воздействие каждой из компонент ускорений грунта, рассматриваемых как статистически независимые.

Расчетная схема протяженного сооружения принимается в виде плоской или пространственной стержневой системы с сосредоточенными в n узлах массами m_s. Наличие вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения позволяет определять частоты p_i и формы α_{ij}, α_{is} собственных колебаний такой системы, а также формы ее деформирования ε_{ks} при единичных смещениях каждой из n_0 опор в заданном направлении.

Динамическая реакция сооружения представляется в виде разложения в ряд по N формам его собственных колебаний. Тогда для дисперсии (среднего квадрата) каждой компоненты перемещения, например X, точки j сооружения в результате решения задачи о его случайных колебаниях, опуская все промежуточные выкладки, можно записать следующее выражение [13, 28]:

$$\overline{x_j^2} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{r=1}^{N} \sum_{k=1}^{n_0} \sum_{l=1}^{n_0} p_i^{-2} p_r^{-2} \beta_{ik} \beta_{rl} \eta_{ikj} \eta_{rlj} A_{ir} C_{irkl} \ , \qquad (5.35)$$

где

$$\eta_{ikj} = \alpha_{ij} Q_{ik}^{\circ} / M_i^{\circ} \ ; \qquad \eta_{rlj} = \alpha_{rj} Q_{rl}^{\circ} / M_r^{\circ} \ ;$$

$$Q_{ik}^{o} = \sigma_k \sum_{s=1}^{n} m_s \varepsilon_{ks} \alpha_{is} \; ; \quad Q_{rl}^{o} = \sigma_l \sum_{s=1}^{n} m_s \varepsilon_{ls} \alpha_{rs} \; ;$$

$$M_i^{o} = \sum_{s=1}^{n} m_s \alpha_{is}^2 \; ; \qquad M_r^{o} = \sum_{s=1}^{n} m_s \alpha_{rs}^2 \; ;$$

(в случае связанных колебаний суммирование распространяется на все компоненты перемещений); β_{ik} , β_{rl} – стандарты коэффициентов динамичности при колебаниях сооружения по *i*-й и *r*-й формам от воздействия, приложенного к опорам *k*, *l*; A_{ir} – коэффициент, учитывающий взаимную корреляцию *i*-й и *r*-й обобщенных координат; C_{irkl} – коэффициент, учитывающий пространственную корреляцию сейсмических ускорений.

Выражение (5.35) позволяет определить сейсмическую реакцию протяженного сооружения в самом общем случае, когда движения оснований отдельных опор различаются как по интенсивности, так и по спектральному составу.

При отсутствии других данных обычно принимается:

$\sigma_k = \sigma_l = \sigma$; $G_k(\omega) = G_l(\omega) = G(\omega)$;

$\beta_{ik} = \beta_{il} = \beta_i$; $\beta_{rk} = \beta_{rl} = \beta_r$.

Для высокочастотных систем ($p_i > \theta$, θ – доминантная частота землетрясения) оценка дисперсии коэффициента динамичности может быть получена с помощью выражения

$$\overline{\beta}_i^2 \approx 1 + \frac{\pi}{2} \frac{p_i}{\delta_i} G^{\text{н}}(p_i) \; .$$

При средних и низких частотах ($p_i \le \theta$)

$$\overline{\beta}_i^2 \approx \frac{\pi}{2} \frac{p_i}{\delta_i} G^{\text{н}}(p_i) \; .$$

Стандарт коэффициента динамичности $\beta_i = \sqrt{\overline{\beta}_i^2}$ в зависимости от периода $T_i = 2\pi / p_i$ собственных колебаний сооружения и логарифмического декремента δ_i колебаний может быть представлен в виде

$$\beta_i(T_i, \delta_i) = \beta_i(T_i, \delta_0) K_{\psi i} \; ,$$

где $\beta_i(T_i, \delta_0)$ – значение коэффициента динамичности при логарифмическом декременте колебаний $\delta_0 = 0{,}314$, принятом в нормах; $K_{\psi i}$ – коэффициент, учитывающий логарифмический декремент колебаний $\delta_i \ne \delta_0$ и нестационарность воздействия.

При $T_i \le 0{,}1$ с и $\delta_i \ge 0{,}2$ $K_{\psi i} = 1$. При $T_i > 0{,}1$ с и $\delta_i < 0{,}2$

$$K_{\psi i} = \sqrt{\frac{\delta_0}{\delta_i} \left[1 - \exp\left(-2\delta_i \bar{t} / T_i \right) \right]} \; ,$$

где $\bar{t}$ – продолжительность стационарной фазы землетрясения ($\bar{t} \approx 10 \ldots 15$ с).

Значения δ_i рекомендуется принимать по фактическим данным для аналогичных сооружений, а при их отсутствии ориентировочно может быть принято для железобетонных конструкций зданий и сооружений, морских стационарных платформ 0,3; для металлических конструкций (за исключением морских платформ, висячих и вантовых мостов) – 0,15; для висячих и вантовых мостов – 0,03. О соотношении между значениями стандарта β_i и соответствующей величины $\beta_i^{\text{н}}$, принятой в нормах, изложено ниже.

Значения коэффициентов A_{ir} , учитывающих взаимную корреляцию *i*-й и *r*-й обобщенных координат, могут определяться по формуле

$$A_{ir} = \frac{2(\gamma_i T_r + \gamma_r T_i)\sqrt{\gamma_i \gamma_r T_i^3 T_r^3}}{(T_i^2 - T_r^2)^2 + \gamma_i \gamma_r T_i T_r (T_i^2 + T_r^2) + (\gamma_i^2 + \gamma_r^2) T_i^2 T_r^2} \quad . \quad (\gamma_i = \delta_i/\pi; \quad \gamma_r = \delta_r/\pi) \; .$$

Для оценки A_{ir} может использоваться приближенная формула (при $(T_i + T_r)/2 > 0{,}1$ с):

$$A_{ir} = \begin{cases} \dfrac{2\sqrt{\gamma_i \gamma_r}}{\gamma_i + \gamma_r} & \text{при} \quad \dfrac{2}{\pi\sqrt{\gamma_i \gamma_r}} \left| \dfrac{T_i}{T_r} - 1 \right| \le 0{,}5 \; ; \\ 0 & \text{при} \quad \dfrac{2}{\pi\sqrt{\gamma_i \gamma_r}} \left| \dfrac{T_i}{T_r} - 1 \right| > 0{,}5 \; . \end{cases}$$

При $(T_i + T_r)/2 \le 0{,}1$ с $A_{ir} \approx 1$.

Коэффициенты C_{irkl} зависят от вида взаимной спектральной плотности $G(\omega, x_k, x_l)$ ускорений в точках k, l.

В общем случае [13]

$$G(\omega, x_k, x_l) = G(\omega) R_{kl}(\omega),$$

где $R_{kl}(\omega) = \exp\left[-\dfrac{\omega}{v} |x_l - x_k| (c_1 + c_2 i) \right]$. Тогда $C_{irkl} \approx R_{kl}(p_{ir})$, $p_{ir} = (p_i + p_r)/2$.

Для наиболее характерного случая «замороженной волны» может использоваться аппроксимация

$$C_{irkl} \approx \cos\left(\frac{p_i + p_r}{2v} |x_l - x_k| \right) .$$

Для случая статистически независимых ускорений в точках k, l

$$C_{irkk} = 1 \; ; \quad C_{irkl} = 0 \quad (k \ne l) \; .$$

В случае полной корреляции сейсмических ускорений в точках k, l (при синфазном возмущении всех опор сооружения) $C_{irkl} = 1$, причем при отсутствии близких или кратных частот ($p_i \ll p_r$) в спектре собственных частот колебаний сооружения $A_{ii} = 1$, $A_{ir} = 0$ ($i \ne r$).

Тогда

$$\overline{x_j^2} = \sum_{i=1}^{N} p_i^{-4} \overline{\beta_i^2} \eta_{ij}^{*2} = \sum_{i=1}^{N} \overline{x_{ij}^2} \; , \tag{5.36}$$

где

$$\eta_{ij}^{*} = \sum_{k=1}^{n_0} \eta_{ikj} = \alpha_{ij} \sum_{k=1}^{n_0} Q_{ik}^{\circ} / M_i^{\circ} \; .$$

Этот случай соответствует принятому в нормативных документах, причем путем деления приведенного ускорения η_{ij}^{*} на стандарт ускорения σ можно сделать его безразмерным и привести к виду, принятому в нормах.

Для однопролетных симметричных сооружений ($n_0 = 2$) типа мостов пролетом L дисперсия перемещения в точке j может определяться по формуле [13]

$$\overline{x_j^2} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{r=1}^{N} p_i^{-2} p_r^{-2} \beta_i \beta_r A_{ir} \eta_{i1j} \eta_{r1j} \overline{\mu_{ir}^2} \; ,$$

где при $\eta_{i1j} = \pm \eta_{i2j}$; $\eta_{r1j} = \pm \eta_{r2j}$

$$\overline{\mu_{ir}^2} = 2\left[1 \pm \cos\left(\frac{p_i + p_r}{2v} L \right) \right] . \tag{5.37}$$

В случае $p_i \ll p_r$, $A_{ii}=1$, $A_{ir}=0$ $(i \neq r)$

$$\overline{x_j^2} = \sum_{i=1}^{N} p_i^{-4} \overline{\beta_i^2} \eta_{i1j}^2 \overline{\mu_i^2}, \tag{5.38}$$

где $\overline{\mu_i^2} = 2\left(1 \pm \cos p_i L/v\right)$

или

$$\begin{aligned} \mu_{i(+)} &= 2\cos\left(\pi L/v T_i\right); \\ \mu_{i(-)} &= 2\sin\left(\pi L/v T_i\right). \end{aligned} \tag{5.39}$$

Если $L/vT_i \to 0$, то $\mu_{i(+)} \to 2$, $\mu_{i(-)} \to 0$, $\eta_{ij}=2\eta_{i1j}$ и формула (5.38) приводится к виду (5.36). Формулы (5.37), (5.39) рекомендуются для расчета однопролетных сооружений при $0 \le L/vT_i \le 0{,}25$, а при $L/vT_i > 0{,}25$ может быть принято $\mu_i = \sqrt{2}$.

При определении стандартов сейсмических усилий в конструкциях (изгибающих моментов, поперечных и продольных сил) в формулах для η_{ikj}, η_{rlj} производится замена значений перемещений α_{ij}, α_{rj} на соответствующие им значения изгибающих моментов $\alpha_{ij}^{(M)}$, $\alpha_{rj}^{(M)}$, поперечных сил $\alpha_{ij}^{(Q)}$, $\alpha_{rj}^{(Q)}$ и других факторов. Например, $\eta_{ikj}^{(M)} = \alpha_{ij}^{(M)} Q_{ik}^{o} / M_i^{o}$, $\eta_{ikj}^{(Q)} = \alpha_{ij}^{(Q)} Q_{ik}^{o} / M_i^{o}$. Стандарты сейсмических сил при каждой i-й форме колебаний могут быть получены умножением стандартов перемещений на соответствующую жесткость, т.е. $S_{ij} = m_j p_i^2 x_{ij}$.

Особенностью протяженного сооружения является то, что кроме динамической реакции, вызванной действием сейсмических ускорений основания, в конструкциях возникают также квазистатические усилия, вызванные разностью сейсмических перемещений основания отдельных опор. При этом средний квадрат квазистатического перемещения точки j сооружения может определяться по формуле

$$\overline{x_{j(c)}^2} = \sum_{k,l=1}^{n_o} \varepsilon_{kj} \varepsilon_{lj} \sigma_{ok} \sigma_{ol} R_{kl},$$

где ε_{kj}, ε_{lj} – формы деформирования системы, т.е. перемещения точки j при единичных смещениях опор k, l, соответственно; σ_{ok}, σ_{ol} – стандарты перемещения основания опор k, l; R_{kl} – коэффициент взаимной корреляции перемещений основания опор k, l.

Для однопролетного симметричного сооружения при $\sigma_o = \text{const}$

$$\overline{x_{j(c)}^2} = \varepsilon_{1j}^2 \sigma_o^2 \overline{\mu_c^2},$$

где

$$\overline{\mu_c^2} = 2(1 \pm R_{12}) = 2(1 \pm \cos\theta_c L/v);$$

θ_c – частота сейсмических перемещений основания ($\theta_c \approx 1 \div 4c^{-1}$).

При определении стандартов сейсмических усилий в этом случае производится замена значений перемещений ε_{kl}, ε_{lj}, ε_{1j} на соответствующие значения изгибающих моментов $\varepsilon_{kj}^{(M)}$, $\varepsilon_{lj}^{(M)}$, $\varepsilon_{1j}^{(M)}$, поперечных сил $\varepsilon_{kj}^{(Q)}$, $\varepsilon_{lj}^{(Q)}$, $\varepsilon_{1j}^{(Q)}$ и других факторов при единичных смещениях опор k, l, 1, соответственно.

Средние квадраты общих перемещений (или усилий) определяются по формуле

$$\overline{x_{j(0)}^2} = \overline{x_j^2} + \overline{x_{j(c)}^2}.$$

Расчетные значения сейсмических перемещений или усилий определяются умножением их стандартов на коэффициенты обеспеченности r_i. Коэффициент

обеспеченности r_i (число стандартов), соответствующий вероятности $\tilde{p}$ непересечения реакцией системы определенного уровня в течение времени $\bar{t}$, может вычисляться по следующей приближенной формуле [17]:

$$r_i = \sqrt{2\ln\left\{2n_i\left[1-\exp\left(-\delta_e\sqrt{\pi\ln 2n_i}\right)\right]\right\}},$$

где

$$n_i = \frac{\Omega_i\bar{t}}{2\pi}\left(-\ln\tilde{p}\right)^{-1};$$

При $\tilde{p}=1/e$ n_i равно числу циклов колебаний системы; Ω_i – центральная частота процесса; при средних и низких частотах $\Omega_i \approx p_i$; при высоких частотах $\Omega_i \approx \theta$; δ_e – мера ширины спектра процесса; при средних и низких частотах $\delta_e \approx \sqrt{2\delta_i}/\pi$; при высоких частотах $\delta_e \approx \delta_i$.

Верхняя граница r_i соответствует большим значениям δ_e:

$$r_i^{\max} = \sqrt{2\ln 2n_i}.$$

При нестационарной модели воздействия учитывается зависимость δ_e от времени, т.е. вводится фиктивное затухание [17]

$$\delta_i(t) = \frac{\delta_i}{1-\exp\left(-\frac{\delta_i}{\pi}p_i t\right)}.$$

Кроме того, вводится длительность эквивалентной стационарной реакции t_0. При $p_i \to \infty$ $t_0 \to \bar{t}$, а при $\frac{\delta_i}{\pi}p_i\bar{t} \to 0$ $t_0 \to \bar{t}/e^2$.

Таким образом, коэффициенты обеспеченности при сейсмическом воздействии являются спектральными характеристиками, значения которых убывают с увеличением периода T_i (уменьшением частоты p_i) и уменьшением логарифмического декремента колебаний δ_i. В общем случае для получения расчетных значений, например, перемещений, в формулы типа (5.35), следует ввести под знак суммирования произведение $r_i r_r$.

В области малых периодов (высоких частот) значения r соответствуют отношению максимума ускорения $a_{\max}$ грунта на центральной частоте Ω к его стандарту, т.е. $r = r_0 = a_{\max}/\sigma$. Тогда, учитывая принятую в нормах трактовку коэффициента динамичности $\beta_i^{\text{н}}$, можно установить соотношение между $\beta_i^{\text{н}}$ и стандартом β_i:

$$\beta_i^{\text{н}} = \frac{r_i\sigma_{\ddot{x}_i}}{r_0\sigma} = \frac{r_i}{r_0}\beta_i,$$

причем $r_0 \approx 4$.

Увязка метода расчета, основанного на статистической концепции, с основными положениями норм легко осуществляется с помощью введения к расчетным значениям перемещений для усилий в конструкциях нормативных коэффициентов, позволяющих учитывать расчетные предельные состояния элементов конструкций.

5.5.4. Расчет резервуаров с жидким продуктом. Для хранения жидких продуктов в сейсмически активных районах широко применяют вертикальные и горизонтальные стальные цилиндрические резервуары, а также резервуары иной формы. Резервуары для хранения нефтепродуктов, сжиженных газов, водного аммиака, спирта и других, находятся, дополнительно к гидростатическому, под внутренним дав-

лением паров продукта. Резервуары, например, для хранения сжиженного бутана и пропана, проектируют с учетом возможного внутреннего давления до 1,9 МПа. В некоторых случаях в пустых резервуарах возможно действие пониженного в сравнении с атмосферным давления. Поэтому расчет резервуаров на сейсмику проводят с учетом внутреннего давления. Вместе с тем внутреннее статическое давление не влияет на динамику опорных конструкций.

Особенность расчета резервуаров с жидким продуктом на сейсмику состоит в том, что при землетрясении на конструкции действуют горизонтальные сейсмические нагрузки, обусловленные импульсивным гидродинамическим эффектом, вызванным движением части жидкости совместно с корпусом резервуара, и поверхностные волны, связанные с конвективным гидродинамическим эффектом. Существенное влияние на интенсивность и распределение сейсмических усилий могут оказывать податливость грунта основания и деформативность стенок, а также вероятность проскальзывания в основании резервуара. С учетом этих факторов в ЦНИИПСК разработаны методы расчета [16, 21, 26], реализованные в программах для компьютера.

В вертикальных резервуарах без плавающей крыши при горизонтальном сейсме возникает волна. При недостаточном свободном пространстве волна может выбить покрытие, что приведет к разгерметизации и выбросу продукта. В сферических и горизонтальных цилиндрических резервуарах удара волны о верхнюю часть конструкции не происходит – волна плавно набегает на стенки.

Резервуары для сейсмических районов рассчитываются на особое сочетание нагрузок, состоящее из постоянных, длительных, кратковременных и особой – сейсмической, с учетом системы коэффициентов, принятых в действующих нормах.

Расчет на прочность резервуаров (сосудов и аппаратов) из углеродистых и легированных сталей, применяемых в химической и нефтеперерабатывающей промышленности, работающих в условиях нагружения под внутренним давлением, вакуумом или внешним избыточным давлением, проводят с учетом требований норм [24].„ При этом используют номинальное допускаемое напряжение $[\sigma]$, определяемое соотношением

$$[\sigma] = \eta_{\min}\left\{\frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{n_т},\ \frac{R_m}{n_в}\right\},$$

где R_e (или $R_{p0,2}$) – минимальное значение предела текучести (или условного предела текучести) при расчетной температуре; R_m – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при расчетной температуре, $n_т$, $n_в$ – коэффициенты запаса прочности по пределу текучести и временному сопротивлению; η – поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям.

Для рабочих условий сосудов (резервуаров) из углеродистых и низколегированных сталей принимают $n_т = 1{,}5$, $n_в = 2{,}4$. Для сосудов и аппаратов групп 3, 4 по правилам «Устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» допускается принимать $n_в = 2{,}2$. Для аустенитных сталей для значения $R_{p0,2}$ принимают $n_т = 1{,}3$. Коэффициент $\eta = 1$ (за исключением стальных отливок, для которых принимают $\eta = 0{,}7$ и, в частности для отливок, подвергающихся индивидуальному контролю неразрушающими методами, $\eta = 0{,}8$).

Наибольшее распространение получили цилиндрические вертикальные и горизонтальные резервуары. Горизонтальные резервуары устанавливают на опорные металлоконструкции, закрепляемые к фундаменту фундаментными болтами. Наиболее часто в расчетах деформациями резервуара пренебрегают, принимая расчетную схему – «жесткий цилиндр – податливая, упругая опорная конструкция». Максимальная сейсмическая нагрузка на опоры возникает при полном заливе емкости.

При расчете вертикальных резервуаров обычно деформациями обечаек также пренебрегают. Жидкость считается идеальной. Расчет ведется на особое сочетание нагрузок, в котором сейсмические нагрузки определяются независимо для горизонтального и вертикального сейсмов. Гидродинамические давления от вертикального сейсма принимают равными гидростатическим, умноженным на коэффициент динамичности. При горизонтальном сейсме и отсутствии плавающей крыши определяют высоту волны, которая не должна превышать расстояния до покрытия, и распределение гидродинамических давлений на стенки и днище резервуара.

Расчет прочности стенки и днища проводят на суммарные нагрузки от гидростатического, внутреннего статического и гидродинамических давлений с учетом коэффициентов сочетаний. При определении расчетных напряжений учитывают действие горизонтальных гидродинамических сил, сейсмических сил, соответствующих массам металлоконструкций, теплоизоляции и снега, а также моментные напряжения от краевого эффекта в зоне примыкания нижней обечайки к днищу.

Для вертикальных незакрепленных резервуаров проводят проверку устойчивости на опрокидывание. Подробно методы расчета резервуаров на сейсмику приведены в работах [3, 16, 20, 21, 26]. Методы расчета прочности резервуаров, работающих под давлением, которые следует учитывать при динамических расчетах, содержатся в [3, 16, 23 - 25].

Комплексный расчет вертикальных цилиндрических резервуаров с жидким продуктом при различных уровнях налива и свойствах продукта на действие горизонтальных и вертикальных сейсмических нагрузок с учетом гидростатического давления и подпора можно выполнить по программе REZER для компьютера, разработанной в ЦНИИПСК. В программу заложена информация о параметрах различных жидких продуктов, сталях, применяемых в резервуаростроении, а также обязательные нормативные параметры. В исследовательских целях используется программный комплекс EFFECT для полного моделирования процесса волнообразования и нагружения резервуара с жидким продуктом [16]. На вход программы подаются реальные или синтезированные акселерограммы [11], нормированные на заданную сейсмичность.

5.6. Расчет сооружений на действие аварийных нагрузок

Динамический расчет металлоконструкций сооружений на действие аварийных нагрузок представляет сложную задачу. Широкое применение вычислительной техники позволяет ориентировать ее решение на численные методы, реализуемые на ЭВМ. Наибольшее распространение получили методы дискретных, конечных и граничных элементов. В основу этих методов положена идея расчленения системы, схематизирующей объект, на элементы, для которых выписывают уравнения динамического равновесия, совместности деформаций и реологические соотношения, характеризующие механические свойства материалов. Особую роль здесь играет реология материалов, поскольку при интенсивных динамических нагрузках реализация запасов прочности конструкций возможна лишь при учете физических нелинейностей и, в частности, временны́х эффектов деформирования конструкционных сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Адушкин В.В, Когарко С.М., Лямин А.Г.** Расчет безопасных расстояний при газовом взрыве в атмосфере. – Взрывное дело, № 32/75. –М.: Недра, 1975.
2. **Болотин В.В.** Статистические методы в строительной механике. М.: Стройиздат, 1965.

3. **Бирбраер А.Н., Шульман С.Г.** Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. **Котляревский В.А., Ганушкин В.И., Костин А.А.** и др. Убежища гражданской обороны. Конструкции и расчет. – М.: Стройиздат, 1989.
5. **Котляревский В.А.** Волны деформаций в упругопластическом стержне при продольном ударе // Проблемы прочности. – 1981. – № 1.
6. **Котляревский В.А.** Механические характеристики малоуглеродистой стали при импульсивном нагружении с учетом запаздывающей текучести и вязкопластических свойств // ПМТФ. – 1961, – № 6.
7. **Котляревский В.А., Райнин И.М.** Расчет стальных каркасов зданий и сооружений на действие взрывных, ударных и сейсмических нагрузок // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990 г. – №5. Информац. листок МГЦНТИ № 72–87. – М.: 1987.
8. **Котляревский В.А.** Динамический расчет балки за пределом упругости с учетом эффектов скоростного деформирования // Строительная механика и расчет сооружений. – 1979. – № 6.
9. **Котляревский В.А.** Упруговязкопластические волны в материале с запаздывающей текучестью // ПМТФ. – 1962. – № 3.
10. **Котляревский В.А.** Пакет программ для динамического расчета металлоконструкций // Строительство и архитектура. Сер.3. Проектирование металлических конструкций. Научно–технич.реф. сб. Вып.4. –М.: 1981.
11. **Котляревский В.А.** Статистическое моделирование сейсмических воздействий на сооружения // Строительная механика и расчет сооружений. – 1988. – № 3.
12. **Петров А.А.** Вероятностная оценка нормируемых параметров сейсмической реакции сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – № 1.
13. **Петров А.А.** Вероятностный метод оценки сейсмической реакции мостов с большими пролетами // Сейсмостойкость транспортных и сетевых сооружений. – М.: Наука, 1986.
14. **Петров А.А.** Учет влияния масштабов турбулентности при определении реакции сооружения на пульсационное воздействие ветра // Строительная механика и расчет сооружений. – 1991. – № 3.
15. **Petrov A.A.** The analytical model for along-wind motion of tall structures. – East European Conference on Wind Engineering. EECWE'94, 4–8 July 1994, Warsaw, Poland, P.1, v.3.
16. **Котляревский В.А.** и др. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн.1 – 1995, кн.2 – 1996, кн.3 – 1997. – М.: изд-во АСВ.
17. Сейсмический риск и инженерные решения. – М.: Недра, 1981.
18. **Симиу Э., Сканлан Р.** Воздействие ветра на здания и сооружения. – М.: 1984.
19. **Суворова Ю.Б.** Запаздывание текучести в сталях // ПМТФ. – 1968. – № 3.
20. **Гольденблат И.И., Николаенко Н.А.** Расчет конструкций на действие сейсмических и импульсивных сил. – М.: Госстройиздат, 1961.
21. **Петров А.А.** Оценка сейсмической реакции резервуаров с жидкостью. // Промышленное и гражданское строительство, 1993, № 5.
22. Справочник по динамике сооружений. – М.: Стройиздат, 1972.
23. Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование. – М.: Машиностроение, 1989.
24. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. ГОСТ 14249–89. –М.: Изд.стандартов, 1989.
25. **Котляревский В.А.** Статическое моделирование динамики подвесных энергетических систем при сейсмических нагрузках. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика и техника ядерных реакторов. НИКИЭТ. – 1984. – вып.1 (38).
26. **Petrov A.A.** Approximate seismic response analysis of liquid storage tanks. – Proceedings 10th European Conference on Eearthquake Engineering. 28 August – 2 September 1994, Vienna, Austria – A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1995.
27. Вибрации в технике, т.1, 1978, т.5, 1981, т.6, 1981, – М.: Машиностроение.
28. **Petrov A.A.** Seismic response of extended systems to multiple support excitations. – Proceedings of 11 World Conference on Eearthquake Engineering. June 23 – 28, 1996, Acapulco, Mexico – Elsevier Science, 1996, № 1451 (CD ROM).
29. **Котляревский В.А.** Расчет на динамические нагрузки и сейсмику энергетических установок с подвесными агрегатами. // Сб. Трудов «Разработка методов расчета и исследование действительной работы строительных металлоконструкций». ЦНИИПСК. - 1983.

РАЗДЕЛ III

УЧЕТ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРЕБОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТИРОВКИ, МОНТАЖА И ЭКОНОМИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

ГЛАВА 6

ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИХ НА ЗАВОДЕ

6.1. Общие понятия и условия технологичности

Технологичность стальных конструкций определяется степенью подготовленности конструкций для изготовления и монтажа современными прогрессивными методами при оптимальных затратах материальных, трудовых и энергетических ресурсов соответствующего типа производства [1]. Повышение технологичности конструкций – важнейшее условие, обеспечивающее наиболее простое, быстрое и экономичное изготовление, транспортирование и монтаж конструкций, а также надежную эксплуатацию конструкций.

Обеспечение технологичности конструкций должно осуществляться в процессе:

- конструктивно-технологической разработки рабочих чертежей (КМ) с учетом требований изготовления, монтажа металлоконструкций, а также рекомендаций по эксплуатации [2];
- оценки технологичности проектов КМ металлоконструкций в соответствии со стандартом предприятия СТП 104.2-39-85 [1];
- экспертизы проектов КМ и разработки чертежей КМД непосредственно на заводах металлоконструкций.

Технологичность металлических конструкций характеризуется нижеприведенными критериями:

1) применением *прогрессивных профилей* металлопроката, в том числе: широкополочных двутавров и тавров с параллельными гранями полок; гнутосварных замкнутых профилей; холодногнутых профилей швеллерного, корытного, С-образного и зетового сечений. Конструктивные решения с использованием этих профилей обеспечивают уменьшение стоимости, вследствие экономии расхода стали при одновременном снижении трудоемкости изготовления;

2) применением оптимального количества типоразмеров металлопроката. При разработке проектов КМ следует иметь в виду, что величина отходов металла составляет 5–7 %, в том числе металлолома 3,5–4,5 %. Для изготовления листовых деталей шириной более 2000 мм и длиной 12000 мм и более на ряде заводов имеются поточные линии, включающие правку, поперечную стыковку и сварку;

3) применением *эффективных марок*, а также надлежащих групп, категорий и нормируемых показателей сталей, оценивая возможность снижения стоимости и расхода металлопроката при одновременном увеличении трудоемкости изготовления;

4) обновлением номенклатуры конструкций *прогрессивными конструктивными решениями* (узлы с бесфасоночными соединениями, односторонние угловые швы, монтажные узлы с передачей усилий через фрезерованные торцы, сокращение количества основных и вспомогательных деталей, совмещение несущих и ограж-

дающих функций, уменьшение массы наплавленного металла). К таким конструктивным решениям относятся:

- стропильные фермы с поясами и решеткой из широкополочных двутавров, гнутосварных замкнутых профилей, одиночных уголков, широкополочных тавров, труб. В этих конструкциях узловые соединения поясов и решетки ферм применяются бесфасоночные «впритык»;
- двухветвевые колонны с бесфасоночными соединениями решетки «внахлестку»;
- балки из листовой стали с односторонними ребрами жесткости, односторонними сварными швами, гофрированными стенками малой толщины;
- оболочечные пролетные строения транспортерных галерей из листовой стали;
- подкрановые балки с уширенным верхним поясом без тормозных настилов;
- стропильные фермы и прогоны с соединениями на точечной сварке взамен фланговых швов;

5) повышением степени заводской готовности. Одним из главных направлений развития технологии изготовления и монтажа строительных стальных конструкций является превращение процесса монтажа зданий и сооружений в процесс скоростной сборки из крупноразмерных элементов повышенной заводской готовности. Уровень заводской готовности конструкций оценивается конструктивными решениями, обеспечивающими минимальные сроки монтажа, затрат труда и стоимости монтажа конструкций.

Повышение заводской готовности отправочных элементов обеспечивается:

- применением болтовых монтажных соединений взамен сварных. Низкая эффективность сварных монтажных соединений по сравнению с болтовыми вызвана рассредоточением монтажной сварки по многим узлам с незначительными объемами работ. Это приводит к значительной трате времени на организацию рабочих мест, подъем и подход к ним, спуск на землю сварщиков.

  Постановка же болтов в монтажных соединениях выполняется монтажником после установки монтажных элементов, без потерь времени. Кроме того, геометрическая форма сооружения с болтовыми монтажными соединениями обеспечивается на заводе-изготовителе конструкций совмещением отверстий в монтируемом сооружении, что сокращает работы по его выверке и геодезическому контролю на строительной площадке. Наиболее эффективными монтажными соединениями на высокопрочных болтах являются фланцевые, так как: их количество по сравнению с фрикционными сокращается в 3–6 раз (в зависимости от вида конструкций); исключаются операции по подготовке контактных поверхностей; уменьшается количество и масса стыковых элементов монтажного узла; отсутствуют отверстия в тяжелых основных деталях отправочных элементов (поясах ферм, стволах колонн, балках);
- выполнением максимального количества и объемов технологических операций по сборо-сварке конструкций на заводе в процессе изготовления конструкций блоками, прошедшими общую сборку, длиной 13,5 м – 21,2 м и свыше 21,2 м;
- выполнением противокоррозионной защиты металлоконструкций, включающей в себя механизированную дробеметную очистку металлопроката и его консервирование, грунтование и окрашивание двумя слоями, что исключает необходимость окраски на монтаже;

6) максимальной типизацией конструктивных элементов и нормализацией деталей по стандартам заводов-изготовителей. Это обеспечивает серийное и массовое производство, включающее применение автоматизированного оборудования для изготовления деталей, механизированного и нестандартизированного оборудования и кондукторов для сборо-сварки конструктивных элементов;

7) рациональной разбивкой конструкций на транспортабельные отправочные элементы;

8) применением конструктивных решений, при которых сварные швы и болтовые соединения доступны и удобны для производства работ, а также для контроля качества в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации сооружения;

9) отсутствием в сварных конструкциях несимметричных сечений или несимметричного расположения сварных швов относительно нейтральной оси, пересечения и концентрации швов. Это обеспечит минимальные остаточные сварочные напряжения и деформации и исключит необходимость их устранения;

10) полной собираемостью стальных конструкций на монтаже, исключающей необходимость подгоночных работы. Это в значительной мере зависит от наличия в чертежах КМ указаний функциональной точности и наличия их значений в чертежах КМД, исключающих возможность назначения вариантных значений допусков в процессе изготовления конструкций.

6.2. Показатели технологичности стальных конструкций

Для строительных стальных конструкций основными показателями технологичности являются: трудоемкость изготовления и монтажа, т.е. затраты труда для выполнения технологических процессов заводом-изготовителем и монтажной организацией, измеренная в чел.-ч; себестоимость конструкций в деле, включающая стоимость изготовления, транспортировки и монтажа. В настоящее время принято относить трудоемкость к единице массы конструкции (1т). Однако этот показатель не является универсальным Расчетные значения трудоемкости для данного проекта сравнивают с базисными показателями трудоемкости.

Для определения базисного показателя трудоемкости конкретного завода металлоконструкций следует использовать выражение

$$T_{\text{и}}^{\text{б}} = KT_{\text{и}}^{\text{о}}, \qquad (6.1)$$

где $T_{\text{и}}^{\text{б}}$ – базисный показатель трудоемкости; $T_{\text{и}}^{\text{о}}$ – показатель трудоемкости изготовления стальных конструкций, принятый за единицу ($K=1$), в условиях конкретного завода металлоконструкций (этот показатель определяется сравнением заводских затрат труда для конкретного вида конструкций с прейскурантом № 01–22–29); $K_{\text{т}}$ – коэффициент трудоемкости по прейскуранту № 01–22–29 [3].

Например, при $T_{\text{и}}^{\text{о}}=10$ чел.-ч базисная трудоемкость изготовления основных несущих конструкций каркасов одноэтажных зданий с мостовыми кранами грузоподъемностью до 50 т, пролетами до 36 и при шаге колонн до 12м, с применением профилированного настила в покрытии, расходом стали на 1м^2 в интервале 100 – 150 кг $K_{\text{т}}=1{,}63$ (поз.3, таблица базисных цен на строительные стальные конструкции, изготовляемые по индивидуальным проектам – чертежам КМ, прейскуранта № 01–22–29) будет

$$T_{\text{и}}^{\text{о}} = 1{,}63 \cdot 10 = 16{,}3 \text{ чел.-ч}$$

Если принятая в проекте марка стали отличается от указанного в прейскуранте № 01–22–29, то в приведенные в нем коэффициенты трудоемкости $K_{\text{т}}$ следует добавить базисный коэффициент трудоемкости по табл. 6.6.

6.3. Методика определения трудоемкости изготовления конструкций

Трудоемкость изготовления стальных конструкций оценивается затратами труда на выполнение основных технологических операций (изготовление деталей, сбор-

ка, сварка, окраска). Трудоемкость вспомогательных операций является практически постоянной величиной. Показатели проекта металлических конструкций, характеризующие их трудоемкость, можно разбить на две группы: 1) сооружения в целом, отнесенные на площадь здания; 2) отдельного конструктивного элемента или всего каркаса здания на единицу массы (удельная трудоемкость). Эти показатели трудоемкости используются при: оценке создаваемых конструкций с точки зрения рациональности изготовления, сопоставляя показатели трудоемкости с фактическими затратами труда на производстве; проектировании вновь строящихся и реконструируемых заводов.

Трудоемкость изготовления строительных конструкций, определяемая по деталировочным чертежам (КМД), используется для:

- обоснования основных технико-экономических показателей проектируемых предприятий, численности и выпуска конструкций на одного производственного рабочего, количества необходимого оборудования;
- определения экономической эффективности от внедрения более прогрессивных технологических процессов, средств механизации, форм и методов организации работы и труда;
- оперативного планирования в составе производственных месячных программ и недельных графиков.

В процессе проектирования строительных стальных конструкций, когда технология изготовления деталей, сборки и сварки элементов конструкций еще детально не проработана, трудоемкость может быть определена ориентировочно по эмпирическим зависимостям. В настоящее время имеются три способа определения трудоемкости строительных стальных конструкций:

- по методике расчета норм трудоемкости изготовления металлоконструкций промышленных зданий, пролетных строений мостов, опор линий электропередач, разработанной ЦНИИПСК [4, 5];
- по комплексным нормативам затрат труда на, изготовление типопредставителей конструктивных элементов промышленных зданий, эстакад, трубопроводов, площадок, лестниц, ограждений, разработанным ВНИКТИСКом [6–9];
- в составе оптовых цен на, строительные стальные конструкции, разработанных ВНИКТИСтальконструкцией, где даны: коэффициенты трудоемкости изготовления конструктивных элементов; дополнительные показатели технологичности стальных конструкций (см. п. 6.4).

Методика определения трудоемкости изготовления металлических конструкций промышленных зданий, разработанная ЦНИИПСК [5], исходит из технологического подобия конструкций трех групп:

- сплошные конструкции (колонны сплошные, подкрановые балки, стойки фахверка, опорные стойки, ригели, растяжки, распорки, связи простые, прогоны сплошные);
- сквозные (решетчатые) конструкции (стропильные и подкрановые фермы, связи решетчатые, прогоны решетчатые, лестницы);
- комбинированные конструкции – с наличием признаков сплошных и решетчатых конструкций (двух- и четырехветвевые колонны, различные пространственные конструкции).

При проектировании трудоемкость изготовления определяется ориентировочно по эмпирическим зависимостям (с погрешностью до 15 %) с помощью параметров, характеризующих конструкции в процессе производства. В качестве параметров приняты: m – масса конструкций 200–20000 кг; $l_{св}$ – длина сварных швов 0,1–200 м,

приведенных к катету 6 мм; n – число деталей в конструкции 1–200 шт; s – число одновременно изготовляемых элементов (серийность) 1,5 –15,5 шт.

Для приведения сварных швов к катету 6 мм используются переводные коэффициенты в соответствии с ГОСТ 5264–80*, ГОСТ 8713–79* и ГОСТ 14771–76* на швы угловые и стыковые соединений (без разделки кромок, с Х-образной и Y-образной разделками). Виды сварки предусмотрены: ручная, полуавтоматическая в CO_2 , автоматическая под флюсом; катеты швов угловых соединений 4 –20 мм; для стыковых соединений – 2 – 60 мм [5].

Общая трудоемкость проектируемой конструкции T определяется по удельной трудоемкости по формуле

$$T = mt / 1000, \tag{6.2}$$

где m – чистая масса изделия, кг; t – удельная трудоемкость однотипной конструкции, чел.-ч/т.

Удельная трудоемкость изготовления определяется по формуле

$$t = am^{b_1} l_{св}^{b_2} n^{b_3} . \tag{6.3}$$

Значения коэффициентов и показателей степеней b_1, b_2, b_3 приведены в табл.6.1.

Таблица 6.1. Коэффициент и показатель степеней

Элементы конструкций	a	b_1	b_2	b_3
Сплошные конструкции:				
подкрановые балки	13,59	-0,119	0,061	0,013
тормозные балки	21,48	-0,174	0,004	0,009
ригели	126,49	-0,515	-0,031	0,043
растяжки	66,09	-0,363	0,014	-0,013
распорки	52,24	-0,312	0,002	-0,005
Сквозные конструкции:				
стропильные фермы	100,54	-0,478	0,237	0,056
тормозные фермы	528,01	-0,336	0,014	-0,683
связи решетчатые	202,46	-0,498	0,091	0,009
лестницы	72,53	-0,287	0,001	0,003
Комбинированные конструкции:				
колонны	48,50	-0,467	0,356	0,089

Удельная трудоемкость изготовления, рассчитанная по этой формуле, представлена в виде таблиц для: подкрановых балок, ригелей, растяжек, распорок, связей простых, прогонов сплошных, стоек фахверка, опорных стоек, ферм стропильных, тормозных ферм, связей решетчатых, прогонов решетчатых, лестниц, колонн.

В каждой таблице удельная трудоемкость дана на различную серийность и длину сварных швов. Примером этого является табл.6.2.

Методикой предусмотрена возможность определения удельной трудоемкости изготовления по основным переделам технологического процесса (заготовительных, сборочных, сварочных и окрасочных работ). Так, удельная трудоемкость заготовительных работ определяется по формуле

$$t_1 = am^{b_1} s^{b_2} \tag{6.4}$$

(значения a, b_1, b_2 приведены в табл.6.3).

По аналогичным формулам находятся удельные трудоемкости сборочных, сварочных и окрасочных работ.

Таблица 6.2. Фермы стропильные (отправочные марки)

Число деталей, шт	Удельная трудоемкость изготовления, чел.-ч/т, $m = 1$ т, $s = 1$ шт, при длине сварных швов, м																	
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
30	10,02	10,73	11,31	11,81	12,25	12,64	13	13,32	13,63	13,91	14,18	14,43	14,67	14,89	15,11	15,31	15,51	15,7
40	10,18	10,9	11,49	12	12,44	12,84	13,21	13,54	13,85	14,14	14,41	14,66	14,91	15,13	15,35	15,56	15,76	15,96
50	10,31	11,04	11,64	12,15	12,6	13,01	13,37	13,71	14,02	14,32	14,59	14,85	15,09	15,33	15,55	15,76	15,96	16,16
60	10,42	11,15	11,76	12,27	12,73	13,14	13,51	13,85	14,17	14,46	14,74	15	15,25	15,48	15,71	15,92	16,13	16,32
70	10,51	11,25	11,86	12,38	12,84	13,25	13,63	13,97	14,29	14,59	14,87	15,13	15,38	15,62	15,84	16,06	16,27	16,46
80	10,59	11,33	11,95	12,47	12,94	13,35	13,73	14,08	14,4	14,7	14,98	15,24	15,5	15,77	15,96	16,18	16,39	16,59
90	10,66	11,41	12,03	12,56	13,02	13,44	13,82	14,17	14,49	14,8	15,08	15,35	15,6	15,84	16,07	16,29	16,5	16,7
100	10,72	11,47	12,1	12,63	13,1	13,52	13,9	14,25	14,58	14,88	15,17	15,44	15,69	15,93	16,16	16,38	16,59	16,8
110	10,78	11,54	12,16	12,7	13,17	13,59	13,98	14,33	14,66	14,96	15,25	15,52	15,77	16,02	16,25	16,47	16,68	16,89
120	10,83	11,59	12,22	12,76	13,23	13,66	14,05	14,4	14,73	15,04	15,32	15,59	15,85	16,1	16,33	16,55	16,76	16,97
130	10,88	11,64	12,28	12,82	13,29	13,72	14,11	14,47	14,8	15,1	15,39	15,67	15,92	16,17	16,4	16,63	16,84	17,05
140	10,92	11,69	12,33	12,87	13,35	13,78	14,17	14,53	14,86	15,17	15,46	15,73	15,99	16,24	16,47	16,69	16,91	17,12
150	10,96	11,74	12,37	12,92	13,4	13,83	14,22	14,58	14,91	15,23	15,52	15,79	16,05	16,3	16,53	16,76	16,98	17,18
160	11	11,78	12,42	12,97	13,45	13,88	14,27	14,63	14,97	15,28	15,57	15,85	16,11	16,36	16,59	16,82	17,04	17,25
170	11,04	11,82	12,46	13,01	13,5	13,93	14,32	14,68	15,02	15,33	15,63	15,9	16,16	16,41	16,65	16,88	17,09	17,3
180	11,08	11,86	12,5	13,05	13,54	13,97	14,37	14,73	15,07	15,38	15,68	15,95	16,22	16,47	16,7	16,93	17,15	17,36
190	11,11	11,89	12,54	13,09	13,58	14,02	14,41	14,78	15,11	15,43	15,72	16	16,27	16,52	16,75	16,98	17,2	17,41
200	11,14	11,93	12,58	13,13	13,62	14,06	14,45	14,82	15,16	15,47	15,77	16,05	16,31	16,56	16,8	17,03	17,25	17,46

Таблица 6.3. Значения a, b_1, b_2

Элементы конструкций	a	b_1	b_2
Стропильные фермы	19,29	-0,210	-0,025
Колонны	8,27	-0,086	-0,108
Подкрановые балки	4,07	-0,030	-0,002

Трудоемкость по отдельным операциям технологического процесса «обработки» может быть определена в процентном отношении к общей трудоемкости передела «обработки» по формуле

$$T_{оп} = T_{об}П / 100, \qquad (6.5)$$

где $T_{об}$ – трудоемкость изготовления по переделу «обработки»; П – процент на данную операцию.

Методикой предусмотрено определение удельной трудоемкости изготовления, когда известна только масса изделия, по формуле

$$t = am^{b_1}, \qquad (6.6)$$

где m – масса, тыс.кг; a, b_1 – коэффициенты по табл.6.4.

Таблица 6.4. Значения коэффициентов a, b_1

Элементы конструкций	a	b_1
Сплошные:		
подкрановые балки	11,52	-0,056
тормозные балки	39,13	-0,229
опорные стойки	70,93	-0,390
ригели	130,56	-0,520
растяжки, прогоны	60,5	-0,350
связи	23,19	-0,180
стойки фахверка	47,87	-0,190
Сквозные:		
стропильные фермы	85,72	-0,287
тормозные фермы, связи и прогоны	156,5	-0,413
Комбинированные:		
колонны	44,73	-0,199

Для практического применения рекомендуется пользоваться построенными по этой формуле графиками, в которых предусмотрена зависимость трудоемкости от количества деталей, длины сварных швов.

Определение трудоемкости изготовления конструкций годовой программы ЗМК в целом и по всем переделам и операциям, предусмотренное методикой ЦНИИПСК с помощью ЭВМ, требует подготовки исходных данных для расчета и выявления диапазона их изменений в следующем составе:

- перечень изготавливаемых металлических конструкций, число конструкций каждого типа;
- коэффициенты и степени уравнений трудоемкости изготовления каждого типа конструкций;
- характеристики металлоконструкций: масса, длина сварных швов и число деталей;
- процент трудоемкости изготовления металлоконструкций на каждой операции по переделу «обработки»;
- годовой выпуск продукции по каждому типу конструкций.

Определение комплексных нормативов затрат труда на изготовление типопредставителей конструктивных элементов приведено в ВСН 393–78/ММСС СССР, разработанных ВНИКТИСтальконструкцией [6]. Нормативы затрат труда рассчитаны нормированием карт технологических процессов, разработанных для 24 ти-

попредставителей конструктивных элементов промышленных зданий (в том числе: 6 колонн, 2 монорельса, 3 подкрановых балки, 1 тормозная ферма, 3 фермы, 2 прогона и связи, 1 фонарь, 3 ригеля и балки, 1 щит, 1 площадка, 1 лестница), исходя из прогрессивной технологии изготовления конструкций, применения высокопроизводительного оборудования, прогрессивных форм организации и управления производством.

Нормативы затрат труда на технологические операции изготовления полуфабриката определяются по табличным данным (в % норматива изготовления полуфабриката) [6]. В таблице предусмотрены затраты труда на шесть видов операций правки; пять – по наметке, разметке и изготовлению шаблонов; шесть – по газовой резке; шесть – по механической резке; пять – по строжке; три – по фрезеровке; шесть – по образованию отверстий; пять – по гибке; один – по штамповке; два – по зачистке от грата; один – по набивке плавки.

Нормативы затрат труда приведены в графиках для каждого типопредставителя. Так, на колонну одноветвевую со сплошной стенкой, сварную, с постоянным или переменным сечением (шифр 10.100) в карте № 1 представлены (рис.6.1):

- график общих затрат труда, чел.-ч/т, изменявшийся в зависимости от массы колонны;
- таблица удельной трудоемкости при массе 1 т, чел.-ч. (табл.6.5);
- оборотная сторона карты с графиками затрат труда для переделов изготовления полуфабрикатов, слесарно-сборочных работ и электросварочных работ (рис.6.2). Нормативы затрат труда на прочие работы определяют вычитанием затрат труда на изготовление полуфабриката, слесарно-сборочные, электросварочные, малярные работы из общего норматива.

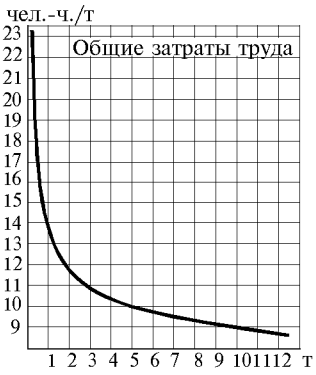
Конструктивный элемент	Типопредставитель	Шифр	№ карты
Колонна	Одноветвевая со сплошной стенкой, сварная с постоянным или переменным сечением 	10.100	1

Рис.6.1. График общих затрат, изменяющихся в зависимости от массы колонны

Таблица 6.5. Удельная трудоемкость отдельных видов работ при массе 1 т, чел-ч

Параметр зависимости	Всего	Из них для видов работ		
		изготовление полуфабриката	слесарно-сборочных	электро-сварочных
а) – удельная трудоемкость при массе 1 т, чел.=ч	14,19	5,050	3,440	4,680
б) – степень зависимости	0,191	0,130	0,332	0,164

6.4. Дополнительные показатели технологичности стальных конструкций

Дополнительные показатели технологичности в прейскуранте №01–22–29 [3] определены в виде надбавок к базисным коэффициентам трудоемкости, которые приведены ниже.

1. Замена марок стали в соответствии с требованиями (проекта) чертежей КМ (табл.6.6).

2. Защита металлоконструкций от коррозии (табл.6.7).

3. Пакетирование и упаковка конструкций, общая сборка конструкций, изготовление конструкций при температуре ниже минус 40°С, изготовление конструкций при массе сборочной единицы свыше 20 т (табл.6.8).

4. Серийность изготовления (табл.6.9).

5. Изготовление конструкций с монтажными соединениями на болтах (табл. 6.10), с повышенной точностью на экспорт в соответствии с ОСТ 36–77 (табл.6.11).

6. Подготовка поверхностей трения в сдвигоустойчивых соединениях на высокопрочных болтах (табл.6.12).

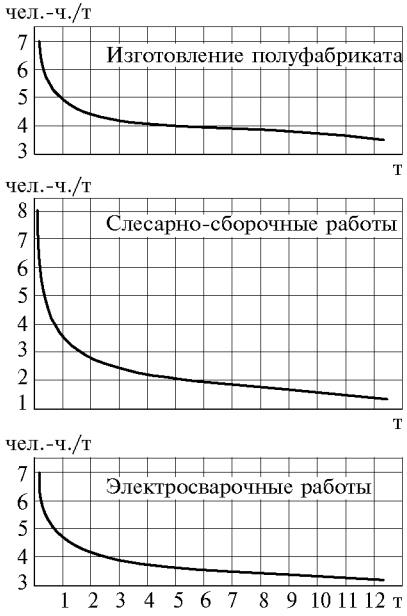


Рис.6.2. График затрат труда переделов изготовления полуфабрикатов, слесарносборочных работ, электросварочных работ

Таблица 6.6. Надбавки к базисному коэффициенту трудоемкости в зависимости от марки стали

Сталь марки	ГОСТ, ТУ	Надбавки на 1 т к базисному коэффициенту трудоемкости
С235 Ст3кп2	ГОСТ 27772-88* ГОСТ 380-71**	База
С245 Ст3пс6	ГОСТ 27772-88* ГОСТ 380-71**	0,03
С255 Ст3сп5 Ст3Гпс6 Ст3Гсп5	ГОСТ 27772-88* ГОСТ 380-71** ГОСТ 380-71** ГОСТ 380-71**	0,06
С275 Ст3пс6-2	ГОСТ 27772-88* ТУ 14-1-3023-80	0,12
С285 Ст3сп5-2 Ст3Гпс6-2 Ст3Гсп5-2	ГОСТ 27772-88* ТУ 14-1-3023-80 ТУ 14-1-3023-80 ТУ 14-1-3023-80	0,18
С345-2 09Г2С-6	ГОСТ 27772-88* ГОСТ 19281-89*	0,36
С345-3 09Г2С-12	ГОСТ 27772-88* ГОСТ 19281-89	0,36
С345-4 09Г2С-15	ГОСТ 27772-88*	0,36
С390 14Г2АФ	ГОСТ 27772-88*	0,51
С440 16Г2АФ	ГОСТ 27772-88*	0,69

Таблица 6.7. Надбавки к базисному коэффициенту трудоемкости на антикоррозионную защиту

Технологическая операция	Надбавки на 1 т к базисному коэффициенту трудоемкости
Подготовка поверхности	
Очистка щетками и обезжиривание	База
Очистка II степени ГОСТ 9.402-80 (дробеструйная очистка)	0,35
Притупление кромок (обязательная операция для конструкций, эксплуатируемых в средне- и сильноагрессивных средах и на экспорт)	0,4
Грунтование за каждый слой	
ГФ-021 или покрытие цементным молоком	База
ФЛ ОЗК	0,01
ЭП-00-10	0,02
Окрашивание (за каждый слой)	
Эмаль ПФ-1189, ПФ-115, ПФ-133, ИЛ-12	0,2
Краска МА-011	0,2
Лак БТ-577	0,2
Горячее цинкование при толщине слоя не менее 80 мкм	1,31

Примечание. В надбавках учтена подготовка к защите от коррозии поверхности площадью до 25 м^2 на 1 т конструкций. При превышении расчетной площади повышающий коэффициент определяется делением фактической площади на 25.

Таблица 6.8. Надбавки к базисному коэффициенту трудоемкости за счет других видов работ

Дополнительные требования	Надбавки на 1 т к базисному коэффициенту трудоемкости
Сборка в пакеты (без стоимости крепления)	0,06
Упаковка в тару	0,1
Общая сборка каждого изделия с установкой сборочных приспособлений	0,2 $K_т^б$
Изготовление конструкций при массе сборочной единицы свыше 20 тонн	0,3 $K_т^б$
Изготовление конструкций для эксплуатации при температуре ниже минус 40°С	0,15 $K_т^б$

Таблица 6.9. Влияние объемов изготовления на трудоемкость

Средний объем изготовления конструкций в квартал, т	Надбавки на 1 т к базисному коэффициенту трудоемкости
До 25	+0,4 $K_т^б$
Св. 25 до 50	+0,35 $K_т^б$
Св. 50 до 100	+0,25 $K_т^б$
Св. 100 до 200	+0,09 $K_т^б$
Св. 200 до 300	0
Св. 300 до 500	–0,045 $K_т^б$
Св. 500	–0,090 $K_т^б$

Масса метизов по отношению к общей массе объекта, %	Табл.6.10		Табл.6.11	
	Надбавки к базисному коэффициенту трудоемкости		Надбавки к базисному коэффициенту трудоемкости	
	$d_0-d_б \geq 3$мм	1 мм$< d_0-d_б <$ 3мм	$d_0-d_б \geq 3$мм	1 мм$< d_0-d_б <$ 3мм
До 0,5	0	0,15 $K_т^б$	0,15 $K_т^б$	0,33 $K_т^б$
Св. 0,5 до 1	0,09 $K_т^б$	0,24 $K_т^б$	0,26 $K_т^б$	0,56 $K_т^б$
Св. 1 до 1,5	0,15 $K_т^б$	0,3 $K_т^б$	0,33 $K_т^б$	0,73 $K_т^б$
Св. 1,5 до 2	0,2 $K_т^б$	0,35 $K_т^б$	0,4 $K_т^б$	0,85 $K_т^б$
Св. 2	0,3 $K_т^б$	0,45 $K_т^б$	0,5 $K_т^б$	1,10 $K_т^б$

Примечания. d_0 – диаметр отверстия, мм; $d_б$ – диаметр болта, мм.

Таблица 6.12

Масса метизов (болты с гайками и шайбами) по отношению к общей массе объекта, %	Надбавки к базисному коэффициенту трудоемкости
До 0,5	0,08 $K_т^б$
Св. 0,5 до 1	0,09 $K_т^б$
Св. 1 до 1,5	0,12 $K_т^б$
Св. 1,5 до 2	0,15 $K_т^б$
Св. 2	0,21 $K_т^б$

Примечание. В табл.6.6–6.12 $K_т^б$ – средний базисный коэффициент трудоемкости объекта.

6.5. Технологические возможности заводов строительных стальных конструкций

Характеристика основного оборудования заводов стальных конструкций мощностью 80–190 тыс.т приведены в приложении 6.1.

6.6. Обработка деталей стальных конструкций

6.6.1. Кислородная резка стали. Наряду с оборудованием для механической резки стали на заводах стальных конструкций широкое применение находит термическая резка (кислородная и воздушно-плазменная). Механическая резка на ножницах характеризуется рядом недостатков: малой точностью деталей, сравнительно большой трудоемкостью, низким качеством кромок реза, значительным объемом ручного труда. При термической резке листового металлопроката в основном используется кислородная резка стационарными и переносными машинами.

Наиболее перспективным является применение портальных машин с ЧПУ кислородной резки модели «Комета» и воздушно-плазменной резки с ЧПУ «Искра».

Учитывая высокие технико-экономические, технологические и социальные преимущества термической резки перед механической резкой на гильотинных ножницах рекомендуется резку листовых деталей производить преимущественно термической резкой, толщиной 3–12 мм – плазменно-дуговым способом, более 12 мм – с использованием кислородной резки, Для поперечной кислородной резки двутавров применяется машина с тремя резаками с измерительным устройством, исключающим разметку.

При конструировании деталей из двутавров и швеллеров следует избегать концевых участков с криволинейными резами (рис.6.3). Экономичнее применять балки и швеллеры с прямолинейными резами и креплениями из уголков, фланцев, привариваемых к концам балок и швеллеров. Конструктивные оформления концов таких двутавров, приведенные на рис.6.4, исключают концевые участки с криволинейными резами.

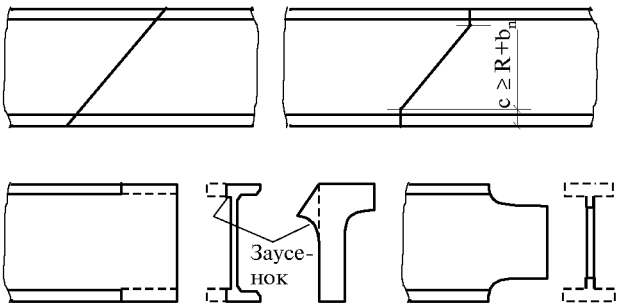


Рис.6.3. Косые резы в двутаврах и швеллерах

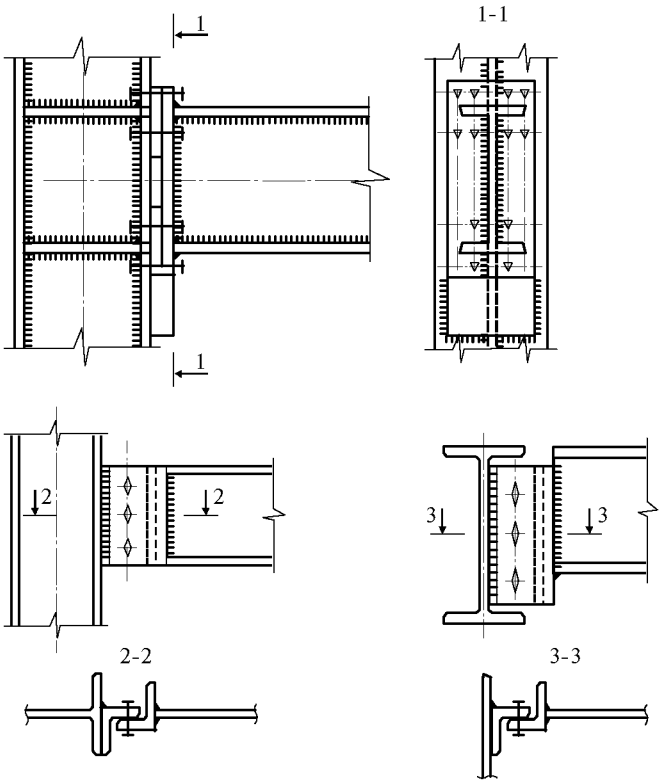


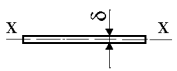
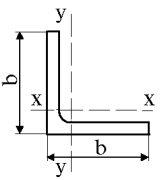
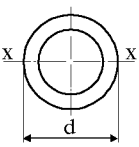
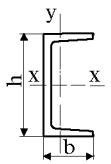
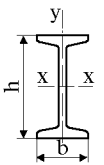
Рис.6.4. Прямые резы в двутаврах

6.6.2. Особенности конструирования деталей, изготовляемых холодной гибкой. В строительных стальных конструкциях применяются холодная и горячая гибки. Объемы работы по горячей гибке незначительны, а в случае необходимости изго-

товления деталей с большим объемом сложных работ по горячей гибке (сферических лепестков, отбортовки днищ значительной толщины) заводы металлоконструкций прибегают к кооперированным поставкам или стараются избежать горячей гибки в конструктивных решениях. Холодная гибка применяется при изготовлении деталей трубопроводов, газопроводов, резервуаров, листовых конструкций доменных цехов, газгольдеров, силосов, бункеров, монорельсов и гнутых профилей.

Детали, гнутые в холодном состоянии с радиусом гибки более 25 толщин, применяются для конструкций, в деталях которых допустим незначительный наклеп. Во избежание структурных изменений, появления значительного наклепа и полной потери пластических свойств стали при холодной гибке расчетных элементов, остаточное удлинение не должно выходить за границы предела текучести. Минимальные радиусы кривизны, при которых допускается гибка расчетных элементов в холодном состоянии, приведены в табл.6.13.

Таблица 6.13. Минимальные радиусы кривизны, допускающие гибку элементов в холодном состоянии

Профили элементов	Вид профиля						
	лист, универсал, полоса	уголок равнобокий	труба	швеллер		двутавр	
Эскиз сечения							
Гибка относительно оси	$x-x$	$x-x$ и $y-y$	–	$x-x$	$y-y$	$x-x$	$y-y$
Минимальный радиус	25δ (динамическая нагрузка) 12,5δ (статическая нагрузка)	45b	30d	25h	45b	25h	25b

Холодная гибка цилиндрических, конических и сферических листовых деталей производится на листогибочных машинах. Минимальный диаметр цилиндрических поверхностей (обечаек) зависит от диаметра верхнего валика листогибочной машины, размеров сближения центров верхнего и нижнего валков, толщины обрабатываемого листа и марки стали. Обычно минимальный диаметр цилиндрической обечайки на 20–40% больше диаметра верхнего валка.

Вальцовка листов листогибочными машинами на конус при угле у основания конуса 50–90° – выполняется просто, при угле 40–50° – возможна и менее 40° – затруднена.

Гибку лепестков сферических поверхностей производят листогибочной машиной, оборудованной специальными приспособлениями Приспособление состоит из бочки, надеваемой на верхний валок, и постели-шаблона (седла), укладываемой на нижние валки (рис.6.5). Максимальный размер заготовки для гибки лепестков сферических поверхностей – (1,6–1,8) × (4–6) метров при толщине 14 мм. Холодная гибка уголков, балок и швеллеров производится на горизонтально-правильно-

гибочных прессах, листогибочных и углоправильных машинах. Холодногнутые профили для конструкций из углеродистой стали, воспринимающих статическую нагрузку, должны иметь внутренний радиус закругления не менее 1,2 толщины листа; для конструкций, воспринимающих динамическую нагрузку, – не менее 2,5 толщины листа, из низколегированной стали – на 50% больше, чем для углеродистой.

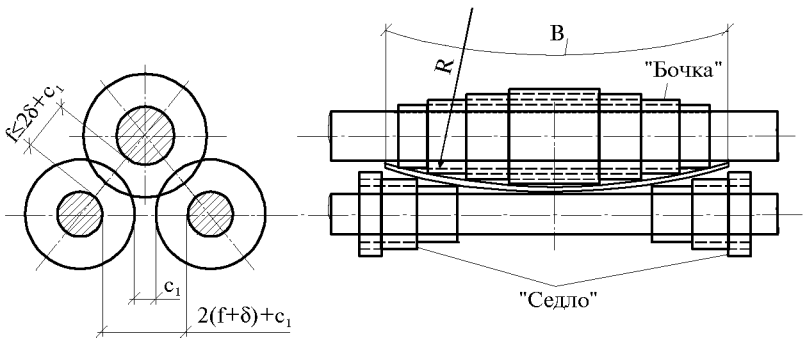


Рис.6.5. Схема оборудования листогибочной машины для гибки элементов сферической оболочки

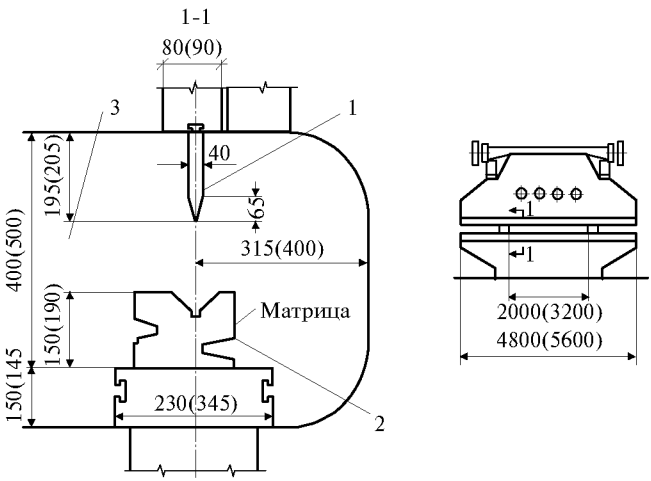


Рис.6.6. Основные данные кромкогибочных прессов
1 – верхний штамп (пуансон); *2* – нижний штамп (матрица); *3* – проем в станине пресса

Холодная гибка профилей из листовой стали производится на кромкогибочных прессах (рис.6.6). При применении холодногнутых профилей из листовой стали необходимо учитывать технологические возможности кромкогибочных прессов.

Рабочим инструментом кромкогибочного пресса является матрица *2* и пуансон *1* (рис.6.6). Матрица, имеет на каждой из четырех граней паз различного размера. Угол гибки детали зависит от ширины паза у матрицы c, толщины листовой стали d, радиуса закругления пуансона $r_п$ (рис.6.7). Следует учитывать необходимость ограничения длины первого гиба $в_1$ при α=90°, а также в зависимости от угла α_2 (рис.6.8). Толщина холодногнутых профилей для пресса мощностью 315 т при длине 1000 мм не должна превышать 24 мм, при длине 5600–6000 м – 6–10 мм.

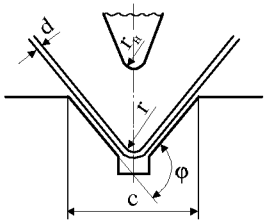


Рис.6.7. Радиус гибки и длина первого гиба
1 – пуансон; *2* – лист; *3* – матрица

6.7. Технологические возможности заводской сборки и сварки элементов стальных конструкций

6.7.1. Влияние конструктивной формы на технологию сборки отправочных элементов. При разработке проектов КМ и деталировочных чертежей КМД стальных строительных конструкций профили металлопроката и узлы должны обеспечивать возможность сборки отправочных элементов технологией и оборудованием, применяемыми на заводах металлоконструкций. В зависимости от формы, размеров элемента и типа производства на заводах металлоконструкций применяются следующие способы сборки конструкций под сварку: сборка по предварительной разметке; по упорам-фиксаторам; по шаблонам-копирам; по контрольным отверстиям в собираемых элементах; в кондукторах; на поточных линиях.

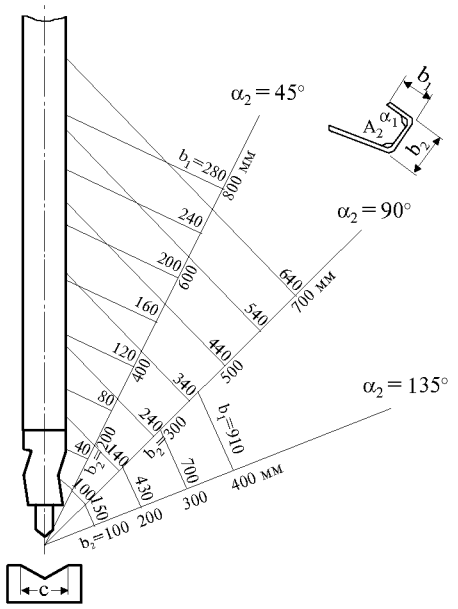


Рис.6.8. Ограничение длины первого гиба при $\alpha_1 = 90°$ в зависимости от α_2

Сборка по разметке состоит в том, что положение каждого элемента определяется рисками, нанесенными на смежных элементах по чертежным размерам. Конструкцию собирают в соответствии с нанесенными рисками.

Сборка по упорам-фиксаторам характеризуется тем, что по очертаниям изделия на стеллажах или на плите устанавливают упоры, которые определяют расположение элементов изделия согласно чертежу.

Сборка по шаблонам-копирам отличается тем, что первоначально изготовляют шаблон, имеющий форму изделия (копир). Элементы изделия совмещают с шаблоном и скрепляют между собой прихватками.

Сборка по контрольным отверстиям заключается в следующем. В заготовительных цехах в основных сопрягаемых элементах конструкций делают сборочные отверстия. Эти сборочные отверстия совмещают в смежных элементах и скрепляют сборочными болтами.

Сборка в кондукторе – наиболее производительный метод, обеспечивающий одновременно высокое качество сборки. Кондуктор представляет собой стационарное устройство, которое обеспечивает взаимное расположение элементов конструкции в соответствии с чертежом. Элементы в кондукторе удерживаются упорами и прижимными устройствами без фиксации прихватками.

6.7.2. Технологичность сварки конструкций. Наиболее широко на заводах металлоконструкций применяется полуавтоматическая сварка в среде углекислого газа и автоматическая сварка под слоем флюса. На отдельных заводах применяют электрошлаковую сварку, контактную точечную и стыковую. Ручная сварка применяется только при сборке металлоконструкций для «прихватки» деталей.

Технологичность сварки конструкций должна отвечать следующим требованиям:

- доступности и удобству выполнения сварки и контроля качества сварных соединений (гл.3 табл.3.9);
- расположению сварных швов, при котором выполнение их доступно преимущественно в нижнем положении или в «лодочку» (рис.6.9);

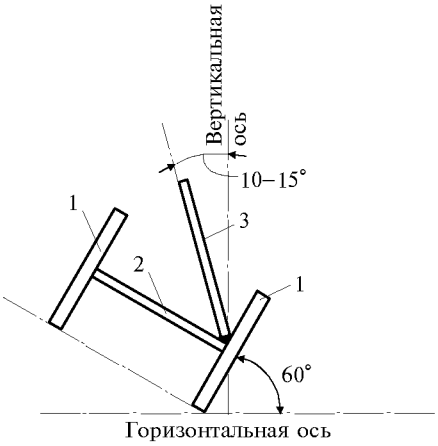


Рис.6.9. Схема сварки швов

- возможности максимального использования автоматической и полуавтоматической сварки;
- минимальным объемам наплавленного металла (в результате применения односторонней сварки ребер жесткости и поясных швов балок из листа, минимальной высоты катетов угловых швов, сварки без скосов кромок);
- исключению косых сварных стыков и фигурных примыкании концов швеллеров и балок на сварке;
- отсутствию в сварных конструкциях несимметричных сечений или несимметрично расположенных сварных швов относительно нейтральной оси, пересечения и концентрации швов.

Это обеспечит минимальные остаточные сварочные напряжения и деформации и исключит необходимость их устранения.

6.8. Конструирование элементов с фрезерованными торцами

Фрезерование торцов деталей и элементов стальных конструкций применяется в следующих случаях:

- при передаче усилий в стойках и колоннах на нижерасположенный элемент или опорную плиту через смятие торца;
- в узлах стропильных ферм с фланцевыми соединениями (контактные поверхности фланцев в опорных узлах, торцов поясов ферм в примыкании к фланцам, торцы элементов решетки ферм в бесфасоночных примыканиях к поясам);
- при необходимости изготовления деталей и отправочных элементов с повышенной точностью.

Габариты фрезеруемых торцов не должны превышать возможностей торцефрезерных машин (приложение 6.1).

6.9. Назначение общих и контрольных сборок

Общую сборку конструкций назначают в проекте КМ и производят на заводе для обеспечения:

- проектной точности изготовления отправочных элементов; подгонки в необходимых случаях кромок деталей в сварных монтажных соединениях;
- рассверливания на проектный диаметр отверстий для болтов или заклепок в монтажных узлах;
- нанесения индивидуальной маркировки и установки фиксаторов.

Общей сборке подлежат следующие конструкции зданий и сооружений: колонны общей массой свыше 20 т, подкрановые балки пролетом свыше 18 м, стропильные и подстропильные фермы пролетом свыше 36 м, подкраново-подстропильные фермы пролетом 24 м и более; башни (плоскостями); конические части труб, негабаритные бункеры; конструкции транспортерных галерей – в пределах одного конструктивного элемента (фермы, опоры).

На заводе-изготовителе должна также производиться общая сборка: конструкций доменных цехов и газоочисток, в том числе кожухи горна и шахты, включая

купол; кольцевого воздуховода; днища, купола и мест изменения диаметра кожуха каждого воздухонагревателя с примыкающим к ним цилиндрическим поясом кожуха; тройников вертикальных и наклонных газоотводов и других конструкций.

После выполнения всех работ по общей сборке на элементах конструкций устанавливают фиксаторы по схеме, приведенной в деталировочных чертежах КМД без точной разметки мест их прикрепления, чтобы каждый элемент при монтажной сборке мог быть установлен только на то место, где он был на общей заводской сборке, а установка его на другое место была бы невозможна из-за несовпадения фиксаторов. Схема расстановки фиксаторов в листовых конструкциях показана на рис.6.10.

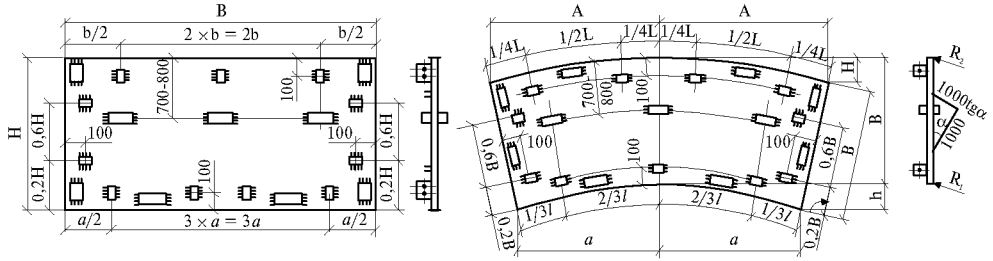


Рис.6.10. Схема расстановки сборочных шайб и фиксаторов в листовых конструкциях

Контрольная сборка осуществляется для проверки точности изготовления отдельных отправочных элементов, точности кондукторов и приспособлений На контрольных сборках не производят подгоночных работ, не наносят индивидуальную маркировку и не устанавливают фиксаторы, так как изготовленные однотипные элементы должны быть взаимозаменяемы. Контрольные образцы назначают в объеме 5–15 % общего количества изготовляемых однотипных элементов. В конструкциях типа колонн, стоек, балок, ферм и других элементов, состоящих из двух и более отправочных марок, общая и контрольная сборка назначается только в пределах одного крупногабаритного конструктивного элемента.

Монтажные узлы сопряжения со смежными элементами (колонны с фермами, подкрановыми балками, ригелями фахверка и др.) проектируют с использованием высокопрочных болтов и болтов общего применения, при этом отверстия принимают на 3–4 мм больше, чем диаметр стержня болта. При таких зазорах между болтами и отверстиями обеспечивается совпадение монтажных отверстий.

При разработке в проектах КМ узлов монтажных соединений на болтах необходимо руководствоваться ограничениями по условиям размеров «места под ключ» (приложение 2).

6.10. Требования к проектам конструкций, изготовляемых на автоматизированных поточных линиях

За последние годы заводы металлоконструкций начали оснащаться высокопроизводительным оборудованием с числовым программным управлением (ЧПУ) или измерительными устройствами для безразметочной резки и образования отверстий в прокатной стали (приложение 6.1). Это оборудование обеспечивает сокращение трудовых затрат при заготовке деталей и повышение точности их обработки.

При изготовлении сборочных деталей на этом оборудовании исключается необходимость применения шаблонов и наметки, раскладки балок, швеллеров и уголков, промежуточное пакетирование и перемещение от одного рабочего места и станка к другому, в результате чего сокращается время, необходимое для выполнения самих

операций. Кроме того, сокращается производственная площадь, необходимая для разметки профильного металлопроката по существовавшей ранее технологии.

Для безразметочной резки и образования отверстий в сборочных листовых деталях заводы оснащены портальными машинами кислородной и воздушно-плазменной резки с ЧПУ и автоматическими координатно-сверлильными станками с ЧПУ. Допустимые отклонения размеров деталей и расстояний между отверстиями при изготовлении на этом оборудовании при $l \leq 1$м составляет $\pm 0{,}5$ мм, при $1\,\text{м} \leq l \leq 12\,\text{м}$ – $\pm 2{,}5$ мм. Особенно важное значение имеет это обстоятельство для строительных стальных конструкций, монтируемых на болтах, так как этот вид стальных конструкций имеет значительные преимущества по сравнению с конструкциями на монтажной сварке.

В сборочных цехах универсальных заводов металлоконструкций высокомеханизированные сборочные устройства не нашли применения, ввиду изготовления на этих заводах преимущественно индивидуальной и мелкосерийной продукции. Высокомеханизированные сборочные устройства используются на специализированных предприятиях, в том числе на заводах легких конструкций комплектных поставок, резервуарных конструкций, переплетов и т.д.

Исходя из особенностей специализированного поточного производства, к проектам КМ предъявляются следующие требования:

- сборочные детали, входящие в состав конструкции, должны быть унифицированы; унификация деталей должна предусматривать минимальное число типоразмеров с тем, чтобы число разнопрограммных партий на каждой операции обработки было минимальным;
- изготовляемые на поточных линиях конструкции должны легко члениться на постепенно укрупняемые сборочные элементы;
- число сборочных элементов в каждой конструкции должно быть минимальным;
- кромки фасонок и прокладок, другие детали, как правило, не должны выступать за грани основных деталей, которые будут базой при перемещении изготовляемой конструкции по рольгангам и транспортерам;
- число типоразмеров конструкций, собираемых на поточных линиях, должно быть минимальным.

6.11. Отклонения и допуски в размерах стальных конструкций

Одним из факторов технологичности стальных конструкций является взаимозаменяемость составляющих их сборочных деталей., Поэтому размеры этих деталей должны быть в пределах заранее предписанных допускаемых отклонений, обеспечивающих определенную ими посадку. По плотности и величине зазора сопряжения могут быть разбиты на три типа:

- плотное (рис.6.11,*а*), определяемое отсутствием зазора при любых отклонениях в размерах сопрягаемых деталей и конструкций. В этом случае постановка детали осуществляется с усилием под ударами кувалды, запрессовкой домкратом и т.д;
- ограниченно свободное (рис. 6.11,*б*), определяемое наличием между сопрягаемыми деталями зазора, значение которого колеблется в заранее обусловленных пределах, при этом минимальная величина зазора может равняться нулю; деталь при сборке должна свободно войти в промежуток, образуемый деталями;
- свободное (рис.6.11,*в*), определяемое обязательным наличием зазора любой гарантированной величины при любых отклонениях в размерах сопрягаемых деталей.

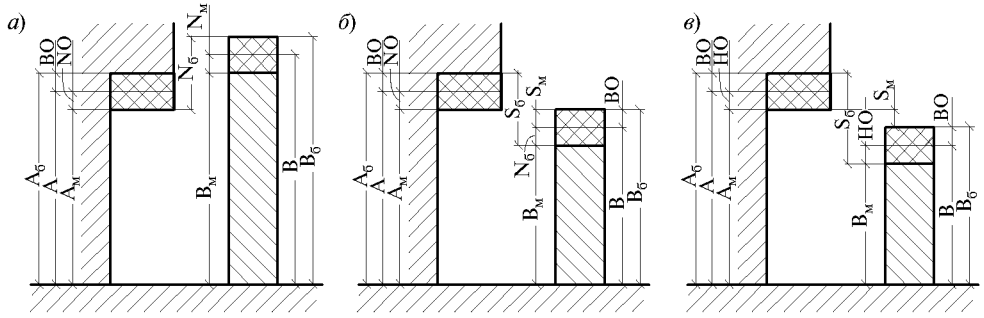


Рис.6.11. Типы сопряжений

а – плотное; *б* – ограниченно-свободное; *в* – свободное, A, B – номинальные размеры; $A_б$, $B_б$ – предельные размеры наибольшие; $A_м$, $B_м$ – то же, наименьшие; Δ_a, Δ_b – отклонение верхнее, равное $A_б - A$, $B_б - B$; H_0 – отклонение нижнее, равное $A - A_м$, $B - B_м$; $N_м$ – натяг наименьший, равный $B_м - A_б = 0$; $N_б$ – натяг наибольший, равный $A_м - B_б$; $S_б$ – зазор наибольший, равный $A_б - B_м$; $S_м$ – зазор наименьший, равный $A_м - B_б$

В связи с широким использованием в стальных строительных конструкциях монтажных резьбовых соединений на болтах особую актуальность приобрели задачи обеспечения полной собираемости конструкций на монтаже с уровнем собираемости 99,73 %. Свободные сопряжения, определяемые обязательным наличием зазора любого гарантированного размера при любых отклонениях и размерах сопрягаемых деталей, в современных конструктивных решениях заменяются ограниченно свободными сопряжениями – фермами без фасонок, фланцевыми соединениями и т,д. Таким образом, из экономических соображений отказываются от деталей, которые ранее выполняли роль звеньев компенсаторов в размерных цепях, образующихся в стальных конструкциях. Оба эти современных направления существенно повышают требования к точности геометрических параметров стальных конструкций.

В 1980–1985 гг. введены в действие стандарты «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве (СОТГПС)» [10–16], которые регламентируют основные положения и методики точности строительства, в том числе стальных конструкций. Конкретные параметры точности стальных конструкций регламентированы в стандартах на некоторые виды отправочных элементов стальных конструкций и в строительных нормах [17] в зависимости от видов технологических операций и оборудования.

К основным факторам, обеспечивающим требуемую точность стальных конструкций, относятся: порядок оформления рабочих чертежей КМ в части размеров допусков и предельных отклонений; нормативные значения функциональной и технологической точности; состояние метрологического обеспечения; технический уровень оснастки для сборки конструкций.

Введенные в действие стандарты «Системы обеспечения точности геометрических параметров в строительстве» предусматривают:

- наличие в проектах КМ обоснованных функциональных допусков и прямых указаний по точности геометрических параметров, определяющих собираемость конструкций на монтаже и подлежащих контролю при изготовлении;
- наличие в проектах КМ указаний о точности (предельных отклонениях) ответственных геометрических параметров;
- обеспечение принятых значений характеристик точности и возможностей метрологического обеспечения.

Приложение 6.1

Техническая характеристика основного оборудования заводов стальных конструкций мощностью 80–190 тыс.т

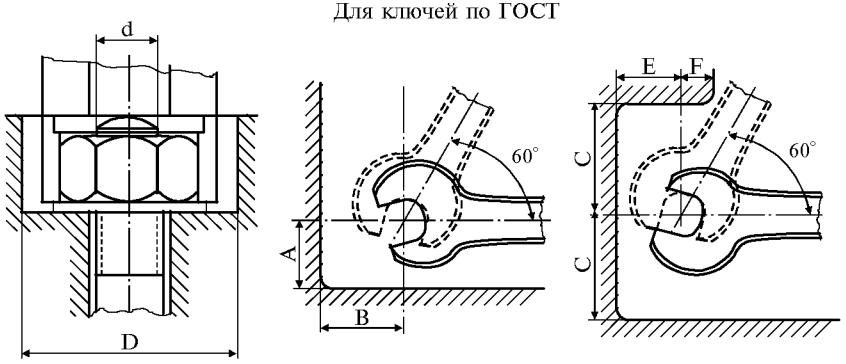
№№ п/п	Основные технологические операции	Оборудование	Техническая характеристика оборудования
1	2	3	4
1.	Правка прокатной стали:		
	листовой	1.1. Листоправильные машины: толщина × ширину, мм (max)	40×3200
	угловой	1.2. Углоправильные машины: ширина полки × толщину, мм (max)	200×30
	балок двутавровых, швеллеров	1.3. Горизонтальные правильно-гибочные прессы на стенку, номер (max)	№ 60
	уголков	Уголков шириной × толщину полки, мм (max)	200×20
2.	Холодная гибка деталей:		
	из листовой стали	2.1. Листогибочные машины для гибки цилиндрических и конических заготовок размером до: толщину × ширину, мм (max)	25×3200 25×6300 32×8000 40×4000
		2.2. Кромкогибочные прессы для гибки и профилирования листового металла:	
		мощность, кН	2500, 3150, 4000
		длина стали и ползуна , мм	5600, с приставками – 6500
	из уголков	2.3. Углогибочные машины: ширина полок × толщину, мм (max)	125×16; 160×20
	из балок, швеллеров, уголков	2.4. Горизонтально-правильно-гибочные прессы:	
		на стенку, № (max)	№ 60
		ширина полки × толщину, мм (max)	200×20
3.	Штамповка деталей	3.1. Штамповочные прессы, кН, до:	8000
4.	Резка деталей		
	листовых	4.1. Гильотинные ножницы для резки листовой стали сечением до толщины × ширину, мм	25×3200 32×3200
	уголковых	4.2. Машина для кислородной и воздушно-плазменной резки толщиной до, мм	300
		4.3. Уголковые ножницы:	
		ширина полки × толщину, мм (max)	250×28
		4.4. Пресс-ножницы до № профиля	№ 40
	балочных	4.5. Отрезной круглопильный станок для резки:	
		балок, до	№ 60
		швеллеров, до	№ 40
	трубчатых сечений	4.6. Газорезательные автоматы, в том числе для резки труб под углом, диаметром, мм	50–400

1	2	3	4
5.	Образование отверстий в деталях	5.1. Дыропробивные прессы для пробивки отверстий мощностью, кН	1000, 1600
		5.2. Стационарные одношпиндельные радиально-сверлильные станки для сверления отверстий диаметром до, мм	75
		5.3. Передвижные одно- и двухшпиндельные радиально-сверлильные станки для сверления отверстий диаметром до, мм	50
6.	Образование отверстий без разметки	6.1. Стационарные одношпиндельные радиально-сверлильные станки с ЧПУ:	
		размером стола, мм	1000×2000; 1500×3000
		с допускаемыми отклонениями между отверстиями, мм	при l =1 м ± 0,5
			при l = до 2 м ± 2,5
		6.2. Дыропробивные прессы с дубликатором для пробивки отверстий:	
		с допустимыми отклонениями между отверстиями для расстояния до 1 м листовых деталей, мм	±0,35 мм
		размер листовых деталей, мм	30×600×1200
7.	Образование отверстий и резка уголка без разметки	7.1. Механизированная установка для обработки уголка с измерительным устройством с сечением уголка, мм, до	180×14
8.	Резка и сверление отверстий в широкополочных балках без разметки	8.1. Автоматизированная линия с ЧПУ для резки и сверления отверстий в широкополочных балках:	
		длина балки, см	12000
		№ балки	№ 20 – № 100
		диаметр отверстий, мм	27
		точность позиционирования, мм	±0,5
9.	Фрезерование торцов деталей и элементов	9.1. Торцефрезерные машины;	
		ширина × высоту обрабатываемого торца, мм (max)	3600×1300
10.	Стыковки поперечных листов	Технологическая линия, мм:	
		длина	2800–8000
		ширина	1200–2500
		толщина	40
11.	Сборка стропильных ферм:	Кондуктор:	
	типа «Молодечно»	длина ферм, м	12, 15, 18
		высота ферм, мм	3150
	с поясами из широкополочных двутавров	Кондуктор:	
		длина ферм, м	12, 14, 18
		высота ферм, мм	3150
12.	Сборка опор ЛЭП пирамидальной фермы	Кондуктор для деталей длиной, мм	6000

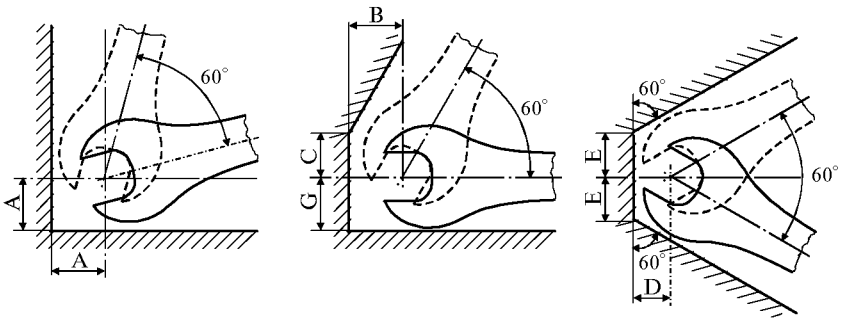
1	2	3	4
13.	Сборка двутавровых балок	Сборочная установка.	
		Габаритный размер поперечного сечения, мм: наибольший	3200×1000
		наименьший	400×150
14.	Сборка колонн типа «Молодечно»	Пневматический кондуктор, мм:	
		длина	13720
		ширина	2160
15.	Сборка двухветвевых колонн	Сборочный стенд, мм:	
		длина	22000
		ширина	2500
		высота	1000
16.	Сборка труб	Сборочный стенд, мм: длина	12000
		диаметр	1300–3500
17.	Сварка	17.1. Автоматы тракторного типа	Имеются
		17.2. Автоматы и подвесные головки	Имеются
		17.3. Полуавтоматы	Имеются
		17.4. Автоматы для электрошлаковой сварки (на специализированных заводах) до толщины, мм	300
18.	Сварка балок	Кантователь:	
		высота, мм	2000
		грузоподъемность, кН	100
19.	Сварка подкрановых балок	Кантователь цепной и габаритный: размер изделия, мм	18000×1000×2500
20.	Сварка конструкций	Позиционер для кантовки: грузоподъемность, кН	50
21.	Сварка конструкций	Установка для подвески и перемещения сварочных полуавтоматов А=537 при радиусе вылета консоли, мм	6000
22.	Дробеметная очистка металлопроката	22.1. Камера дробеметной очистки металлопроката размером до, мм:	
		шириной	2500
		длиной	12000
		высотой	500
23.	Мостовые электрические краны (однотележечные и двухтележечные) грузоподъемностью, т	23.1. На складе металла	10+10
		23.2. В цехах обработки	5+5 и 10+10
		23.3. В сборочных цехах	10+10 и 20+20
		23.4. В цехе общей сборки и маляропогрузки	20+20 и 30+30
24.	Клепка	24.1. Клепальная и пневматическая скоба (на специализированных заводах):	
		давление, т	80
		вылет, мм	1000
		наибольший диаметр заклепки, мм	32

Ограничения по условиям размеров «места под ключ»

Для ключей по ГОСТ



Для сборочных ключей



Диаметр болта, d	Для ключей по ГОСТ, в мм													Для сборочных ключей, в мм					
	12	16	20	24	27	30	33	36	39	42	45	48	52	12	16	20	24	27	30
D_{min}	38	45	55	62	68	75	80	85	92	100	110	120	125	20	23	26	29	31	33
A_{min}	23	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	27	32	36	40	45	48
B_{min}	30	35	40	45	50	55	60	68	75	80	90	95	100	24	28	32	36	40	42
C_{min}	32	38	45	50	58	65	70	80	85	90	95	100	105	16	19	22	27	28	32
E_{min}	22	25	28	30	35	40	42	45	50	55	60	65	70	22	27	30	35	38	40
F_{max}	10	12	16	18	20	25	25	30	30	35	35	35	35	–	–	–	–	–	–
G_{min}	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	29	34	39	44	49	52

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стандарт предприятия СТП 104.2–39–85. Комплексная система управления качеством продукции. Оценка технологичности металлоконструкций на стадии проектирования.. – ЦНИИПСК, 1985.
2. Сахновский М.М, Технологичность сварных стальных конструкций. – Киев: Будивельник, 1982.
3. Прейскурант № 01–22–29, Оптовые цены на строительные стальные конструкции. –М.: Прейскурантиздат, 1989.
4. Руководство по проектированию заводов металлоконструкций. Методика расчета и нормы трудоемкости изготовления металлоконструкций промышленных зданий. – М.: Стройиздат, 1985.
5. Рекомендации по проектированию заводов металлоконструкций. Методика расчета и нормы трудоемкости изготовления металлоконструкций. –М.: 1983.
6. Комплексные нормативы затрат труда на изготовление типопредставителей конструктивных элементов промышленных зданий.
   $\frac{\text{ВСН 393 - 78}}{\text{ММСС СССР}}$ – М.: ЦБНТИ, 1979.
7. Комплексные нормативы затрат труда на изготовление конструкций эстакад.
   $\frac{\text{ВСН 419 - 81}}{\text{ММСС СССР}}$ – М.: ЦБНТИ, 1981.
8. Комплексные нормативы затрат на изготовление трубопроводов.
   $\frac{\text{ВСН 418 - 81}}{\text{ММСС СССР}}$ – М.: ЦБНТИ, 1981.
9. Комплексные нормативы затрат труда на изготовление конструкций площадок, лестниц, ограждений.
   $\frac{\text{ВСН 420 - 81}}{\text{ММСС СССР}}$ – М.: ЦБНТИ, 1981.
10. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения. ГОСТ 21778–81.
11. СОТГПС. Технологические допуски, ГОСТ 21779–82.
12. СОТГПС. Расчет точности. ГОСТ 21780-83.
13. СОТГПС. Правила выполнения измерений. ГОСТ 26433 0–85.
14. Статистический анализ точности. ГОСТ 23615–79*.
15. Общие правила контроля точности. ГОСТ 23616–79.*
16. СОТГПС. Функциональные допуски, ГОСТ 26607–85.
17. СНиП III–18–75. Металлические конструкции.

ГЛАВА 7

ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ ПРИ ИХ ТРАНСПОРТИРОВКЕ

При проектировании и изготовлении металлоконструкций учитываются условия их транспортировки к месту монтажа. В зависимости от месторасположения завода-изготовителя и строительной площадки перевозка конструкций осуществляется железнодорожным, автодорожным, морским, речным или воздушным транспортом. Иногда при доставке конструкций приходится использовать поочередно два или несколько видов транспорта, например железнодорожный, морской и автомобильный. На всех этапах погрузочно-разгрузочных работ и транспортировки элементы конструкций или транспортные блоки (пакеты) конструкций должны сохранять геометрическую неизменяемость и не иметь остаточных деформаций. На стадии разработки чертежей КМД необходимо выполнять схемы пакетирования, складирования и транспортировки в зависимости от требований соответствующих видов транспорта. Предельные размеры отправочных марок металлических конструкций и их масса также зависят от способов транспортировки, возможностей

транспортных средств и имеющегося грузоподъемного оборудования на всех этапах транспортировки.

7.1. Перевозка конструкций железнодорожным транспортом

7.1.1. Габариты приближения строений и габариты подвижного состава. Габариты погрузки и степени негабаритности. Габариты приближения строений и габариты подвижного состава определяются ГОСТ 9238–83 – «Габариты приближения строений и подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм (для линий со скоростью движения поездов не свыше 160 км/ч)». Размещение и крепление конструкций на открытом подвижном составе выполняется с соблюдением требований «Технических условий погрузки и крепления грузов».

Конструкции, погруженные на открытый подвижной состав, с учетом упаковки и крепления не должны выходить за пределы габарита погрузки (рис.7.1) при условии, когда подвижной состав находится на прямом горизонтальном участке пути и продольные оси состава и пути находятся в одной вертикальной плоскости. При этом длина груза не должна превышать значений, указанных в табл.7.1 и 7.2. В таблице даны характеристики наиболее часто применяемых платформ и полувагонов, приведены предельные длины грузов полной допустимой ширины при погрузке на одну платформу (без платформ прикрытия) и с использованием сцепа из двух или трех платформ. При бóльших значениях длины груза, а также при погрузке конструкций на две платформы требуется соответствующий пересчет допустимой габаритной ширины груза.

В исключительных случаях для перевозки грузов, имеющих высоту более, чем габарит погрузки, используют вместо обычных платформ специальные железнодорожные транспортеры грузоподъемностью до 400 т с пониженной высотой уровня погрузки перевозимых конструкций.

В табл.7.3 приведена допускаемая габаритная ширина груза в зависимости от высоты над уровнем головки рельса, для льготного габарита погрузки, так как для перевозки стальных конструкций практически по всем дорогам страны (кроме Дальневосточной) разрешается пользоваться льготным габаритом погрузки (рис.7.2). При перевозке стальных конструкций за рубежом необходимо пользоваться «Инструкцией по перевозке грузов негабаритных и погруженных на транспортеры по железным дорогам колеи 1524 мм» и учитывать соответствующие габариты погрузки.

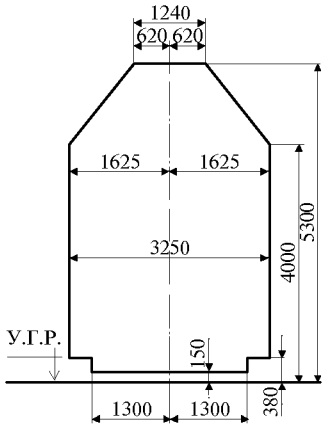


Рис.7.1. Габарит погрузки

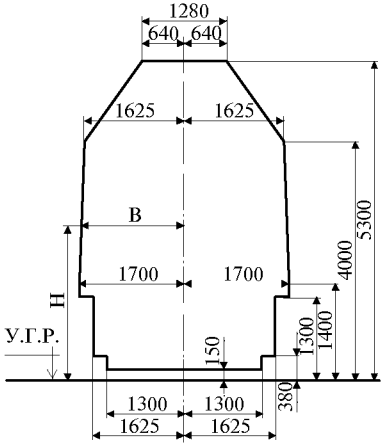


Рис.7.2. Льготный габарит погрузки

Таблица 7.1. Характеристика железнодорожных платформ

Характеристика платформ	Грузоподъемность платформ, т		
	63	62	62
	с металлическими бортами и клиновыми запорами	с металлическими бортами	с деревянными бортами
Число осей	4	4	4
Тара, т	21	21,8	22
Общая длина по осям автосцепок, мм	14620	14620	14194
База, мм	9720	9720	9294
Внутренние размеры, мм:			
длина	13300	13300	12874
ширина	2770	2770	2770
Высота бортов, мм:			
торцевого	400	305	305
бокового	500	500	455
Допускаемая длина груза при опоре на одну платформу сцепа, мм	18200	18200	17900
То же, при сцепе из двух платформ, мм	25480	25480	24000
Максимальная возможная длина груза, погружаемого на одну платформу, мм	14200	14200	13774
Высота от головки рельса до уровня пола, мм	1294	1294	1270
Площадь пола, м^2	36,8	36,8	35,68
Объем груза без шапки, м^3	18,5	18,5	15,73
Нагрузка от оси на рельс, кН	210	210	210
Нагрузка на 1 м пути, кН	56,7	56,7	59,3
Высота центра тяжести в порожнем состоянии, м	0,8	0,8	0,8
Габарит	01–Т	01–Т	01–Т

Таблица 7.2. Характеристика железнодорожных полувагонов

Характеристика полувагонов	Грузоподъемность полувагонов, т		
	125	93 –94	63
	с металлическими бортами		с деревянными бортами
Объем кузова, м^3	137,5	104	70,5
Число осей	8	6	4
Тара, т	45,3	31,5	21,8
Общая длина (по осям автосцепок), мм	20 240	16 400	13 920
База, мм	12 070	10 440	8650
Внутренние размеры, мм:			
длина	18 690	14 338	12 004
ширина	2846	2908	2960
высота	2450	2365	2060
Площадь пола, м^2	54,7	41,7	25,53
Число люков	22	16	14
Нагрузка от оси на рельс, кН	210	209	212
Нагрузка на 1 м пути, кН	83	76	61
Высота центра тяжести в порожнем состоянии, м	1,13	1,13	1,13
Габарит	1–Т	1–Т	01–Т
Максимальная возможная длина погружаемого груза, мм	20 000	15 700	13 500

Таблица 7.3. Допустимая габаритная ширина груза в зависимости от высоты над уровнем головки рельса для льготного габарита погрузки

H, мм	*B*, мм	*H*, мм	*B*, мм	*H*, мм	*B*, мм	*H*, мм	*B*, мм	*H*, мм	*B*, мм	*H*, мм	*B*, мм	*H*, мм	*B*, мм	*H*, мм	*B*, мм
380–1299	1625	2648	1676	3948	1651	4240	1464	4490	1270	4740	1075	4990	882	5240	686
1300–1400	1700	2700	1675	4000	1650	4250	1456	4500	1262	4750	1067	5000	873	5250	678
1452	1699	2752	1674	4010	1642	4260	1448	4510	1254	4760	1060	5010	866	5260	671
1504	1698	2804	1673	4020	1634	4270	1441	4520	1246	4770	1052	5020	858	5270	663
1556	1697	2856	1672	4030	1627	4280	1443	4530	1239	4780	1044	5030	850	5280	665
1608	1696	2908	1671	4040	1619	4290	1425	4540	1231	4790	1036	5040	842	5290	647
1660	1695	2960	1670	4050	1611	4300	1417	4550	1223	4800	1029	5050	835	5300	640
1712	1694	3012	1669	4060	1603	4310	1409	4560	1215	4810	1021	5060	827	–	–
1764	1693	3064	1668	4070	1596	4320	1402	4570	1208	4820	1013	5070	819	–	–
1816	1692	3116	1667	4080	1588	4330	1394	4580	1200	4830	1006	5080	811	–	–
1868	1691	3168	1666	4090	1580	4340	1386	4590	1192	4840	998	5090	803	–	–
1920	1690	3220	1665	4100	1572	4350	1378	4600	1184	4850	990	5100	795	–	–
1972	1689	3272	1664	4110	1564	4360	1371	4610	1176	4860	982	5110	787	–	–
2024	1688	3324	1663	4120	1557	4370	1363	4620	1168	4870	975	5120	779	–	–
2076	1687	3376	1662	4130	1549	4380	1355	4630	1160	4880	967	5130	772	–	–
2128	1686	3428	1661	4140	1541	4390	1348	4640	1153	4890	959	5140	764	–	–
2180	1685	3480	1660	4150	1533	4400	1339	4650	1146	4900	951	5150	756	–	–
2232	1684	3432	1659	4160	1526	4410	1332	4660	1137	4910	943	5160	748	–	–
2284	1683	3584	1658	4170	1518	4420	1324	4670	1129	4920	936	5170	741	–	–
2336	1682	3636	1657	4180	1510	4430	1316	4680	1122	4930	928	5180	733	–	–
2388	1681	3688	1656	4190	1502	4440	1308	4690	1114	4940	920	5190	725	–	–
2440	1680	3740	1655	4200	1495	4450	1300	4700	1106	4950	912	5200	717	–	–
2492	1679	3790	1654	4210	1487	4460	1293	4710	1098	4960	905	5210	709	–	–
2544	1678	3844	1653	4220	1479	4470	1285	4720	1090	4970	897	5220	702	–	–
2596	1677	3896	1652	4230	1472	4480	1277	4730	1083	4980	889	5230	694	–	–

Габариты погрузки, действующие в некоторых странах, где возможны перевозки наших стальных конструкций, приведены на рис.7.3–7.12. По массе грузы не должны превышать грузоподъемность платформы с учетом допускаемого перегруза, в соответствии с табл.7.4. При этом центр тяжести груза должен находиться над центром вагона. Смещение центра тяжести груза от центра вагона в поперечном направлении не должно превышать 100 мм, а в продольном 1/8 длины базы вагона. Масса груза должна распределяться на пол вагона равномерно и загрузка тележек или колесных пар должна быть одинаковой. Допускается разница в нагрузках на колесные пары двухосных вагонов не более 40 кН и на тележки четырехосных вагонов не более 10 кН.

Таблица 7.4. Допускаемый перегруз вагонов сверх установленной грузоподъемности

Наименование	Перегруз, кН
Платформа и полувагоны грузоподъемностью 62, 63 т	10
Все остальные четырехосные вагоны	20
Полувагоны грузоподъемностью, т:	
93	30
94	20
125	10

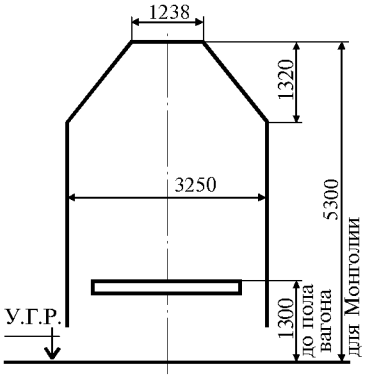


Рис.7.3. Габарит погрузки на железных дорогах Монголии. Колея 1524 мм

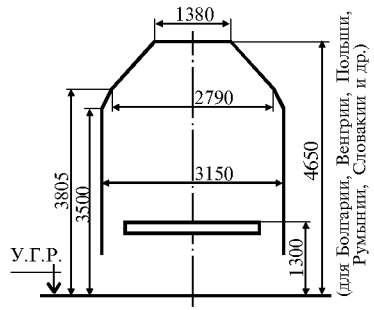


Рис.7.4. Габарит погрузки на железных дорогах Австрии, Болгарии, Венгрии, Германии, Греции, Дании, Люксембурга, Нидерландов, Польши, Румынии, Турции, Чехии и Словакии, Югославии. Колея 1435 мм

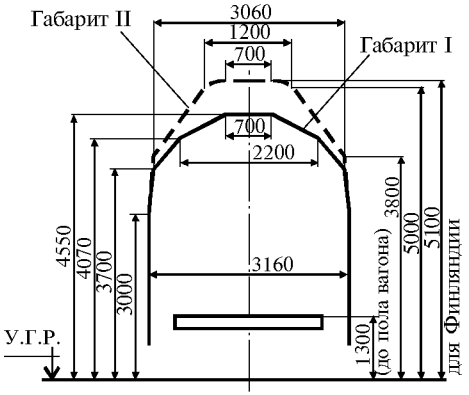


Рис.7.5. Габарит погрузки на железных дорогах Финляндии. Колея 1435 мм

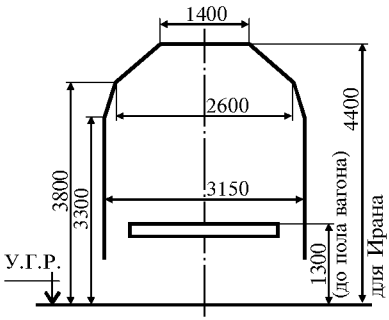


Рис.7.6. Габарит погрузки на железных дорогах Ирана. Колея 1435 мм

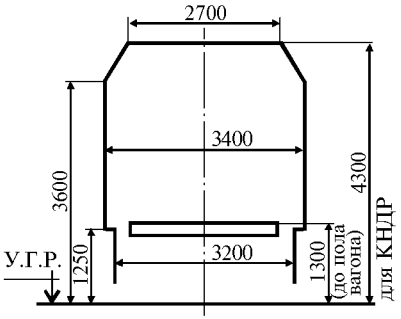


Рис.7.7. Габарит погрузки на железных дорогах КНДР. Колея 1435 мм

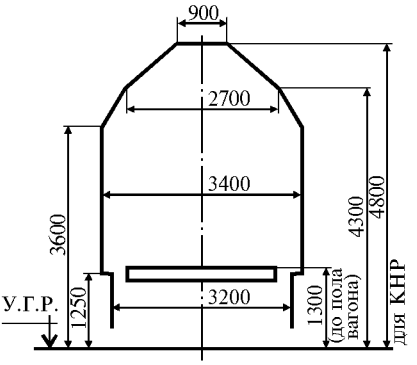


Рис.7.8. Габарит погрузки на железных дорогах КНР. Колея 1435 мм

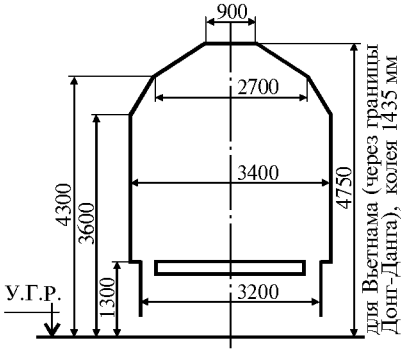


Рис.7.9. Габарит погрузки на железных дорогах Вьетнама (через границы Донг-Данга). Колея 1435 мм

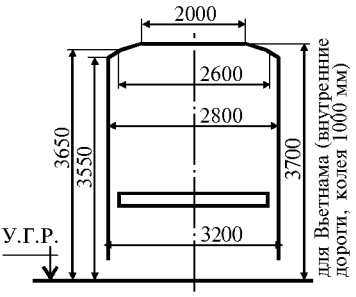


Рис.7.10. Габарит погрузки на железных дорогах Вьетнама. Колея 1000 мм

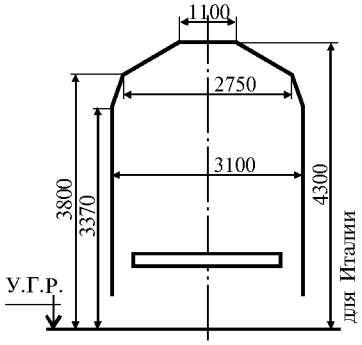


Рис.7.11. Габарит погрузки на железных дорогах Италии. Колея 1435 мм

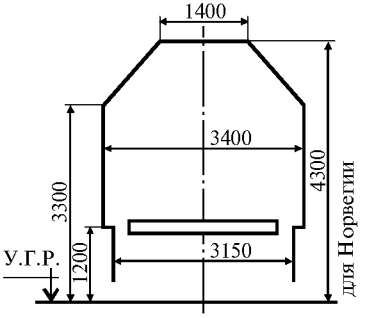


Рис.7.12. Габарит погрузки на железных дорогах Норвегии. Колея 1435 мм

Конструкции не должны выступать за пределы лобового бруса более чем на 400 мм. Длинномерные элементы конструкций перевозят на сцепах из двух или трех (иногда даже четырех, пяти) платформ с опиранием груза на одну или две платформы. При погрузке с опиранием на две платформы необходимо использовать специальные опорно-поворотные устройства – турникеты (рис.7.13), которые обеспечивают возможность поворота платформы относительно груза (при прохождении подвижного состава по кривым) и изменения расстояния между платформами (при трогании с места и торможении). Устройство турникетов требует дополнительных затрат, поэтому чаще погрузку производят на сцеп из двух или трех

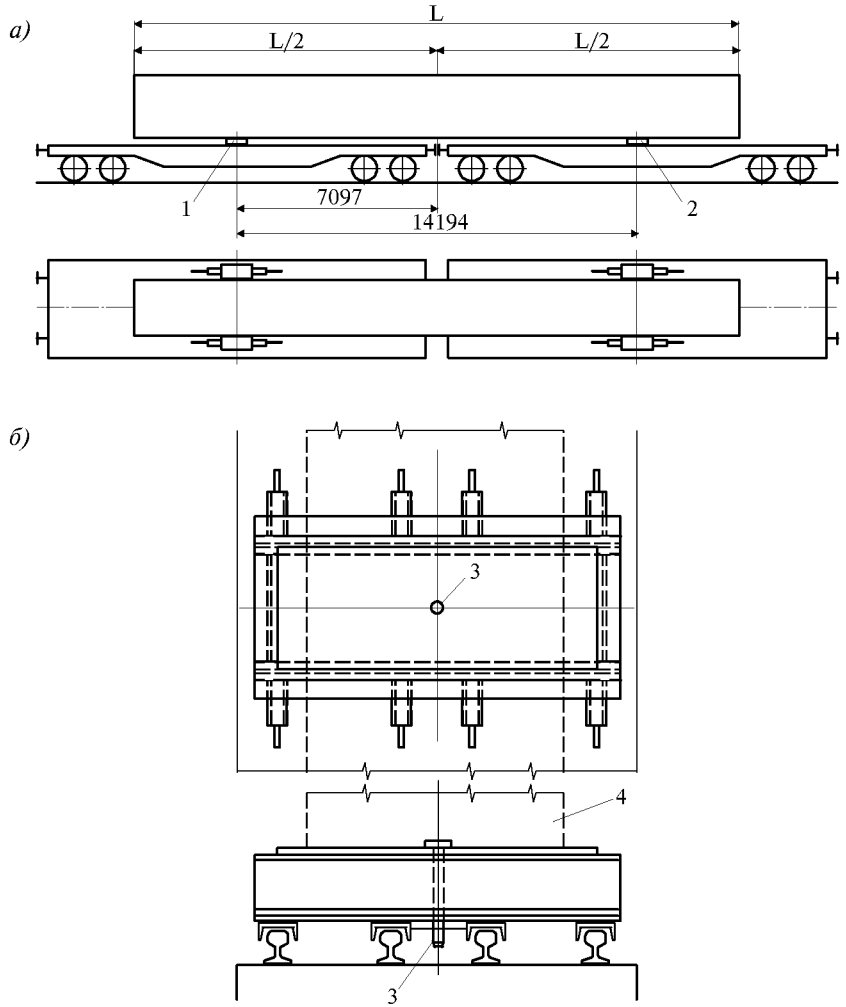


Рис.7.13. Погрузка с опиранием на две платформы

а – схема погрузки; *б* – деталь турникета; *1* – подвижной турникет; *2* – неподвижный турникет; *3* – шкворень; *4* – груз

платформ с опиранием на одну платформу. При погрузке длинномерного груза на одну четырехосную платформу (при расположении центра тяжести груза над центром платформы) максимальная длина груза и его максимальная масса в зависимости от типа рессорного подвешивания платформы должны соответствовать данным, приведенным в табл.7.5

Таблица 7.5. Наибольшие допускаемые массы и длины груза, погруженного на сцеп с опиранием на одну четырехосную платформу в зависимости от типа тележки

Масса груза, т, не более	Длина груза, м, не более		Масса груза, т, не более	Длина груза, м, не более	
	МТ-50	ЦНИИ-ХЗ		МТ-50	ЦНИИ-ХЗ
20	27	30	50	17,5	19
25	24,1	27	55	16,5	18,5
30	22	24	60	16	18
35	20,3	22,5	65	14,3	14,3
40	19	21	70	14	14
45	17,9	20	72	14,1	14,3

Примечание. Расстояние от середины платформы до конца груза с каждой стороны не более половины длины груза, указанной в табл.7.5; МТ-50 и ЦНИИ-ХЗ – типы тележек.

Конструкции, погруженные на подвижной состав, не умещающиеся в габарит погрузки (см.рис.7.1), являются негабаритным грузом. В зависимости от месторасположения превышения габарита погрузки грузы могут иметь боковую, верхнюю или нижнюю негабаритность (рис.7.14). В соответствии с величиной превышения пределов габарита погрузки негабаритность подразделяется на пять степеней: 0 (см.рис.7.14); I (рис.7.15); II (рис. 7.16); III (рис.7.17) и IV (рис.7.18).

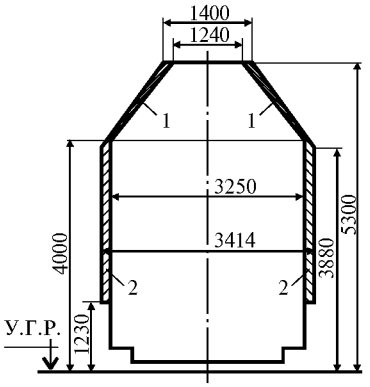


Рис.7.14. Предельное очертание негабаритности погрузки степени 0
1 – зона негабаритности; *2* – зона боковой негабаритности

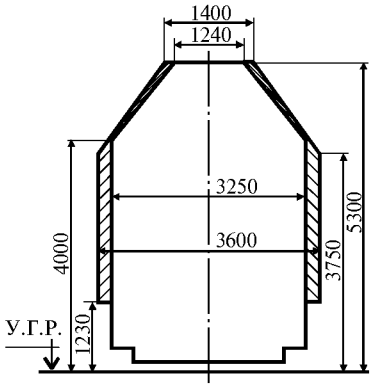


Рис.7.15. Предельное очертание негабаритности погрузки степени I

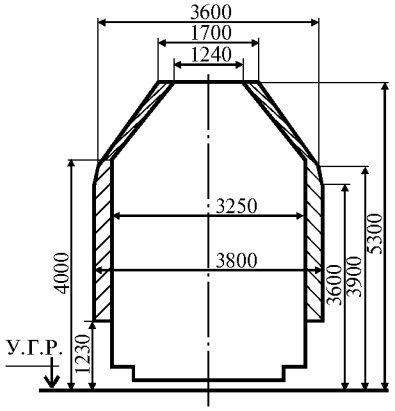


Рис.7.16. Предельное очертание негабаритности погрузки степени II

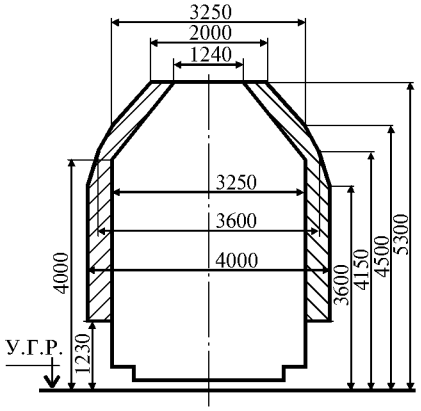


Рис.7.17. Предельное очертание негабаритности погрузки степени III

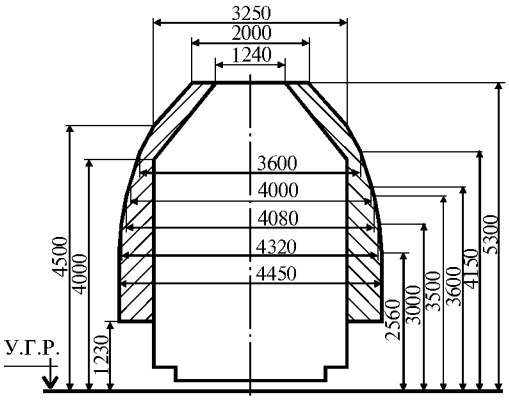


Рис.7.18. Предельное очертание негабаритности погрузки степени IV

Перевозка негабаритных грузов, особенно III и IV степеней негабаритности может производиться только в особых, исключительных случаях, так как представляет значительную сложность для железных дорог и стоимость таких перевозок весьма высока.

7.1.2. Определение расчетной негабаритности груза на кривой железнодорожного пути. При движении подвижного состава на криволинейных участках пути происходит смещение продольной оси груза относительно оси пути. По концам груза возникают наибольшие смещения наружу кривой, а в середине груза – во внутрь кривой. При сооружении железных дорог на криволинейных участках пути осуществляется соответствующее увеличение расстояний между осями смежных путей и между осью пути и наружными очертаниями прилегающих сооружений и устройств. Значения нормативных уширений приведены в “Указаниях по применению габаритов приближения строений”. ГОСТ 9238–83.

Условно габаритным считается груз, габаритный на прямолинейных участках пути и выходящий за габарит погрузки (см.рис.7.1) на кривых не более, чем на величину уширения габаритов приближения строений и междупутий на этих кривых. Негабаритность грузов проверяется для кривой условного радиуса $R = 350$ м. Определенная для этого радиуса негабаритность называется расчетной негабаритностью. Расчетная негабаритность проверяется для длинномерных грузов при отношении длины груза к базе платформы более 1,41; при погрузке конструкций на транспортере с базой 17 м и более; при погрузке на сцепы платформ.

Базой платформы и транспортера является расстояние между шкворнями главных балок; базой сцепа платформ – расстояние между вертикальными осями турникетных опор. Грузы, заполняющие контур габарита погрузки и размещаемые симметрично на сцепе с опиранием на одну платформу или с опиранием на две платформы, являются условно габаритными, если их длина не превышает величин, приведенных в табл.7.6.

Таблица 7.6. Предельная длина грузов, погруженных на сцеп, при которых не требуется проверка расчетной негабаритности

Подвижной состав	База вагона или сцепа платформы, м	Предельная общая длина груза, м
Четырехосная платформа длиной 13,4 м	9,72	18,2
То же, длиной 12,974 м	9,294	17,9
Сцеп из двух четырехосных платформ с рамой длиной 13,4 м	14,62	25,48
То же, с рамой длиной 12,974 м	14,194	24
Транспортер	не более 16,5 м	Не более длины транспортера

Для определения расчетной негабаритности необходимо к действительным размерам груза (с учетом упаковки и крепления) прибавить значение дополнительных смещений от кривой и вычесть значение нормативных уширений габарита приближения строений и междупутий, имеющихся на этой кривой. Максимальные

смещения от оси кривой рекомендуется определять по формулам “Инструкции по перевозке грузов негабаритных и погруженных на транспортеры по железным дорогам колеи 1524 мм”, а нормативные уширения на кривых участках пути приведены в “Указаниях по применению габаритов приближения строений”. ГОСТ 9258–85.

Предельные габариты отправочных элементов для наиболее распространенных схем погрузки (рис.7.19) с учетом смещений (выходов) грузов при движении по кривой с радиусом 350 м приведены в табл.7.7.

Таблица 7.7. Наибольшая ширина груза *B*, мм, при высоте *H* и длине *L*, соответствующая габариту погрузки и негабаритности разных степеней

А. При погрузке на одну платформу грузоподъемностью 62 или 63 т с базой 9294 или 9720 мм согласно рис.7.19,*а*

Максимальная высота, *H*, мм	Габарит очертания погрузки (см.рис.7.1)	Негабаритность степени				
		0	I	II	III	IV
3894	1240	1400	1400	1760	2000	2000
3800	1385	1533	1533	1884	2147	2147
3700	1540	1675	1675	2015	2303	2303
3600	1694	1817	1817	2147	2459	2459
3500	1849	1959	1959	2278	2616	2616
3400	2002	2101	2101	2409	2772	2772
3300	2157	2242	2242	2541	2928	2928
3200	2311	2384	2384	2672	3084	3084
3100	2466	2526	2526	2808	3241	3241
3094	2475	2535	2535	2811	3250	3250
3000	2620	2688	2688	2935	3344	3344
2900	2775	2810	2810	3056	3444	3444
2800	2929	2952	2952	3198	3544	3544
2744	3016	3031	3031	3271	3600	3600
2700	3085	3093	3093	3329	3633	3633
2600	3240	3235	3235	3461	3707	3707
2574	3250	3272	3272	3494	3726	3726
2500	3250	3377	3377	3592	3781	3781
2494	3250	3385	3385	3600	3785	3785
2474	3250	3414	3414	3613	3800	3800
2400	3250	3414	3520	3663	3854	3854
2344	3250	3414	3600	3700	3895	3895
2300	3250	3414	3600	3729	3928	3928
2302	3250	3414	3600	3795	4000	4000
2194	3250	3414	3600	3800	4000	4006
2100	3250	3414	3600	3800	4000	4076
2094	3250	3414	3600	3800	4000	4080
2000	3250	3414	3600	3800	4000	4125
1900	3250	3414	3600	3800	4000	4173
1800	3250	3414	3600	3800	4000	4221
1700	3250	3414	3600	3800	4000	4269
1600	3250	3414	3600	3800	4000	4317
1594	3250	3414	3600	3800	4000	4320
1500	3250	3414	3600	3800	4000	4348
1400	3250	3414	3600	3800	4000	4377
1300	3250	3414	3600	3800	4000	4407
1200	3250	3414	3600	3800	4000	4436
1154 и ниже	3250	3414	3600	3800	4000	4450

Б. При погрузке на сцеп с опиранием на одну платформу грузоподъемностью 62 т и базой 9294 мм согласно рис.7.19,*б*

Предельные габариты даны для максимальной длины отправочного элемента, равной 24000 мм, при симметричной погрузке со свесами по обе стороны средней платформы или 18000 мм при свесе на одну строну средней платформы. При этом наибольшее смещение продольной оси груза относительно оси пути на кривой R=350 мм с учетом половины уширения междупутья двухпутной линии железной дороги и разбега ходовых частей составит 137 мм. При меньшей длине отправочного элемента табличные значения размера B соответственно увеличиваются: при длине груза до 17,5 м включительно – на 274 мм; 18 м – на 254 мм; 19 м – на 216 мм; 20 м – на 170 мм; 21 м – 132 мм; 22 м – на 90 мм и 23 м – на 46 мм.

При массе груза 60 т его длина не должна превышать 16 м; 50 т – 17 м; 40 т – 19 м; 30 т – 22 м; 20 т и менее – 24 м.

Максимальная высота, H, мм	Габарит очертания погрузки (см.рис.7.1)	Негабаритность степени				
		0	I	II	III	IV
3900	966	1126	1126	1486	1726	1726
3850	1043	1197	1197	1550	1804	1804
3700	1275	1410	1410	1749	2038	2038
3600	1430	1552	1552	1880	2195	2195
3500	1584	1694	1694	2012	2351	2351
3400	1739	1835	1835	2143	2507	2507
3300	1893	1977	1977	2275	2663	2663
3200	2048	2119	2119	2406	2820	2820
3100	2202	2260	2260	2537	2976	2976
3000	2356	2402	2402	2669	3076	3076
2900	2510	2544	2544	2800	3176	3176
2800	2666	2685	2685	2932	3276	3276
2700	2825	2827	2827	3063	3067	3067
2600	2976	2976	2960	3194	3437	3437
2580	2976	2999	2999	3220	3452	3452
2500	2976	3110	3110	3326	3511	3511
2480	2976	3140	3140	3340	3526	3526
2400	2976	3140	3254	3393	3584	3584
2300	2976	3140	3326	3460	3658	3658
2208	2976	3140	3326	3520	3726	3726
2200	2976	3140	3326	3526	3726	3732
2100	2976	3140	3326	3526	3726	3806
2000	2976	3140	3326	3526	3726	3854
1900	2976	3140	3326	3526	3726	3909
1800	2976	3140	3326	3526	3726	3950
1700	2976	3140	3326	3526	3726	3998
1600	2976	3140	3326	3526	3726	4046
1500	2976	3140	3326	3526	3726	4074
1400	2976	3140	3326	3526	3726	4104
1300	2976	3140	3326	3526	3726	4134
1200	2976	3140	3326	3526	3726	4164
1160 и ниже	2976	3140	3326	3526	3726	4176

В. При погрузке на сцеп с опиранием на одну платформу грузоподъемностью 62 – 63 т и базой 9720 мм согласно рис.7.19,*в*

Предельные габариты даны для максимальной длины отправочного элемента, равной 24000 мм, при симметричной погрузке со свесами по обе стороны средней платформы или 18000 мм при свесе на одну строну средней платформы. При этом наибольшее смещение

продольной оси груза относительно оси пути на кривой R=350 мм с учетом половины уширения междупутья двухпутной линии железной дороги и разбега ходовых частей вагона составит 128 мм. При меньшей длине отправочного элемента табличные значения размера B соответственно увеличиваются: при длине груза до 18 м включительно – на 256 мм; 19 м – на 214 мм; 20 м – на 174 мм; 21 м – 132 мм; 22 м – на 90 мм и 23 м – на 46 мм.

При массе груза 60 т его длина не должна превышать 16 м; 50 т – 17 м; 40 т – 19 м; 30 т – 22 м; 20 т и менее – 24 м.

Максимальная высота, H, мм	Габарит очертания погрузки (см.рис.7.1)	Негабаритность степени				
		0	I	II	III	IV
3880	984	1144	1144	1504	1744	1744
3880	1108	1238	1238	1610	1870	1870
3700	1262	1400	1400	1740	2025	2025
3600	1417	1543	1543	1872	2182	2182
3500	1572	1673	1673	2003	2338	2338
3400	1726	1825	1825	2135	2494	2494
3300	1881	1966	1966	2266	2651	2651
3200	2035	2108	2108	2398	2808	2808
3100	2190	2250	2250	2530	2964	2964
3080	2221	2278	2278	2556	2994	2994
3000	2345	2393	2393	2660	3074	3074
2900	2500	2533	2533	2792	3174	3174
2800	2654	2675	2675	2923	3274	3274
2730	2762	2774	2774	3016	3344	3344
2700	2808	2816	2816	3055	3366	3366
2600	2963	2959	2959	3186	3440	3440
2560	2994	3016	3016	3238	3470	3470
2480	2994	3130	3130	3344	3529	3529
2460	2994	3158	3158	3357	3543	3543
2330	2994	3158	3344	3444	3640	3640
2300	2994	3158	3344	3464	3662	3662
2200	2994	3158	3344	3530	3736	3736
2188	2994	3158	3344	3538	3744	3744
2180	2994	3158	3344	3544	3744	3750
2100	2994	3158	3344	3544	3744	3809
2080	2994	3158	3344	3544	3744	3824
2000	2994	3158	3344	3544	3744	3862
1900	2994	3158	3344	3544	3744	3910
1800	2994	3158	3344	3544	3744	3958
1700	2994	3158	3344	3544	3744	4006
1600	2994	3158	3344	3544	3744	4054
1580	2994	3158	3344	3544	3744	4064
1500	2994	3158	3344	3544	3744	4088
1400	2994	3158	3344	3544	3744	4147
1200	2994	3158	3344	3544	3744	4176
1140 и ниже	2994	3158	3344	3544	3744	4194

На рис.7.20 показана возможная схема погрузки длинномерного груза с опиранием на две платформы с промежуточной платформой прикрытия между ними. При такой схеме непременно требуется производить расчет возможной габаритной ширины груза в зависимости от его длины, базы опирания и величины свесов.

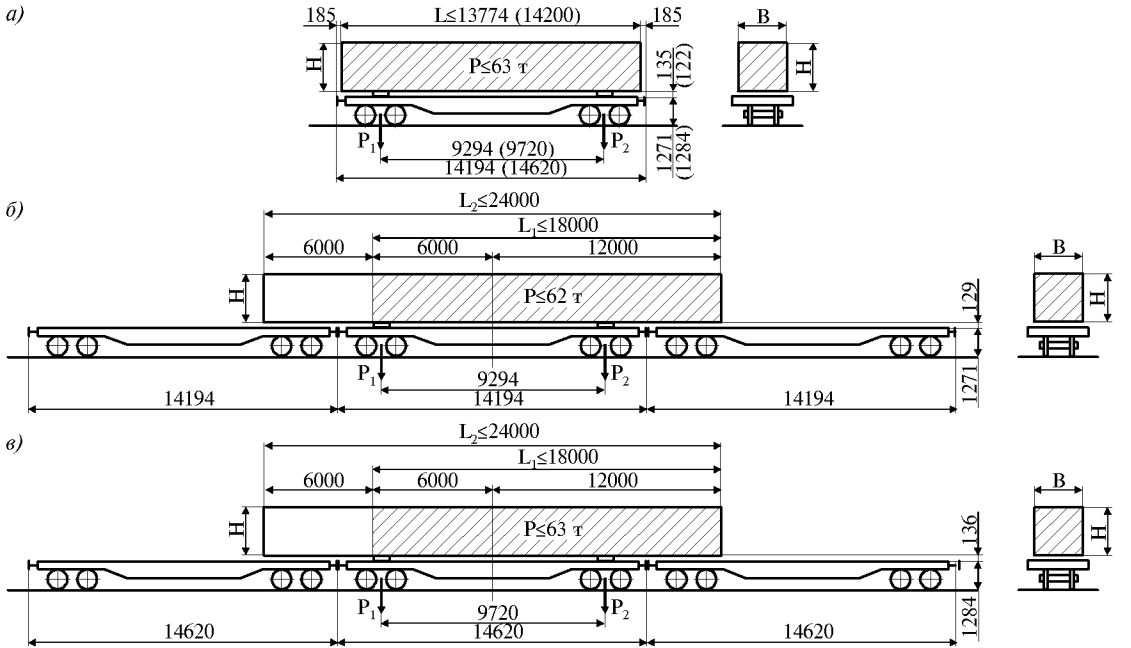


Рис.7.19 Погрузка конструкций

а – на одну платформу; *б* – на сцеп платформ с базой 9294 мм с опиранием груза на одну платформу; *в* – на сцеп платформ с базой 9720 мм с опиранием груза на одну платформу

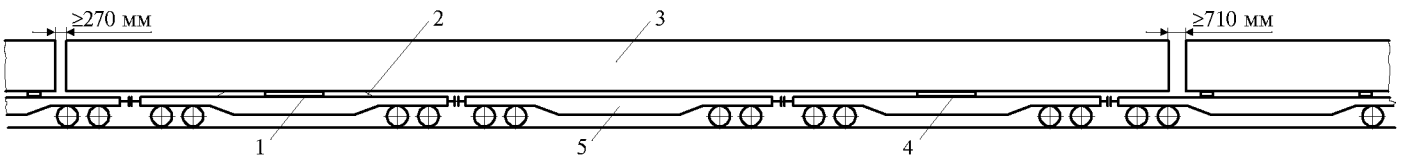


Рис.7.20. Схема погрузки длинномерных конструкций на две платформы с промежуточной платформой прикрытия

1 – неподвижный турникет; *2* – продольное закрепление груза; 3 – длинномерная конструкция; *4* – подвижной турникет

7.1.3. Рекомендации по членению стальных конструкций на отправочные элементы. При разработке чертежей стадии КМ и деталировочных чертежей КМД необходимо учитывать принимаемый для этих конструкций способ перевозки и возможности получения заводами-изготовителями подвижного состава. Отправочные отдельные или спакетированные и жестко скрепленные в блок конструктивные элементы должны отвечать следующим требованиям:

- сохранять неизменность формы и геометрических размеров в процессе транспортировки и погрузочно-разгрузочных работ;
- масса не должна превышать грузоподъемности кранового оборудования завода-изготовителя конструкций и монтажной организации;
- габаритные размеры и масса должны соответствовать габаритам и грузоподъемности подвижного состава железных дорог, по которым эти конструкции предстоит транспортировать;
- иметь необходимые детали для строповки (при перевозке и монтаже) и для установки подмостей и навески лестниц по заданию монтирующей организации.

Допускается членение конструкций с учетом негабаритности нулевой степени. В исключительных случаях, когда другое решение экономически нецелесообразно или технически невозможно по условиям изготовления и монтажа, допускается членение конструкций на отправочные элементы с негабаритностью I–IV степеней. Длина отправочных элементов, как правило, не должна превышать 12 м при погрузке в полувагоны и 13,77 м при погрузке на открытый подвижной состав. В тех случаях, когда габаритность элементов нарушается из-за выступающих небольших деталей, эти детали рекомендуется отделять от основного элемента и устанавливать на монтажной площадке при укрупнительной сборке.

Стыки колонн одноэтажных зданий с мостовыми кранами следует располагать выше уровня опирания подкрановых балок. При негабаритных базах колонн их следует отделять от стержня колонны с устройством монтажного стыка, как можно ближе к нулевой отметке. Стыки колонн многоэтажных зданий рекомендуется располагать через 2–3 этажа на 700–1000 мм выше уровня крепления верхней части ригелей и балок. Подкрановые балки крайних и средних рядов пролетом до 18 м рекомендуется отправлять целиком, а при бóльших пролетах – элементами длиной до 12 м. Стропильные и подстропильные фермы пролетом до 18 м рекомендуется отправлять целиком, пролетами 24–56 м – двумя частями. Площадки рекомендуется отправлять в виде готовых щитов с приваренным к балкам настилом.

Отправочные элементы листовых конструкций должны иметь максимально допускаемые размеры. Плоскостные элементы или вальцованные листы пакетируются. Гладкостенчатые листовые конструкции с толщиной до 18 мм могут поставляться рулонами диаметром до 3,2 м с шириной полотна в рулоне (длиной рулона) до 18 м, массой до 60 т. Газгольдеры, горизонтальные резервуары и другие аналогичные конструкции диаметром до 3,25 м длиной до 27 м рекомендуется поставлять целиком.

7.2. Перевозка конструкций автомобильным транспортом

Для перевозки металлических конструкций автомобильным транспортом от места изготовления или складирования к месту монтажа или перегрузки на другие виды транспорта используются грузовые автомобили общего назначения (рис. 7.21,*а*,*б*, табл.7.8), автомобили повышенной проходимости (рис. 7.21,*а*,*б*, табл.7.9) и седельные тягачи различной мощности (рис.7.21,*в*,*г*, табл.7.10; 7.11). Автомобили могут быть использованы совместно с прицепами общего назначения (рис.7.21,*е*,*ж*,*и*, табл.7.11) или прицепами-тяжеловозами (рис.7.21,*к*,*л*, табл.7.13). Седельные тягачи используются для буксировки полуприцепов общего назначения (см.табл.7.12) или полуприцепов-тяжеловозов (см.табл.7.13).

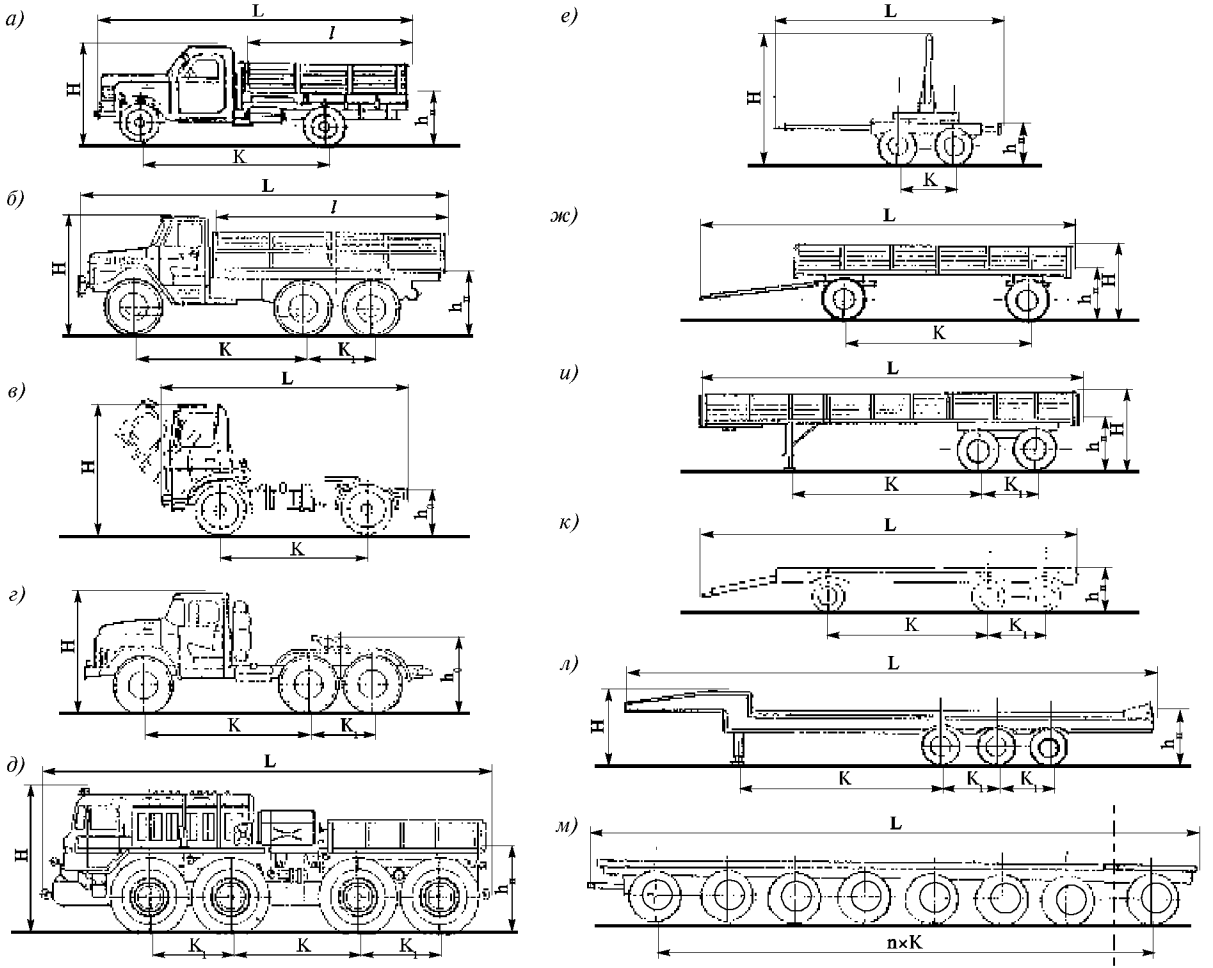


Рис.7.21. Автомобильные средства перевозки металлоконструкций

а – грузовая автомашина двухосная;
б – то же, трехосная;
в – автомобильный тягач двухосный;
г – то же, трехосный;
д – автомобильный четырехосный аэродромный тягач;
е – автомобильный прицеп-роспуск;
ж – прицеп общего назначения;
и – полуприцеп общего назначения;
к – прицеп-тяжеловоз;
л – полуприцеп-тяжеловоз;
м – платформа-тяжеловоз

Таблица 7.8. Характеристика грузовых автомобилей общего назначения

Параметры	ГАЗ-52-04	ГАЗ-53-12	ЗИЛ-431510	МАЗ-5335	КамАЗ-5320	ЗИЛ-133-ГЯ	КамАЗ-53212	КрАЗ-257-Б1
Марка буксируемого прицепа	71ОБ; В	71ОБ; В	ГКБ-817В	МАЗ-8926	ГКБ-8350	–	СЗАП-8352	–
Колесная формула	4×2				6×4			
Грузоподъемность, кг	2500	4500	6000	8000	8000	10000	10000	12000
Допускаемая полная масса буксируемого прицепа, кг	2500	3500	8000	12000	11500	11500	14000	20000
Полная масса груженого и заправленного автомобиля, кг	5170	8115	10800	14950	15305	17835	18225	22400
Нагрузка на дорогу, кН:								
через шины передних колес	14,7	19,8	28,4	48,5	42,9	43,7	41,2	44,1
через шины задних колес (тележки)	34,4	59,7	77,4	98	107	133,6	136,6	175,4
Длина машины, L, мм	5708	6395	7610	7230	7435	9250	8530	9640
Ширина машины, мм	2280	2380	2500	2500	2500	2500	2500	2650
Высота машины, H, мм	2150	2270	2400	2720	3350	2405	3650	2670
База K, K_1, мм	3300	3700	4500	3950	3190+1320	4610+1400	3690+1320	5050+1400
Колея передних/задних колес, мм	1650/1690	1630/1690	1800/1790	1970/1865	2006/1856	1835/1850	2026/1856	1950/1920
Длина кузова, l, мм	3060	3740	4686	4965	5200	5200	6100	5770
Ширина кузова, мм	2000	2170	2326	2360	2320	2320	2320	2480
Высота погрузки, $h_п$, мм	1210	1350	1450	1450	1350	1350	1350	1495
Мощность двигателя, кВт	55	88	110	132	154	154	154	176
Максимальная скорость, км/ч	70	80	90	85	80	85	80	68

Таблица 7.9. Характеристика грузовых автомобилей повышенной проходимости

Параметры	ГАЗ-66-11	ЗИЛ-157КД	Урал-375ДМ	КамАЗ-43105	КрАЗ-255Б1	КрАЗ-260	МАЗ-7310	КЗКТ-537Л
Марка буксируемого прицепа	ТАПЗ-755	710В		ГКБ-8350	МАЗ-8926	МАЗ-8926		ЧМЗАП-8389
Колесная формула	4×4			6×6			8×8	8×8
Грузоподъемность, кг	2000	5000	10000	7000	7500	9000	21000	16350
Допускаемая полная масса буксируемого прицепа, кг	2000	3600	5000	7000	30000	30000	25000	75000
Полная масса груженого и заправленного автомобиля, кг	3610	8200	13325	15425	19415	22000	44850	40000
Нагрузка на дорогу, кН:								
через шины передних колес	28,6	23,5	36,3	49,7	53,4	63,7	213	138,9
через шины задних колес (тележки)	29,7	56,2	94,5	101,4	136,9	151,9	227	253
Длина машины, L, мм	5806	6922	7355	7960	8645	9030	11657	9291
Ширина машины, мм	2322	2315	2674	2500	2750	2722	2975	3100
Высота машины, H, мм	2490	2915	2980	3530	3175	3230	2950	3100
База K, K_1, мм	3300	3665+1120	3525+1400	3340+1320	4600+1400	4600+1400	2200+3300+2200	1650+2600+ 1650
Колея передних/задних колес, мм	1800/1750	1755/1750	2000	2010	2160	2160	2375	2200
Длина кузова, l, мм	3383	3570	3900	5200	4565	5000	7222	3065
Ширина кузова,мм	2050	2090	2430	2320	2500	2520	2848	2500
Высота погрузки, h_n, мм	1110	1380	1420	1530	1600	1560	1850	1845
Мощность двигателя, кВт	88	81	132	154	176	220	386	386
Максимальная скорость, км/ч	90	65	75	85	71	80	60	40

Таблица 7.10. Характеристика седельных тягачей (двухосных)

Параметры	ГАЗ-52-06	КАЗ-608В2	ЗИЛ-441510	ЗИЛ-441610	МАЗ-5430	МАЗ-504В	МАЗ-5429	МАЗ-54322
Полуприцеп	–	КАЗ-9368	ОдАЗ-885	ОдАЗ-855	МАЗ-5232В	МАЗ-93971	МАЗ-93801	–
Колесная формула	4×2							
Масса груза, приходящаяся на седельно-сцепное устройство, кг	2870	6400	6400	6400	7500	7700	7750	8800
Полная масса полуприцепа, кг	6000	14500	14400	14400	17500	25700	17750	26800
Полная масса автопоезда, кг	8585	18625	18660	18640	24000	32500	24525	34850
Нагрузка на дорогу, кН:								
через шины передних колес	14,8	27,9	26	25,8	39,6	44,1	44,2	58,8
через шины задних колес	38,6	76,2	78,4	78,4	98	98	98	98
через шины колес полуприцепа	30,7	78,4	78,4	78,4	98	176,4	98	105,8
Габаритные размеры тягача, мм	4950×2165×2150	5062×2360×2525	5280×2420×2400	5280×2360×2400	6280×2500×2720	5570×2500×2735	5570×2500×2640	5975×2500×3550
База K, мм	3300	2900	2900	3300	3400	3400	3400	3550
Колея передних/задних колес, мм	1650/1690	1800/1790	1800/1790	1800/1790	1970/1865	1970/1865	1970/1865	2002/1792
Высота опорной плиты, h_o, мм	1130	1230	1245	1245	1300	1295	1300	1350
Мощность двигателя, кВт	55	110	110	110	132	132	132	206
Максимальная скорость, км/ч	50	80	80	80	75	85	75	95

Таблица 7.11. Характеристика седельных аэродромных тягачей (трех- и четырехосных)

Параметры	ЗИЛ-131В	«Урал-375СМ-К1»	КрАЗ-255В1	КрАЗ-260В	КамАЗ-54112	КрАЗ-258Б1	МАЗ-64227	МАЗ-537Г
Полуприцеп	–	–	МАЗ-938Б	МАЗ-938	ОдАЗ-9385	ЧМЗАП-5524П	МАЗ-9389	ЧМЗАП-9990
Колесная формула	6×6					6×4		8×8
Масса груза, приходящаяся на седельно-сцепное устройство, кг	3500	5500	8000	9500	11100	12000	12800	27000
Полная масса полуприцепа, кг	7500	12000	26000	27500	26000	30000	28800	68000
Полная масса автопоезда, кг	14100	19750	28655	34400	33325	39325	38000	90300
Нагрузка на дорогу, кН:								
через шины передних колес	31,6	39,8	53	59,1	43	42,2	58,8	176,4
через шины задних колес	67,3	89,3	129,8	145	136,5	166,7	156,8	303,3
через шины колес полуприцепа	39,2	64,4	98	132,3	141	176,4	156,8	404,7
Габаритные размеры тягача, мм	6480×2420 ×2480	6692×2500 ×2715	7685×2750 ×2930	8220×2722 ×3230	6180×2500 ×2830	7195×2630 ×2670	6570×2500 ×3550	8960×2885 ×3100
База K, K_1, мм	3350+1250	3525+1400	4600+1400	4600+1400	2840+1320	4080+1400	2900+1400	1700+2650+1700
Колея передних/задних колес, мм	1820	2000	2160	2160	2060/1856	1950/1920	2002/1792	2200
Высота опорной плиты, h_o, мм	1495	1700	1715	1710	1280	1350	1280–1470	1925
Мощность двигателя, кВт	110	110	176	176	191	176	235	386
Максимальная скорость движения автопоезда, км/ч	80	65	60	75	80	68	95	80

Таблица 7.12. Характеристика прицепов и полуприцепов – тяжеловозов (платформ)

Параметры	Прицепы-роспуски		Прицепы			Полуприцепы		
			общего назначения					
	ТМЗ-802-010	ГКБ-9383-10	ГКБ-817В	МАЗ-8926	СЗАП-8352	ОдАЗ-885	МАЗ-93801	Модель 9385
Тяговый автомобиль	ЗИЛ-157КД	КрАЗ-255Л1	ЗИЛ-431510	КрАЗ-255Б1	КамАЗ-53212	ЗИЛ-441510	МАЗ-5429	КамАЗ-54112
Число осей	2	2	2	2	2	1	1	2
Длина перевозимого груза, м	6–17	24–27	–	–	–	–	–	–
Масса перевозимого груза, кг	8000	15000	5400	8240	10000	7800	13750	20500
Полная масса прицепа с грузом, кг	10440	19150	8040	12000	13700	10500	17750	25800
Нагрузка на седельное устройство тягача, кН	–	–	–	–	–	44,1	75,9	111,2
Нагрузка на дорогу, кН:								
через шины передних колес	–	–	39,3	58,8	67,1	–	–	–
через шины задних колес (тележку)	102,3	187,7	39,3	58,8	67,1	58,8	98	141,6
База *K*, мм	1200	1350	3000	3700	4340	5480	5750	1320
Колея, мм	1790	1900	1800	1970	1850	1790	1860	1850
Габаритные размеры, мм	4230×2335 ×2785	11414×2612 ×2900	6688×2500 ×1870	7710×2500 ×2865	8290×2500 ×1873	6385×2455 ×2000	8745×2500 ×2240	10390×2500 ×2090
Внутренние размеры кузова, мм	Ширина между стойками:							
	2088	2276	4683×2322	5500×2365	6100×2320	6385×2455	8745×2500	10170×2320
	Высота стоек:		×572	×685	×500	×2000	×2240	×560
	1293	1230						
Погрузочная высота, мм	1492	1670	1300	1440	1370	1400	1450	1480
Допустимая скорость, км/ч	60	60	80	85	100	80	85	100

Таблица 7.13. Характеристика прицепов и полуприцепов-тяжеловозов (платформ)

Параметры	Прицепы				Полуприцепы			
	тяжеловозы							
	ЧМЗАП-93853 (с подкатной тележкой)	ЧМЗАП-8386	ЧМЗАП-5212А	ЧМЗАП-8389	ЧМЗАП-9399	ЧМЗАП-5524П (без подкатной тележки)	ЧМЗАП-93853(без подкатной тележки)	ЧМЗАП-9990
Тяговый автомобиль	КрАЗ-260	КЗКТ-537Л	КЗКТ-537Л	КЗКТ-537Л	КрАЗ-258Б1	КрАЗ258Б1	МАЗ-6422	МАЗ-537Г
Число осей	3	3	4	12	2	2	2	3
Масса перевозимого груза, кг	22400	40000	60000	300000	25000	25600	26200	52000
Полная масса прицепа с грузом, кг	30000	53170	73900	355934	33800	30000	32700	70000
Нагрузка на седельное устройство тягача, кН	–	–	–	–	117,6	117,6	144	186,2
Нагрузка на дорогу, кН:								
через шины подкатной тележки или передних колес	98	168,2	362,4	Через шины колес каждой оси	–	–	–	–
через шины задних колес (тележки)	196	352,8	361,4	288,3	213,6	176,4	176,4	499,8
База K, K_1, мм	7920+1520	3850+1300	1190+4210+1190	11×1624 =17865	1400	1400	1520	1300+1300
Колея, мм	1920	1780	2470	2250	1860	1920	1920	1780
Габаритные размеры, мм	13250×2500 ×1645	11230×3150 ×1630	11400×3300 ×1695	28360×3740 ×1142	12000×3150 ×1820	9832×2638 ×1597	11318×2500 ×1760	14420×3150 ×3190
Погрузочная высота, мм	–	1170	–	–	1225	–	–	1260
Допустимая скорость, км/ч	80	60	32	5	40	68	80	60

Для транспортировки особенно тяжелых конструкций используются аэродромные тягачи (рис.7.21,*д*) и специальные транспортные платформы (рис.7.21,*м*). В указанных таблицах даны технические характеристики и параметры лишь наиболее распространенных или характерных автотранспортных средств. Более подробно и полно они представлены в автомобильных справочниках, которые периодически переиздаются.

Габариты и массы элементов металлоконструкций, перевозимых автотранспортом, определяются габаритами приближения, геометрическими параметрами и грузоподъемностью автотранспортных средств и характеристикой трассы следования. Высота погруженного на автотранспорт элемента не должна превышать 4,5 м от уровня дороги, включая высоту погрузки на автомобиль или прицеп. Ширина элемента не должна, превышать ширину пола автомобиля или прицепа; длина элемента колеблется от 4 (при перевозке на автомашинах без прицепа) до 15 м. Плоские решетчатые и листовые элементы длиной более 6 м, жесткость которых недостаточна, должны пакетироваться или перевозиться на специально оборудованных прицепах-панелевозах.

7.3. Перевозка конструкций морским транспортом

Для перевозки металлоконструкций морским путем используются океанские грузовые суда общего назначения и иногда – специализированные суда, оборудованные устройством для загрузки в кормовой части направляющими внутри корпуса и роликовыми тележками для задвижки длинномерных грузов. Характеристики некоторых, наиболее распространенных в нашей стране типов судов приведены в табл.7.14.

Как правило, морские перевозки являются частью смешанных перевозок, так как конструкции с заводов-изготовителей в морские порты погрузки и от портов назначения до строительных площадок доставляются железнодорожным или автомобильным транспортом. Габаритные размеры и масса отправочных элементов при этом должны соответствовать требованиям всех видов транспорта, участвующих в этих перевозках. При поставке конструкций в другие страны необходимо учитывать габариты подвижного состава и требования этих стран.

Смешанные перевозки связаны с многократными погрузочно-разгрузочными и складскими операциями, поэтому необходимо принять дополнительные меры для избежания повреждений конструкций при транспортировании, в частности:

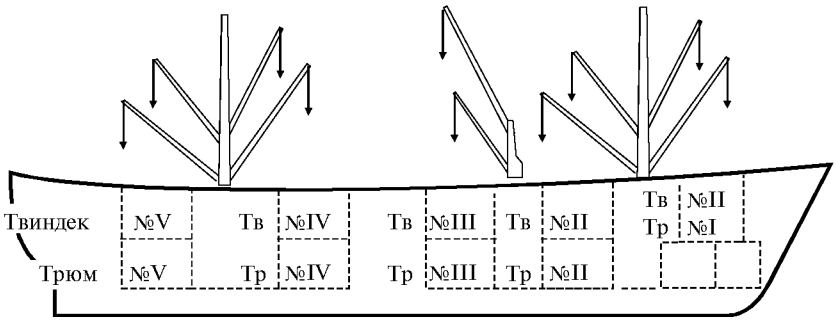
- стыковые детали не должны выступать за пределы конструктивных элементов. Их вдвигают внутрь и надежно там закрепляют или перевозят в отдельных пакетах или ящиках;
- при проектировании решетчатых конструкций типа колонн перья уголков раскосов ориентируют во внутрь элементов;
- в конструкциях не должно быть выступающих элементов недостаточной прочности;
- свободные концы стержней отправочных марок должны иметь монтажные планки или уголки для временного раскрепления к основным элементам. Перед монтажом временные детали раскреплений удаляются;
- в торцах конструктивных элементов из труб или в рулонах должны быть крестовые распорные элементы;
- элементы конструкций массой более 10 т должны быть снабжены деталями для строповки во время погрузочно-разгрузочных работ, а места строповки должны быть обозначены краской;
- завальцованные листовые элементы должны пакетироваться в блоки и фиксироваться вспомогательными конструкциями, исключающими возможность развальцовки при перевозке.

Таблица 7.14. Грузоподъемность морских судов, грузоподъемность и число их стрел и кранов, размеры трюмов, твиндеков и люков

Наименование судов	Грузоподъемность судов, т				Стрела		Кран		Номер и размер, м						Размер люка, м	
									трюмов			твиндеков				
	водоизмещение	дедвейт	масса без запасов и груза	чистая грузоподъемность при полных запасах	грузоподъемность, т	число	грузоподъемность, т	число	№	длина	глубина	№	длина	высота	длина	ширина
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
«Полтава» «Бежица»	18500	12730	5770	10514	60	1	2,5/5	13	I	16,1	4	I	16,1	3,6	8,4	6
									II	17,3	6,6	II	17,3	3,3	13,7	6,1
									III	18,4	6,6	III	16,8	3,1	19,7	6,1
									IV	28,8	6,6	IV	27,2	3,1	24,9	6,1
									V	17,6	6,6	V	17,6	3,1	13,7	6,1
«Белорецк»	20340	14150	6190	12350	60/25/7,5	2	5	6	I	17,5	4,5	I	17,5	4,5	9,6	5,2
									II	17,8	7	II	17,8	4,2	11	10
									III	25	7	III	25	3,6	16,2	10
									IV	25	7	IV	25	3,6	17,9	10
									V	27,7	3,8	V	27,7	4,2	16,2	8
									Полубак					2,2	11	8
«Выборг»	17900	12295	5605	10490	60	1	–	–	I	18	5,5	I	18	4,3/2,6	9,1	4,5/6
									II	17,2	5,5	II	17,2	4	10,6	11
									III	26,4	6	III	26,4	4	19	11
									IV	16	6,2	IV	16	4	9,1	11
									V	20,4	3	V	20,4/17,2	3,4/3	12,9	6/11
«Капитан Кушнаренко»	22180	15768	6412	13620	–	–	2,5/5	12	I	16,4	4,5	I	13,6	2,2	9,6	7,1
									II	19,6	7,7	II	19,6	3,3	11	10,8
									III	18,3	7,6	III	18,3	3	11	10,8
									IV	17,4	7,7	IV	17,4	3,5	11	10,8
									V	18,3	7,7	V	18,3	3,5	11	11
									VI	16,3	8,1	VI	19,4	3,2	9,6	9,4
«Краснодар»	17400	12200	5200	10135	60	1	5	4	I	17,4	5,6	I	19,2	5,4	8,2	9,2
					40	1	–	–	II	16,2	6,2	II	16,2	3,6	10,6	10,6
									III	30	6,2	III	27,2	3,3	22,7	10,6
									IV	16,3	6,2	IV	16,8	3,3	10,6	10,6
									V	15,5	3,5	V	19,5/21,2	2,3/2,6	10,5/6,8	9,1/7

Продолжение табл. 7.14.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
«Краснокамск»	17400	12350	5050	10135	60 40 10/5	1 1 4	– – 5	– – 4	I II III IV V	17,4 16,2 30 16,8 15,5	5,6 6,8 6,2 6,2 3,5	I II III IV V	19,2 16,2 27,2 16,8 19,5/21,2	5,4 3,6 3,3 3,3 2,3/2,6	8,2 10,6 22,7 10,6 9,1	9,2 10,6 10,6 10,6 7
«Муром»	18110	12481	5629	11010	60 10 5 3	1 4 8 1	– – – –	– – – –	I II III IV V	16,2 18,9 27,6 16,8 22,1	4,5 6,4 6,4 6,4 3,7	I II III IV V	17,8 18,9 27,6 16,8 22,1	2,2 4 3,4 3,3 3,6	13 15,4 25,9 13,9 14,6	4,2 11 11 11 5,7
«Новгород»	17895	12500	5395	10950	80	1	5	5	I II III IV V	18 20,4 20,6 20,6 15,4	5,6 7,2 7,2 7,2 7	I II III IV V	18,6 21,4 21,4 21,4 19	4,6 4 3,2 3,2 3,6	8,2 13,7 13,7 13,7 10,5	9,1 10,6 10,6 10,6 10,6
«Омск»	20480	14191	6289	12494	60 2,5	1 1	– 5	– 12	I II III IV V	18 18,6 29,8 19 16,2	5,2 7,4 7,4 7,4 4	I II III IV V	18 18,6 29,8 19 16,2	4,2 4 3,2 3,4 4,2	10,2 11,2 23,2 11,2 9,6	7 11 11 11 8
«Тула»	20510	14170	6340	11425	60 5	2 12	– –	– –	I II III IV V	15,1 19,1 27,8 19 19,2	4,5 6,5 6,5 6,5 3	I II III IV V	19,4 22 29,4 19 15,1	4,8 3,6 3 3 1,7	9,8 12,8 20 12 10,4	9,5 11,1 11,1 11,1 9,5
«Славянск»	18320	12600	5720	10830	60 10	2 4	2,5/5	6	I II III IV V	17,2 21,4 21,3 21,3 16,5	3,3 6,5 6,4 6,4 7	I II III IV V	15,2/17,2 21,4 21,3 21,3 15	3,7 3,7 3,7 3,7 4,8	9,8 14,4 14,1 14,7 14,6	9,4 11 11 11 9,4
«Тикси»	17180	12050	5130	10364	60 5	2 16	– –	– –	I II III IV V	21,3 20,2 20,2 21 18	7,7 7,7 7,7 7,7 7,7	I II III IV V	24,8 20,2 23,3 21 27,6	4,1 3 2,6 3 3,6	11,6 12,1 12,1 12,1 12,1	9 9 9 9 9



Для обеспечения удобства перегрузок и исключения повреждений и деформаций все элементы, не обладающие достаточной жесткостью или устойчивостью, должны быть объединены в пакеты. Размеры пакетов и их масса ограничиваются габаритами подвижного состава, размерами люков, размерами трюмов и грузоподъемностью транспортных средств и средств механизации погрузки и разгрузки. Пакеты, составленные из отдельных элементов, должны иметь геометрическую неизменяемость и без каких либо переделок обеспечивать возможность перегрузок с железнодорожного состава и наоборот. Как правило, пакетируются элементы стропильных и подстропильных ферм, решетчатых подкрановых балок, тормозных площадок, лестниц, перил, прогонов, связей, легких колонн, а также панели ограждающих конструкций и листы профилированного настила. Мелкие детали конструкций при морских перевозках укладываются в ящики. Раскрепление конструкций в трюмах судов или на палубах производится в соответствии с действующими в пароходствах правилами и нормативными документами.

Перевозки с участием речных и морских пароходств называются перевозками в прямом водном сообщении; перевозки с участием речных и морских пароходств, а также других видов транспорта (железнодорожного, автомобильного и воздушного) называются перевозками в прямом смешанном сообщении. Перевозки морским транспортом между портами одного моря или двух смежных морей являются перевозками в малом каботаже, при этом, например, Черное и Азовское моря рассматриваются как одно целое. Перевозки морским транспортом между портами разных морей именуются перевозками в большом каботаже.

7.4. Перевозка конструкций речным транспортом

Перевозка металлоконструкций речным транспортом производится на грузовых речных судах общего назначения, самоходных и несамоходных баржах. Перевозки речным транспортом производятся прямым или смешанным железнодорожно-водным сообщением.

Габариты элементов металлических конструкций, перевозимых речным транспортом аналогичны габаритам железнодорожного транспорта. Однако из-за большого разнообразия погрузочно-разгрузочных средств портов и пристаней предельные массы отправочных марок должны быть согласованы с управлением конкретных пароходств. Требования по пакетированию конструкций и их сохранности при речных перевозках аналогичны требованиям морских перевозок (см.п.7.3).

7.5. Перевозка конструкций воздушным транспортом

В особых случаях стальные конструкции могут быть перевезены воздушным транспортом: транспортными самолетами типа ИЛ-12, ИЛ-14, «Антей», «Руслан» или вертолетами различных марок. Высота и ширина элементов конструкций

должны быть на 30–40 мм меньше размеров дверей. Для самолетов ИЛ-12 и ИЛ-14 – 1550×2350; длина элементов до 2500 мм, максимальная масса – до 1000 кг. Для тяжелых транспортных самолетов геометрические размеры конструкций и их максимальная масса в каждом конкретном случае должны согласовываться с эксплуатационными службами. Мелкие детали должны быть спакетированы или уложены в контейнеры.

Грузоподъемность вертолетов при перевозке конструкций зависит от конкретных полетных условий. Данные для установления возможности перевозки конструкций вертолетами приведены в табл.7.15. Стоимость перевозок определяется в соответствии с действующими тарифами и инструкциями, а также по договоренности между заказчиком и исполнителем.

Таблица 7.15. Характеристика вертолетов

Марка вертолета	Максимальная масса груза, перевозимого на внешней подвеске	Максимальная масса груза, перевозимого внутри фюзеляжа, кг	Размер грузовой кабины, м			Технические параметры вертолета			
			длина	высота	ширина	масса пустого вертолета, кг	потолок динамический, м	максимальная продолжительность полета, ч	максимальная дальность полета, км
Ми-8	2500	4000	5,3	2,3	1,8	6800	4500	2,1	600
Ка-32	5000	3500	4,5	1,3	1,3	6500	3500	3	810
Ми-6	8000	12000	11,8	2,6	2,6	27900	4500	5	1000
Ми-10К	11000	3000	13,9	2,4	2,3	25500	3000	3,5	650
Ми-26	20000	2000	12	3,25	2,95	28200	4600	3	800

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технические условия погрузки и крепления грузов. – М. Транспорт, 1990.
2. Конструкции строительные стальные. Требования при поставке для экспорта. ОСТ 36–77–83. ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР. – 1984.
3. Автомобили, автобусы, троллейбусы, прицепной состав, автопогрузчики серийного производства. НИИАВТОПРОМ. Номенклатурный каталог. –М.: 1986.
4. Инструкция по монтажу строительных конструкций с применением вертолета МИ-10К $\frac{\text{ВСН } 463-85}{\text{ММСС СССР}}$.

ГЛАВА 8

ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ ПРИ ИХ МОНТАЖЕ

8.1. Основные методы монтажных работ

Зачастую технология монтажных работ предопределяется объемно-компоновочными и конструктивными решениями зданий и сооружений, наличием монтажных средств. В связи с этим многообразие конструктивно-компоновочных решений зданий и сооружений обуславливает многовариантность методов их монтажа с использованием различного монтажного оборудования и приспособлений. Подробная классификация методов монтажа дана в табл.8.1.

На центральный или приобъектный склад конструкции доставляются с завода в виде отдельных отправочных марок автомобильным или чаще всего железнодорожным транспортом. Предельные массы (и размеры) отправочных марок определяются условиями погрузки и перевозки и, как правило, не превышают 30 т и допустимых габаритных размеров, однако могут и превосходить их. На складе конструкции сортируются, при необходимости подвергаются правке, укрупнению, раскладываются в требуемой технологической последовательности.

Основным методом возведения зданий и сооружений в современном строительстве является их сборка (монтаж) из элементов заводского изготовления. Технологическая последовательность операций при монтаже: монтажная марка стропится к крюку грузоподъемного механизма (чаще крана), перемещается к месту установки, приводится в проектное положение, выверяется и закрепляется, после чего освобождается от стропов. Если выполненное крепление не обеспечивает общей устойчивости монтируемого элемента, используются дополнительные временные расчалки, распорки или другое усиление. Как правило, окончательное проектное крепление элемента осуществляется после монтажа смежных конструкций и освобождения их от крюка крана. Монтажные соединения осуществляются на болтах (высокопрочных и нормальной точности) или сварке. В последние годы болтовые соединения находят широкое применение во многих конструктивных решениях из прокатных профилей, в листовых конструкциях доминирует сварка.

Монтаж конструкций выполняется:

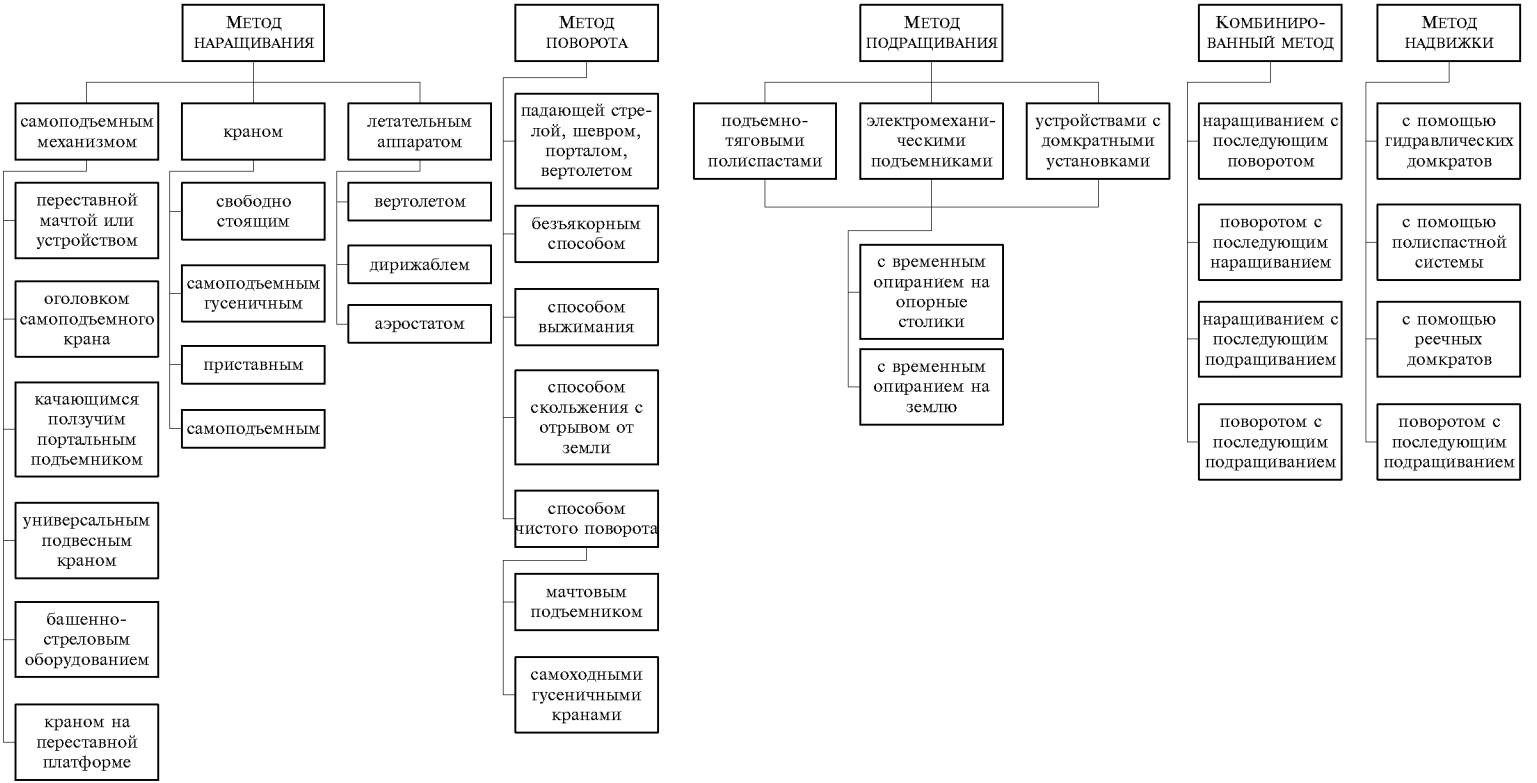
- наращиванием в проектном положении или сборкой в стороне с последующей надвижкой;
- поворотом предварительно собранных в горизонтальном положении конструкций;
- подращиванием.

Наиболее распространенным методом является монтаж наращиванием в проектном положении как поэлементно, так и укрупненными плоскостями или объемными блоками. Масса монтируемых элементов определяется, в основном, грузоподъемностью применяемого монтажного механизма. Для обеспечения доступа (подъема, спуска) монтажников к своим рабочим местам в процессе производства строительно-монтажных работ применяются лестницы, подъемники, лифты. Для обеспечения безопасности и удобства работ при монтаже требуется устройство подмостей.

На повышение эффективности монтажных работ решающее влияние оказывают:

- разработка и внедрение рациональных технологий монтажа строительных конструкций, механизмов, оснастки, механизированных процессов и инструмента;
- применение прогрессивных объемно-компоновочных и конструктивных решений строительных конструкций;
- улучшение инженерно-технической подготовки строительных площадок и производства монтажных работ;
- совершенствование организации труда и управления монтажным производством.

Таблица 8.1. Классификация методов монтажа



Эффективность технологии монтажа находится в непосредственной зависимости от механизации отдельных технологических процессов. Несмотря на высокий уровень механизации подъема и установки строительных конструкций в проектное положение, значительный объем ручных процедур требуется выполнить при подготовительно-заключительных и вспомогательных операциях, при выверке конструкций и закреплении монтажных узлов.

Основным направлением в развитии технологии монтажа строительных стальных конструкций является возведение зданий и сооружений из крупноразмерных элементов, применение «безвыверочного метода». При возведении наиболее массовых объектов – одноэтажных производственных зданий максимальный технико-экономический эффект достигается комплексным применением технологии крупноблочного монтажа, а именно: установкой колонн проектной длины; подкрановых балок с тормозными конструкциями и рельсами; покрытий – блоками полной строительной готовности; стеновых ограждающих конструкций типа «Сэндвич» – плоскими блоками с элементами фахверка на всю высоту здания.

При монтаже колонн широко применяется технология «безвыверочного метода» монтажа, позволяющая значительно сократить объем работ по выверке конструкций. Высокая точность установки колонн обеспечивается фрезерованием опорных плит и торцов или же башмаков стальных колонн, поставляемых на монтаж отдельными отправочными марками. Стальные колонны при данной технологии имеют точный размер от нижнего торца до отметки установки подкрановых балок. Опорные плиты устанавливаются на фундаменты с помощью монтажных приспособлений, строго выверяются, временно раскрепляются и затем подливаются. На поверхности плит наносятся риски осей колонн сооружения. При достижении бетоном 70 % проектной прочности разрешается приступать к монтажу колонн.

Установка колонн в проектное положение достигается совмещением предварительно нанесенных рисок на гранях колонны и опорной поверхности фундамента и последующего закрепления к анкерным болтам. При обеспечении высокой точности (в пределах допусков СНиП) установки колонн и опорных плоскостей отпадает необходимость в дальнейшей выверке подкрановых балок и ферм, за исключением проверки положения рельсов подкрановых путей.

Применение «безвыверочного метода» монтажа обеспечивает повышение производительности труда до 20 %. Монтаж подкрановых балок укрупненными блоками повышенной заводской готовности обеспечивает снижение трудозатрат на 10–15 %, но, как правило, по различным причинам укрупнение их осуществляется на строительной площадке, при этом монтажные сварные соединения в узлах крепления тормозных конструкций к верхним поясам балок, а также к колоннам и стойкам фахверка заменяются на болтовые.

Укрупненными на земле плоскими блоками (площадью, равной произведению шага колонн на высоту здания) производится монтаж трехслойных стеновых панелей типа «Сэндвич» с помощью специального кондукторного устройства (рис.8.1).

Эффективным методом монтажа сборных железобетонных стеновых панелей, объем которых на сегодня достаточно велик, является поэлементный монтаж с применением специальных переставных подмостей-площадок. В практике находят применение навесные площадки размером на панель. При использовании такого оборудования монтаж панелей ведется «уступом».

При монтаже одноэтажных промышленных зданий наиболее трудоемким из-за многоэлементности и сборки на высоте является монтаж покрытия. Поэтому при соответствующем технико-экономическом обосновании применяется крупноблочный монтаж. В зависимости от способа сборки блоков покрытия крупноблочный монтаж развивается в следующих трех направлениях.

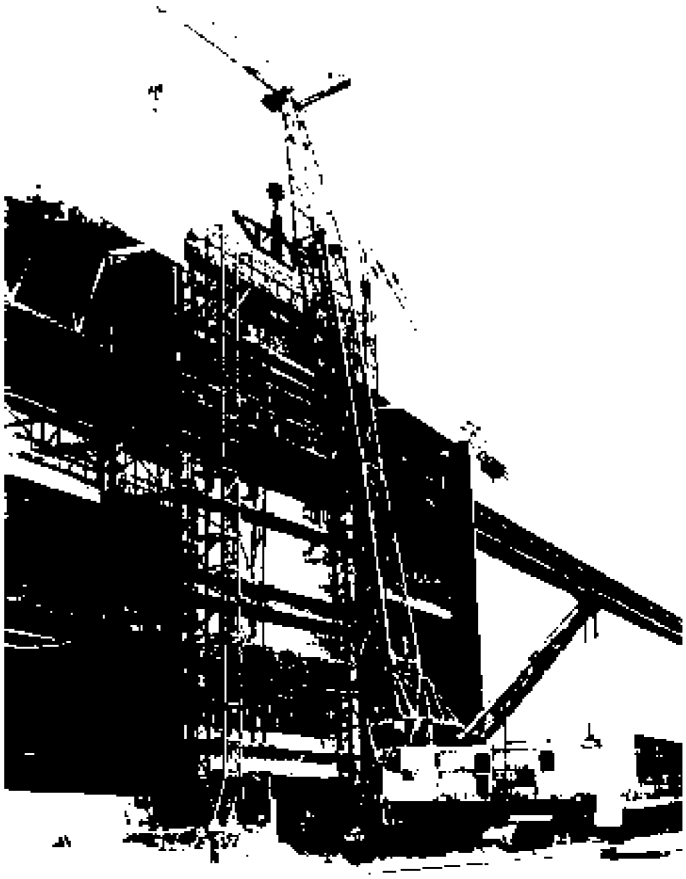


Рис.8.1. Монтаж трехслойных стеновых панелей типа «сэндвич» специальным кондукторным устройством

1. Конвейерно-блочный метод со сборкой блоков полной строительной готовности или только металлоконструкций на строительно-монтажном конвейере. Такой метод монтажа экономически оправдан при определенных условиях, а именно:

- для крупных строящихся объектов, большой протяженности в плане $S \geq 25...50$ тыс. $м^2$, конструктивно запроектированных под данную технологию монтажа;
- при наличии тяжелых специальных монтажных кранов и оснастки;
- при своевременном предоставлении строителями фронта работ и ритмичной поставке заводами-изготовителями металлоконструкций в определенной технологической последовательности.

2. Стендово-блочный метод со сборкой блоков в стендах, располагаемых в зоне действия монтажного механизма, либо на специально оборудованной площадке. Такая технология применяется только при сборке металлоконструкций покрытия при незначительных объемах работ.

3. Сборка блоков на проектной отметке в торце здания с последующей надвижкой в проектное положение целесообразна при совмещении нескольких видов работ – механомонтажных, общестроительных, когда доступ монтажного крана в пролет цеха невозможен.

Количество рабочих стоянок при конвейерно-блочном способе сборки определяется номенклатурой выполняемых работ, куда кроме сборки металлоконструкций блока входят работы по устройству кровли, монтажу технологического оборудования в межферменном пространстве и окраске блока.

Неизменяемость блока обеспечивается на первой стоянке с помощью стационарного стенда – в начальный период с помощью установки в определенной последовательности элементов блока (ферм, связей, распорок и др.), а впоследствии, по мере сформирования блока. Поэтому время сборки блока на первой стоянке, пропорциональное числу устанавливаемых элементов, обеспечивающих его неизменяемость, определяет темп сборки.

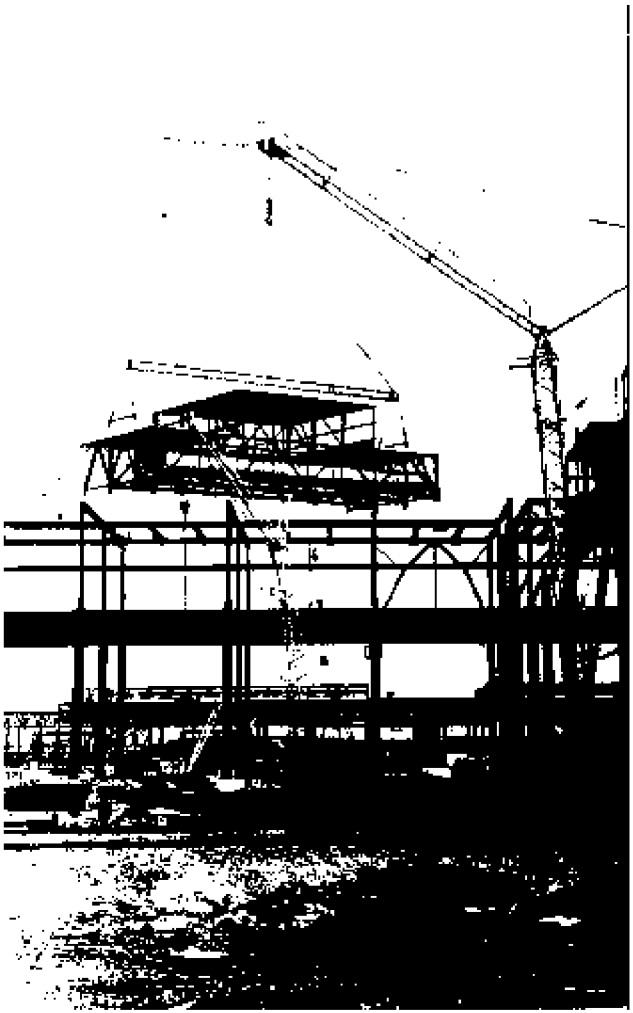


Рис.8.2. Конвейерно-блочный монтаж покрытия

Для поддержания положительной температуры и защиты от атмосферных осадков в холодное время года окрасочные работы при конвейерной сборке выполняются в закрытых помещениях (тепляках). После приемки блоки на конвейерных тележках по путям доставляются в зону действия монтажного крана. Затем, в зависимости от принятой технологии, кран устанавливает блок в проектное положение (рис.8.2) или поднимает его на установщик, передвигающийся по смонтированным заранее подкрановым путям к месту их установки. Применение установщика для транспортировки и доставки блоков покрытия наиболее целесообразно в цехах, оборудованных мостовыми кранами, когда не требуется устройства специальных дорогостоящих путей.

Существующее многообразие конструкций блоков покрытия затрудняет применение единой оснастки для их монтажа. Наиболее предпочтительны замкнутые жесткие готовые симметричные блоки. Типовые конструкции промзданий, как правило, можно укрупнять в пространственные блоки и устанавливать в проектное положение в порядке «блок через шаг», а промежутки между блоками заполнять россыпью. При этом методе требуются краны с большим вылетом стрелы, а эффективность монтажа снижается.

Метод надвижки эффективен при максимальном совмещении общестроительных и монтажных работ, когда достигается сокращение срока ввода объекта. Чаще всего его используют при реконструкции на действующих предприятиях.

Так при реконструкции Западносибирского металлургического комбината был успешно осуществлен метод надвижки доменной печи №1 массой 13 тыс. т, предварительную сборку которой производили на расстоянии 99 м от своего проектного положения. Для надвижки домны использовали жесткую сварную раму, на которой было собрано изделие, цепные катки, стальные плиты по железобетонным фундаментам, полиспастную тяговую систему и домкраты. Благодаря совмещению работ по устройству фундамента и производству монтажных работ доменная печь была сдана досрочно, что позволило получить 720 тыс. т чугуна.

Принцип надвижки успешно реализуется и при монтаже шахтных копров высотой до 120 м и массой до 10 тыс. т, обеспечивая сокращение сроков ввода на 6–8 мес. Этот метод был применен также при возведении большепролетного футбольно-легкоатлетического комплекса ЦСКА в Москве (рис.8.3). Метод надвижки с помощью гидравлических цилиндров-толкателей был применен при реконструкции железнодорожного Казанского вокзала. Покрытие размером 123×151 м массой 4500 т подвигали над действующими платформами без остановки движения железнодорожного транспорта.

Для монтажа покрытий большепролетных специальных сооружений (эллингов, авиационных промышленных комплексов и др.) часто используется метод монтажа сверхкрупными блоками 96×24 м; 120×36 м, массой до 600–900 т с помощью транспортного портала. Конструкции покрытия собираются в торце сооружения на специально запроектированном транспортном портале. Затем по рельсовым путям перемещаются вдоль корпуса к месту их установки в проектное положение.

При строительстве башенных сооружений наибольшее распространение получили три основных метода монтажа: наращиванием в проектном положении, предварительной сборкой конструкций на земле с последующим поворотом в проектное положение и подращиванием конструкций. Каждый метод включает в себя несколько модификаций, зависящих в основном от имеющегося в наличии монтажного оборудования. В 60–70-е годы широко использовался метод монтажа наращиванием с использованием универсального ползучего крана типа УПК. При монтаже вытяжных башен с металлическим газоотводящим стволом часто применялся метод монтажа башен наращиванием с помощью оголовка самоподъемного крана, установленного на верхней секции газоотводящего ствола. К недостаткам этих способов следует отнести малую грузоподъемность монтажного оборудования и, как следствие, поэлементный монтаж башенных сооружений, что приводило к значительному объему верхолазных работ, ухудшало условия труда монтажников, снижало качество работ и уровень безопасности.

Некоторые из этих недостатков устраняются крупноблочным монтажом башенных сооружений методом наращивания с помощью портальных подъемников или приставных кранов. Эти способы позволяют поднимать конструкции блоками массой до 30 т, что снижает объем верхолазных работ, повышает качество. Однако, в свою очередь, эти способы имеют свои недостатки: громоздкое оборудование, требующее значительного объема работ по его демонтажу, хотя и меньший, но еще достаточно большой объем работ на высоте снижает уровень безопасности работ.

Метод монтажа башенных сооружений, предварительно собранных на земле с последующим поворотом вокруг шарнира в проектное положение, позволяет существенно повысить безопасность работ, улучшить качество монтажа за счет производства основного объема работ на незначительной высоте. Поворот сооружения в проектное положение выполняется с помощью специальной монтажной оснастки –

падающей стрелы (шевра, портала). Однако этот метод монтажа имеет свои недостатки: требуется тщательный расчет конструкций на нагрузки монтажного состояния, усиление основных конструкций для возможности восприятия значительных усилий, возникающих в процессе отрыва сооружения от земли, необходимость наличия большой свободной территории для раскладки конструкций при сборке и размещения монтажного оборудования, что в большинстве случаев не представляется возможным.

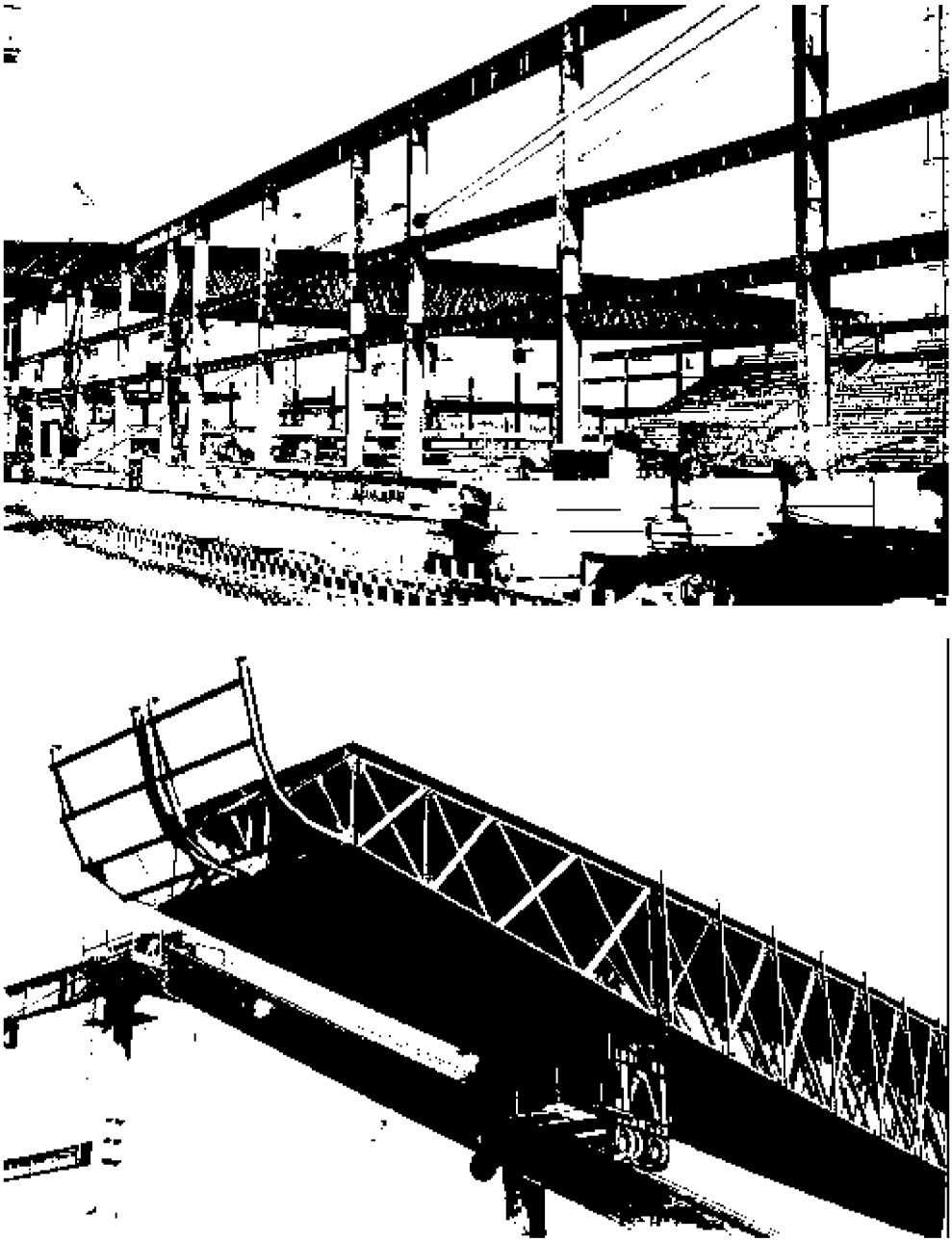


Рис.8.3. Надвижка блоков покрытия футбольно-легкоатлетического комплекса ЦСКА

В последние годы в монтажных организациях страны широкое признание получил метод монтажа башенных сооружений подращиванием, при котором после монтажа пирамидальной нижней части и верхних секций призматической части с газоотводящим стволом, собранные на специальном стенде блоки массой до 35 т подают по рельсовым путям под основание башни. Затем с помощью подъемно-тяговой системы поднимают поданный блок на 200–300 мм, оформляют монтажные стыки поясов с ранее смонтированными блоками, после чего производят выдвижку на высоту блока (обычно 10 м) всей призматической части, которая автоматически опускается и закрепляется на специальных опорных балках. Стенд опускается, подается за пределы башни, и процесс повторяется. Монтаж газоотводящих стволов диаметром до 3 м осуществляют одновременно с монтажом каркаса призматической части, а диаметром 3 м после монтажа каркаса.

Метод монтажа башенных сооружений подращиванием позволяет избежать недостатков перечисленных выше методов. При этом повышается производительность труда на 30–60 %, снижаются сроки монтажа на 15–55 %, а себестоимость работ – на 25–45 %, сокращается объем верхолазных работ в 1,8–2,5 раза, что влечет за собой резкое повышение уровня безопасности работ, благодаря повторяющимся операциям и сборки блоков в стенде-кондукторе, возрастает качество работ. Этот метод не требует больших территорий строительной площадки.

Монтаж конструкций с применением вертолетов – один из новых методов, который окончательно сформировался в конце 70-х – 80-е годы. Применение вертолетов эффективно при монтаже (демонтаже) различных высотных сооружений, при реконструкции действующих промышленных объектов, строительстве в условиях городской застройки, труднодоступных районах, при выполнении локальных работ в верхних частях зданий.

Вертолет как монтажный механизм обладает рядом достоинств. Он независим от наземных условий, поднимает груз на любую высоту современных сооружений, высоко мобилен. Практика показала, что в условиях монтажного производства, где использование традиционных механизмов, методов монтажа малоэффективно и велики объемы подготовительных и ликвидационных работ, применение вертолетов в среднем сокращает продолжительность монтажных работ в 2,5–3 раза, увеличивает производительность труда в 1,5–2,5 раза. Однако вертолет – самый дорогой монтажный механизм, в связи с этим его применение ведет к увеличению стоимости монтажа. Вместе с тем при обоснованном применении вертолета на монтаже экономический эффект от досрочного ввода в действие строящегося или реконструируемого объекта может существенно превзойти удорожание собственно монтажных работ.

Наибольшее развитие метод получил после выпуска в 1976 г. серии первых вертолетов-кранов. Это единственный вертолет, на котором имеется выносная кабина, из которой летчику обеспечен прямой обзор груза и монтажной зоны. Вертолет оборудуется системой ориентации груза в пространстве, которая заменяет на монтажных работах штатную одноканатную подвеску вертолета. Применение системы ориентации позволило исключить непосредственное участие людей в монтажном цикле. Реальная грузоподъемность вертолета на монтажных работах 8,5 т. С помощью вертолета Ми-10К в последние годы смонтированы сложные сооружения, в том числе: антенно-фидерные стволы телебашен; несущие каркасы вытяжных башен; переходные опоры ЛЭП; различные вентиляционные системы и др.

С конца 80-х годов начинается широкое использование вертолетов при возведении высотных, в первую очередь, мачтовых сооружений $H = 200...360$ м. Разработана скоростная технология, которая позволяет с помощью вертолета за один рабочий день монтировать 7–10 секций ствола мачты и четыре оттяжки из каната

диаметром до 65 мм длиной до 500 м. На завершающем этапе вертолет монтирует на вершине мачты антенну длиной 24 м. Вертолетный монтаж одной мачты H = 250 м занимает в среднем 10 дн., мачты H = 360 м – 13–15 дн.

Установка конструкций наращиванием с крановой точностью достигается путем применения специальных ловителей, конструкция которых зависит от типа монтажных стыков, формы, массы, ветровой поверхности монтируемого блока. Ловители устанавливаются в зоне стыков и выполняют функцию направляющих и фиксирующих приспособлений. Они ограничивают перемещение, обеспечивают точное наведение, а при необходимости – устойчивость монтируемого блока до его проектного закрепления.

При использовании вертолета монтаж методом поворота следует выполнять с применением специальной подъемно тормозной системы, которая обеспечивает плавный переход башни через нейтральное положение и исключает опасные динамические нагрузки на вертолет и оголовок башни. При монтаже башни поворотом масса блока может превышать грузоподъемность вертолета в 2–3 раза (в зависимости от положения центра тяжести башни) (рис.8.4).

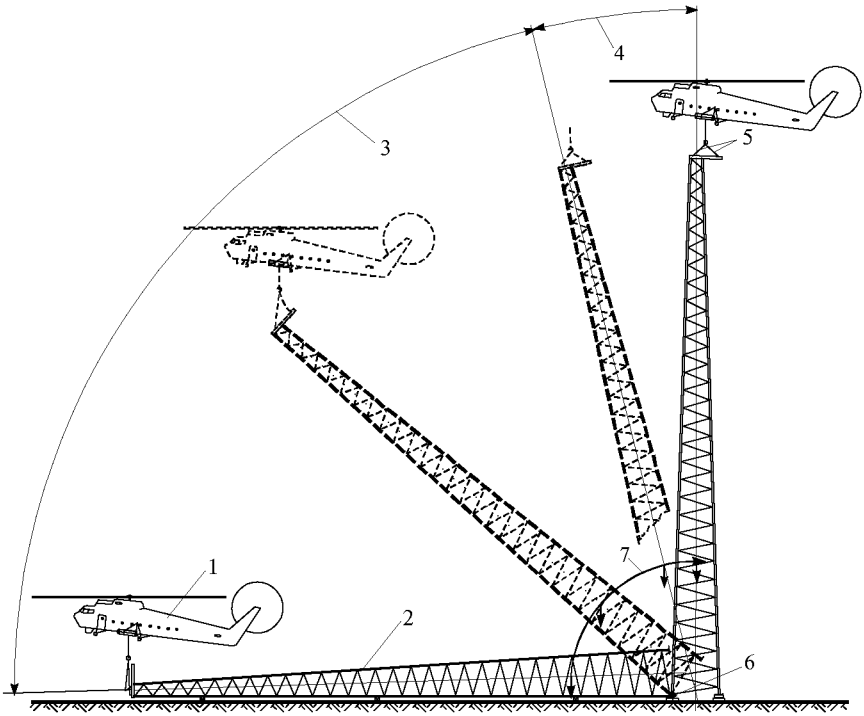


Рис.8.4. Подъем башни методом поворота

1 – вертолет Ми-10К; *2* – монтируемая башня; *3* – траектория подъема; *4* – траектория торможения; *5* – подъемно-тормозная система; *6* – дополнительные опоры; *7* – центр тяжести башни

Демонтаж конструкций необходимо выполнять с применением «самозацепа», что исключает непосредственное участие людей в строповке блоков. При вертолетном демонтаже необходимо тщательное определение массы поднимаемых блоков с учетом замены профилей при изготовлении, а также конструкций последующих обстроек при эксплуатации. Монтаж с применением вертолета значительно динамичнее и производительнее традиционного кранового. Это должно отражаться на

технологии и безопасности монтажных работ. Организация-разработчик ППР разрабатывает дополнительные технические требования (ДТТ) для завода-изготовителя. На их основе в чертежах КМД отражается специфика вертолетного монтажа: разделение сооружения на монтажные блоки, обеспечение временной устойчивости (после установки) и пространственной жесткости (в полете), технологичность монтажных стыков и т.д.

Следует заранее получить разрешение местных органов власти на выполнение монтажных полетов и согласовывать конкретные мероприятия по обеспечению безопасности работ. Необходима организация монтажно-вертолетной площадки (МВП), которая состоит из взлетно-посадочной площадки, зон складирования и сборки металлоконструкций, дороги для подъезда автотранспорта и топливозаправщика. Вертолет – высокопроизводительный монтажный механизм. Технология монтажа и качество подготовительных работ должны обеспечивать максимально возможную загрузку и минимальные простои вертолета.

8.2. Монтажное оборудование и его характеристики

Развитие краностроения непосредственно связано со строительством зданий, промышленных сооружений и методов их возведения. На монтажных операциях (подъеме, перемещении и установке) в большинстве случаев используются подъемные краны. Они могут быть общего назначения и монтажные. В связи с особенностями конструктивного исполнения монтажных кранов, вызванными специфическими условиями производства строительно-монтажных работ, эти краны выделены в самостоятельную группу, и их производство развивается независимо от выпуска кранов общего назначения.

В промышленном строительстве благодаря высокой маневренности наибольшее распространение получили гусеничные краны типа МКГ и СКГ грузоподъемностью 25–160 т: МКГ-25, СКГ-40, СКГ-63, СКГ-100, СКГ-160, СКГ-401, СКГ-631. Расширению сферы применения и эффективности гусеничных кранов в значительной степени способствовало оснащение их универсальным башенно-стреловым оборудованием. Не теряя мобильности и высокой маневренности, эти краны с таким оборудованием работают как обычные стреловые или башенные краны. Они широко используются на монтаже одноэтажных промышленных зданий. Затраты на устройство основания для их работы сравнительно невелики.

Для монтажа легких промышленных зданий (модулей, зданий комплектной поставки) применяются автомобильные и пневмоколесные стреловые краны, обладающие достаточной мобильностью и маневренностью. При работе этими кранами требуется хорошее прочное основание для их маневрирования, что не всегда обеспечивается на строящемся объекте.

Башенные краны типа БК-1000 $Q = 50$ т, БК-1425 $Q = 75$ т (в марке крана цифры означают грузовой момент при максимальной грузоподъемности) по грузоподъемности и высоте подъема крюка являются наиболее мощными. Они применяются для монтажа крупных блоков при больших объемах работ на строительстве доменных комплексов, конвертерных цехов, ТЭЦ, гидротехнических сооружений, большепролетных зданий и др. (рис.8.5).

В последнее время на монтаже перечисленных выше объектов широко применяются стреловые рельсовые краны типа СКР, вместо башенных, такие как СКР-1500, СКУ-1500, СКР-2200, СКР-2600, СКР-3500. Они унифицированы с гусеничными самоходными кранами СКГ и отличаются только ходовой частью (СКР на рельсовом ходу), легко монтируются и демонтируются, в связи с чем снижена стоимость их изготовления и эксплуатации. Крупноблочному монтажу башенными и рельсовыми кранами способствует большое подстреловое пространство этих

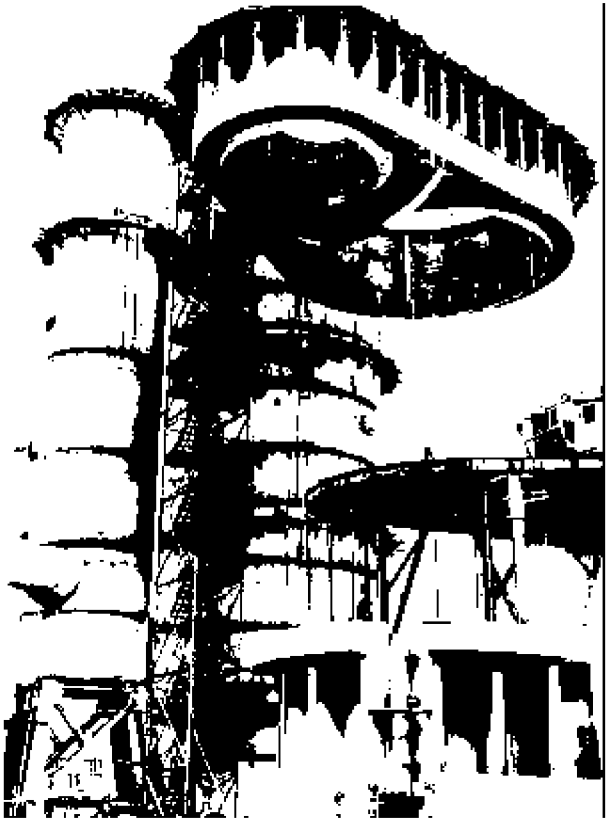


Рис.8.5. Крупноблочный монтаж подкупольной балки воздухонагревателей $P = 172$ т двумя кранами БК-1000 и СКР-2600

кранов, благодаря значительной длине стрелы и высокой отметке ее крепления. Поэтому кроме доменных комплексов, ККЦ и других эти краны успешно применяются на монтаже блоков покрытия при конвейерно-блочном методе.

Для укрупнительной сборки элементов конструкций при монтаже промышленных сооружений и выполнения работ на центральных и приобъектных складах наряду с козловыми типа К-305Н, КК-32, КСК-30-42 и другими могут быть использованы краны-погрузчики типа КП-300.

Козловые краны, кроме того, используются на монтаже конструкций воздухонагревателей, прокатных и других цехов, насыщенных подземным хозяйством и технологическим оборудованием, когда проход кранов внутри пролета затруднен или вообще невозможен. Такая технология предусматривает совмещение монтажных, общестроительных работ и установку технологического оборудования, что при четкой организации работ может дать положительные результаты.

Для монтажа высотных зданий $H \le 150$ м применяются прислонные башенные краны типа КБ-573 $Q = 8$ т и КБ-675 $Q = 12{,}5$ т. Вертикальные нагрузки передаются через опорную раму на фундамент, горизонтальные – через систему связей на каркасе монтируемого здания, при этом каркас монтируемого здания проверяется расчетом на дополнительные монтажные нагрузки от действия прикреплений. Такие краны подращиваются по мере возведения здания.

Для монтажа высотных зданий $H > 150$ м используются также самоподъемные башенные краны. Основной особенностью таких кранов является опирание на каркас или стены строящегося здания и самоподъем их по мере монтажа сооружения. Башня такого крана снабжена поворотным наголовником, к которому прикреплены стрела и консоль с контргрузом. Стрела установлена горизонтально и снабжена передвигающейся грузовой тележкой. Для самоподъема башня крана имеет обойму с механизмом подъема.

Для монтажа уникальных сооружений в отдельных случаях разрабатывается (при соответствующем технико-экономическом обосновании) индивидуальное монтажное оборудование. Так, например, легкие транспортные порталы до 200 т используются для доставки блоков покрытия внутри пролета при конвейерноблочном способе монтажа.

Иное назначение имеют качающиеся порталы. Они применяются при монтаже радиотелескопов. Обычно такие порталы устанавливаются на земле, имеют высоту подъема до 85 м и грузоподъемность Q = 2×50 т.

Основными механизмами при монтаже высотных башенных сооружений наращиванием поэлементным способом являются универсальный подвесной кран (УПК) и самоподъемный кран (СПК). Для монтажа высотных сооружений методом предварительной сборки с последующим поворотом в проектное положение используется специальная оснастка, состоящая чаще всего из тяговых полиспастов и падающей стрелы, шевра или портала.

Получивший в последнее время распространение метод подращивания потребовал разработки специальной оснастки и оборудования для подъема (выдвижения) призматической части и газоотводящего ствола. В большинстве случаев основным оборудованием для подъема является подъемно-тяговая система (ПТС). Существует несколько разновидностей подъемно-тяговой системы. Как правило в нее входят тяговые полиспасты различной грузоподъемности, стенд-кондуктор, используемый для сборки блоков призматической части, их подачи в центр башни и выдвижения, уравнительная система, запасовка которой в различных комбинациях позволяет осуществлять подращивание сооружений с различным числом граней. Исходя из местных условий, возможностей монтажной организации и другого, состав подъемно-тяговой системы может меняться, например, вместо тяговых полиспастов могут быть использованы электромеханические подъемники или домкратные установки. Возможен вариант ПТС без стенда-кондуктора, который заменяют вертикальные траверсы, или без уравнительной системы. К преимуществам монтажного оборудования и оснастки для производства работ методом подращивания служит его небольшой объем и многократная оборачиваемость.

В качестве высокопроизводительного монтажного механизма применяются вертолеты. В настоящее время на эксплуатации находится ряд вертолетов, грузоподъемность которых позволяет их использовать на монтаже. Некоторые технические характеристики этих вертолетов приведены в табл.7.14 гл.7.

Для высотного монтажа (при отсутствии внешних ориентиров) допускается применение вертолета Ми-10К, на котором летчик из выносной кабины имеет прямой обзор монтажной зоны и груза на внешней подвеске. Оплата аренды вертолета производится за фактический налет часов с учетом перелета к месту монтажа и обратно.

Для перемещения конструкций в плане, например при надвижке, применяются гидравлические цилиндры (домкраты). Такое оборудование было использовано при надвижке покрытия Казанского вокзала. Грузоподъемность такого цилиндра 175 т, ход поршня – 1100 мм. Система цилиндров работает от насосной гидравлической станции. Более распространены другие монтажные домкраты, которые используются для небольших перемещений как в плане, так и по высоте при регулировании опор. Изготовляются они грузоподъемностью 10–200 т, имеют ход поршня 120–150 мм. При невозможности использования монтажного крана или его отсутствии на монтаже отдельные подъемы выполняются с помощью полиспастов, обойм блочных монтажных (табл.8.2) и грузоподъемных электрических лебедок. Такие методы ведения работ часто бывают единственно возможными при реконструкции цехов на действующих предприятиях.

Для закрепления и выверки конструкций используются различного рода кондукторы, для натяжения тросовых расчалок и выверки смонтированных конструкций применяются винтовые стяжки. Для фиксации конструкций при монтаже

Таблица 8.2. Обоймы блочные монтажные

Показатель	ОБМ 10–2	ОБМ 32–4	ОБМ 50–5	ОБМ 100–5	ОБМ 160–8	ОБМ 200–10	ОБМ 400–20	ОБМ 630–13
Тяговое усилие, кН	100	320	500	1000	1600	2000	4000	6300
Количество канатных блоков в каждой обойме, шт.	2	4	5	5	8	10	20	13
Диаметр каната полиспаста, мм	16,5	22	22	27	27	27	27	42
Тяговое усилие монтажной лебедки, кН	32	50	50	125	125	125	125	320
Габариты обойм, мм:								
неподвижной:								
длина	190	430	505	805	1155	1360	1325	2935
ширина	260	350	350	500	500	500	645	925
высота	430	835	860	1145	1255	1255	2170	2260
подвижной:								
длина	185	430	505	705	1050	1325	1325	2900
ширина	260	350	350	500	500	500	645	800
высота	545	830	850	1455	1640	1610	2835	1895
Масса обойм, кг:								
неподвижной	36,5	190	245	635	1010	1230	2550	6000
подвижной	40,5	188	243	675	1170	1440	2770	5610
Оптовая цена, руб. (цены 1990 г.)	102	333	450	1300	2000	2400	– (по спецзаказам)	–

Примечание. Изготовитель – Чебаркульский РМЗ специализированного объединения «Строймеханизация».

(выверке, временном закреплении) применяются различного рода якоря: наземные, заглубленные, накладные и др. Из грузозахватных приспособлений используются различные стропы, захваты. Они должны быть удобными и безопасными в работе, обеспечивать сохранность формы и прочности конструкций, наименьшую трудоемкость при строповке и расстроповке. Гибкие стропы изготовляются из соответствующих канатов, мягкие – из синтетических материалов, должны иметь на концах петли или крюки для закрепления к конструкциям. Для подъема пространственных податливых блоков применяются системы, состоящие из нескольких траверс с регулированием усилий в стропах. Для монтажа объемных блоков используется балансирная траверса с полуавтоматическими захватами. Для монтажа укрупненных листовых царг на строительстве доменных комплексов применяются трехлучевые траверсы грузоподъемностью до 50 т. В практике широко используется разнообразная номенклатура приспособлений и оборудования для производства монтажных работ.

Установка, выверка и закрепление монтажных элементов выполняются, как правило, с инвентарных подмостей, которые навешиваются на конструкции на земле до их подъема. Для перемещения монтажников к рабочим местам используются навесные и прислонные лестницы. В последние годы на монтаже широко применяются различные механизированные шарнирно-рычажные машины типа АГП (автогидроподъемники) с высотой подъема 12, 18, 22, 28, 36 и 56 м, а также телескопические вышки. Технические характеристики автогидроподъемников приведены в табл.8.3.

Грузовысотные характеристики монтажных кранов типа СКГ, СКУ, СКР приведены в табл.8.4–8.9.

Таблица 8.3. Техническая характеристика автогидроподъемников

Показатель	АГП-12.02	АГП-18	АГП-18.02	АГП-22	АГП-22.03	АГП-22.04	АГП-28	АГП-36
Рабочая высота подъема, м	12	18	18	22	22	22	28	36
Грузоподъемность, кг	250	350	350	300	350	300	300	400
Наибольший вылет люльки, м	9,8	9	9,5	10,5	10,5	13	13,5	15,5
Угол поворота стрелы в плане, град	360	360	360	360	360	360	360	360
Время подъема на наибольшую высоту, с	85	160	120	160	160	120	160	300
Частота вращения поворотной части, $с^{-1}$	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083
Номинальное давление в гидросистеме, МПа	10	10	14	10	10	14	10	13,73
Насос:								
тип	НШ32У- 3-Л	НШ32У- 3-Л	НШ32У- 3-Л	НШ32У- 3-Л	НШ32У- 3-Л	НШ32У- 3-Л	НШ32У- 3-Л	210.20;НШ-6
привод	Механический от коробки перемены передач автомобиля				От раздаточной коробки			
Базовый автомобиль	ГАЗ-53-12	ГАЗ-53-12	ГАЗ-3307	ЗИЛ-130	ЗИЛ-133ГЯ	ЗИЛ-130	ЗИЛ-133ГЯ	КрАЗ-250
Номинальная частота вращения двигателя автомобиля при работе насоса, $мин^{-1}$	1250	1900	1900	1500	1500–1900	1500	1500–1900	1500–1900
Габариты в транспортном положении, м:								
длина	7,9	10,2	9,9	12	12	10,5	13,28	13,4
ширина	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
высота	3,2	3,4	3,6	3,6	3,7	3,7	3,7	3,8
Масса с автомобилем в снаряженном состоянии, т	6,7	7,9	6,9	9,2	12,0	8,6	15,3	24,1
Оптовая цена, руб. цены 1990 г.)	11968	13180	14200	14500	24300	Лимитная 16800	29400	Лимитная 43400

Примечание. Изготовитель – Ленинградский механический завод №7 специализированного объединения «Строймеханизация».

Таблица 8.4. Грузовысотная характеристика монтажного крана типа СКГ-16

Стрела $L = 11$ м Основной подъем			Стрела $L = 11$ м с установочным гуськом $l = 2{,}5$ м						Стрела $L = 11$ м, маневровый гусек $l = 8$ м			Стрела $L = 11$ м, маневровый гусек $l = 12$ м		
			Основной подъем			Вспомогательный подъем								
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
4,1	16	10,6	4,1	15,5	10,6	5,5	3	12,5	5,5	10	18,1	7,3	6,3	21,9
5	11,2	10,4	5	10,7	10,4	7	3	11,9	6	9,1	17,8	8	5,6	21,5
6,5	7,5	9,7	6,5	7	9,7	8,3	3	11,3	7,5	6,7	16,9	9	4,8	21
8	5,5	8,8	8	5	8,8	10	3	10	8	6,1	16,4	10,2	4	20
9	4,6	8	9	4,1	8	11	3	9,1	9	5,2	15,2	11	3,5	19,3
10	3,9	7	10	3,5	7	12	3	7,9	10,2	4,4	11,8	12,5	3	17,3
11	3,5	5,6	11	3	5,6	13,2	3	6	–	–	–	13,5	2,7	15,3
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	14,3	2,5	12,3

Стрела $L = 16$ м Основной подъем			Стрела $L = 16$ м с установочным гуськом $l = 2{,}5$ м						Стрела $L = 16$ м, маневровый гусек $l = 8$ м			Стрела $L = 16$ м, маневровый гусек $l = 12$ м		
			Основной подъем			Вспомогательный подъем								
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
5,3	10,2	15,3	5,3	9,7	15,7	6,8	2	17,4	5,9	8,1	23,2	7,7	5,8	26,9
7	6,4	15	7	6,3	15	8	2	17	7	6,5	22,5	9	4,7	26,2
8	5,6	14,5	8	5	14,5	9	2	16,5	7,7	5,5	22	10,45	3,7	25,2
8,8	4,7	14,2	8,8	4,2	14,2	10,6	2	15,7	8	5,3	21,8	11,5	3,2	24,1
10	3,8	13,5	10	3,3	13,5	12	2	14,8	9,2	4,3	20,5	12,55	2,8	22,9
11	3,3	12,9	11	2,8	12,9	13	2	14	10	3,8	19	13,5	2,4	21,3
12,4	2,8	11,7	12,4	2,3	11,7	14,5	2	12,7	10,6	3,5	17	14,6	2,2	17,6
13	2,6	11,2	13	2,1	11,2	15	2	12,1	–	–	–	–	–	–
13,9	2,5	10,2	13,9	2	10,2	16	2	10,9	–	–	–	–	–	–

Таблица 8.5. Грузовысотная характеристика монтажного крана типа СКГ = 505

Стрела $L = 17$ м, без установочного гуська, противовес $P = 25{,}4$ т Основной подъем			Стрела $L = 17$ м, без установочного гуська, противовес $P = 25{,}4+6{,}1$ т Основной подъем			Стрела $L = 17$ м с установочным гуськом $l = 8$ м. Противовес $P = 25{,}4$ т						Стрела $L = 22$ м, без установочного гуська, противовес $P = 25{,}4$ т Основной подъем		
						Основной подъем			Вспомогательный подъем					
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
4,2	50	15,8	4,4	63	15,2	4,2	48	15,8	9	3	22,2	5	35	20,7
5	50	15,7	4,8	63	15,2	5	48	15,7	11	8	21,7	5,8	35	20,6
6	37	15,3	6	44	15	6	35	15,3	13	8	20,6	8	20,2	20
7	28,5	15	7	35,2	14,8	7	26,5	15	15	8	19,1	10	14,8	19,3
8	23	14,7	8	28	14,4	8	21	14,7	16,5	8	17,2	12	10,8	18,3
9	19	14,2	9	22	13,8	9	17	14,3	–	–	–	14	8,4	17
10	16	13,9	10	18	13,2	10	14	13,8	–	–	–	16	6,7	15,5
11	13,5	12,6	–	–	–	11	11,5	13,2	–	–	–	19	5,2	12,3
12	11,5	12,2	–	–	–	12	9,5	12,2	–	–	–	–	–	–
13	10	11,3	–	–	–	13	8	11,3	–	–	–	–	–	–
14	9	10,1	–	–	–	14	7	10,1	–	–	–	–	–	–

Стрела $L = 22$ м с установочным гуськом $l = 5$ м. Противовес $P = 25{,}4$ т						Стрела $L = 27$ м, без установочного гуська. Противовес $P = 25{,}4$ т			Стрела $L = 27$ м с установочным гуськом $l = 8$ м. Противовес $P = 25{,}4$ т					
Основной подъем			Вспомогательный подъем			Основной подъем			Основной подъем			Вспомогательный подъем		
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
5	34	20,7	8,5	5	25,1	5,9	27	25,5	5,9	25	25,5	–	–	–
5,8	34	20,6	10	5	24,6	6,7	27	25,4	6,7	25	25,4	11	8	31,9
8	19,2	20	12	5	23,9	8	20,5	25	8	18,5	25	12	8	31,6
10	13,8	19,3	14	5	22,9	10	15	24,3	10	13	24,3	13	8	31,2
12	9,8	18,3	16	5	21,7	13	10	23,2	13	8	23,2	14	8	30,8
14	7,4	17	18	5	19,7	15	7,8	22	15	5,8	22	15	8	30
16	5,7	15,5	20	5	17,3	17	6,2	20,7	17	4,2	20,7	–	–	–
19	4,2	12,3	–	–	–	19	5	19,2	19	3	19,2	–	–	–

Стрела $L=32$ м, без установочного гуська, противовес $P=24,5$ т Основной подъем			Стрела $L=32$ м с установочным гуськом $l=5$ м. Противовес $P=25,4$ т						Стрела $L=32$ м. Противовес $P=25,4$ т								
			Основной подъем			Вспомогательный подъем			Гусек $l=15,6$ м			Гусек $l=20,6$ м			Гусек $l=25,6$ м		
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
6,8	18	30,6	6,8	17	30,6	10	5	34,8	9,2	13	45,2	11,3	10	49,6	13,6	8	54,5
8	18	30,3	8	17	30,3	11	5	34,6	9,8	13	44,9	12,2	10	49,2	14,7	8	53,9
9	15,2	30,1	9	14,2	30,1	12	5	34,4	10,5	11,8	44,4	13	9,3	48,7	17	6,7	52,5
10	13	29,8	10	12	29,8	13	5	34,1	11	11	44,1	14	8,5	48	19	5,6	50,8
12	10	29,2	12	9	29,2	14	5	33,7	12	9,6	43,3	16	7,2	46,3	21	4,7	48,8
14	7,8	28,4	14	6,8	28,4	15	5	33,3	13	8,5	42,6	18	6	44,2	23	3,9	46,5
16	6,2	27,5	16	5,2	27,5	16	5	32,9	15	7	40	20	5	41,2	25	3,4	42,9
18	5	26,3	18	4	26,3	18	5	31,5	17	5,8	35,8	22	4,2	35,1	27	3	37,1

Гусек $l=10,5$ м			Стрела $L=27$ м. Противовес $P=24,5$ т									Стрела $L=37$ м с гуськом $l=28,3$ м. Противовес $P=25,4$ т		
			Гусек $l=15,6$ м			Гусек $l=20,5$ м			Гусек $l=25,6$ м					
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
6,7	20	35,8	9,1	14	40,1	11,4	10,5	44,4	13,5	8,5	49	16,5	4	60,5
7,1	20	35,4	9,6	14	39,8	12	10,5	44,1	14,5	8,5	48,5	17,5	4	60
7,5	18,3	35,2	11	11	38,9	13	9,1	43,5	16	7,3	47,5	19	3,5	59
8	16,6	34,8	12	9,7	38,1	15	7,4	42	18	6,1	46	21	2,8	57,3
9	14,2	34	13	8,6	37,1	16	6,7	41,1	20	5,1	44,3	23	2,3	55,3
10	12,6	33	14	7,7	36	18	6	39	22	4,4	42	25	1,9	52,9
11	11,3	31,5	15	7	34,7	20	4,9	36	25	3,6	37,3	27	1,6	49,2
12	10,2	29,2	17	6	30,4	22	4	30,6	27	3,1	31,5	29,7	1,4	42,5

Таблица 8.6. Грузовысотные характеристики монтажного крана СКГ-631

Стрела $L=12{,}5$ м. Противовес $P=14+2\times8{,}5+9{,}2$ т			Стрела $L=17{,}6$ м. Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т			Стрела $L=17{,}6$ м с установочным гуськом $l=7{,}6$ м. Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т					
Основной подъем			Основной подъем			Основной подъем			Вспомогательный подъем		
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
4,2	100	11,4	5	63	16,7	5	58,5	16,7	9,5	18	23,6
4,5	100	11,3	6,35	63	16,5	6,35	58,5	16,5	10	18	23,4
5	86	11,2	7	52	16,3	7	47,8	16,3	11	16,5	23
6	65,3	10,9	8	42	16	8	37,5	16	12	15,3	22,6
7	52,5	10,5	9	34,3	15,5	9	30,2	15,5	13	14,3	22,2
8	43,5	10	10	28,5	15	10	24	15	14	13,4	21,6
9	36,5	9,4	11	24	14,4	11	19,5	14,4	15	12,6	21
10	31,5	8,6	12	20,2	13,7	12	15,5	13,7	16	11,4	20,3
–	–	–	13	16,8	12,9	13	12,3	12,9	17	11	19,6
–	–	–	14	14,4	12	14	10,3	12	19	10,3	17,8
–	–	–	–	–	–	–	–	–	21	9,5	15,7

Стрела $L=37{,}7$ с маневровым гуськом $l=19$ м. Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т						Стрела $L=37{,}7$ с маневровым гуськом $l=29{,}2$ м. Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т					
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
11,5	20	53,8	Продолжение			16	12	63,1	Продолжение		
12	20	53,6	19	10,6	47,2	17,4	12	62,3	25	7	56
13	18,2	53	20	9,7	45,4	19	10,6	61,3	26	6,6	54,9
14	16,4	52,4	21	9	43	20	9,9	60,6	27	6,2	53,5
15	14,8	51,6	–	–	–	21	9,2	59,9	28	5,9	52
16	13,5	50,7	–	–	–	22	8,6	59	29	5,5	50,2
17	12,3	49,7	–	–	–	23	8	58,2	30	5,2	48
18	11,4	48,4	–	–	–	24	7,5	57,2	31	4,8	45,2

Продолжение табл.8.6

Стрела $L=22{,}5$. Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т			Стрела $L=22{,}5$ с установочным гуськом $l=7{,}6$ м. Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т						Стрела $L=27{,}7$ с маневровым гуськом $l=24$ м Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т		
Основной подъем			Основной подъем			Вспомогательный подъем					
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
6	63	21,6	6,7	50,6	21,4	11	13	28,2	13,3	18	48,5
6,7	55	21,4	7	46,6	21,3	12	12	28	13,6	18	48,4
7	51	21,3	8	36,5	21,1	13	11	27,5	14	17,4	48,2
8	41	21,1	9	30,2	20,8	14	10,2	27,1	15	15,6	47,6
9	34,7	20,8	10	25,7	20,4	15	9,6	26,6	16	14,2	46,9
10	30,1	20,4	11	21,9	19,9	16	9,1	26,1	17	13,1	46,2
11	26,2	19,9	12	18,8	19,4	17	8,6	25,5	18	12,1	45,5
12	23	19,4	13	16,1	18,9	18	8,1	24,9	19	11,2	44,5
13	20,3	18,9	14	13,8	18,3	19	7,8	24,2	20	10,3	43,6
14	18	18,3	15	11,9	17,6	20	7,5	23,5	21	9,5	42,5
15	16	17,6	16	10,1	16,9	21	7,3	22,7	22	8,8	41,1
16	14,2	16,9	17	8,9	16	22	7,2	21,7	23	8,3	39,6
17	13	16	18	8,2	15	23	6,9	20,7	24	7,8	37,9
18	12	15	–	–	–	24	6,7	19,6	25,5	7,1	34,7
–	–	–	–	–	–	25	6,4	18,5	–	–	–

Стрела $L=32{,}6$ с установочным гуськом $l=7{,}6$ м. Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т						Стрела $L=32{,}6$ с маневровым гуськом $l=16{,}6$ м Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т			Стрела $L=32{,}6$ с маневровым гуськом $l=24$ м Противовес $P=14+2\times8{,}5$ т		
Основной подъем			Вспомогательный подъем								
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7,6	33,5	31,8	12,5	8,3	37,9	10,5	22	46,5	13,5	17,5	53,1
8,4	33,5	31,5	14	7,5	37,4	11,5	22	45,9	13,8	17,5	53
10	26	31,2	16	6,8	36,7	13	18,8	44,9	15	15,5	52,3
11	21,7	30,9	18	6,3	35,8	14	17	44,1	16	14,1	51,7

Продолжение табл. 8.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	18,3	30,6	20	5,8	34,8	15	15,5	43,1	17	13	50,9
13	15,6	30,3	22	5,4	33,7	16	14,3	41,9	18	12	50,1
14	13,3	29,8	24	5	32,4	17	13,2	40,5	19	11,1	49,3
15	11,3	29,3	26	4,5	31	18	12,2	38,6	20	10,2	48,4
16	9,8	28,8	28	4,2	29,4	18,8	11,6	36,4	21	9,5	47,3
17	8,5	28,3	–	–	–	–	–	–	22	8,8	46,1
18	7,5	27,8	–	–	–	–	–	–	23	8,2	44,8
19	6,3	27,3	–	–	–	–	–	–	24	7,7	43,2
20	5,4	26,7	–	–	–	–	–	–	25	7,3	41,2
21	4,6	26	–	–	–	–	–	–	26	7	38,6

Таблица 8.7. Грузовысотная характеристика монтажного крана типа СКУ-1500Р

Стрела $L = 30$ м, маневровый гусек $l = 24$ м						Стрела $L = 40$ м, маневровый гусек $l = 24$ м					
Основной подъем			Вспомогательный подъем			Основной подъем			Вспомогательный подъем		
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
15	100	50	19	10	55,2	16–18	75	58,9–57,8	21	10	63,4
17	88	48,8	21	10	53,6	20	70	56,4	24	10	60,4
19	78	47,2	23	10	51,6	21	67	55,5	25	10	59,2
20	75	46,2	24,5	10	50,6	–	–	–	–	–	–

Стрела $L = 40$ м, маневровый гусек $l = 29$ м						Стрела $L = 50$ м, маневровый гусек $l = 39$ м					
Основной подъем			Вспомогательный подъем			Основной подъем			Вспомогательный подъем		
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
19–20	63	64,4–63,4	24	10	67,8	19,5–22	50	84,8–83,6	26	10	89
21,7	63	62	26	10	66	25	42,6	82,4	30	10	87,2
22	61,5	61,6	30,5	10	61,2	27,5	36,6	80,8	33	10	85,2
26	50	57,6	32	10	59,2	30	32,7	79	35	10	83,2
28	45	54,8	34,5	10	53,6	35	25,6	73,2	40,5	10	76,2
30	41	50	–	–	–	41	19,6	61,8	46	10	63,2

Таблица 8.8. Грузовая характеристика монтажного крана типа СКР-2600

Стрела $L = 45{,}78$ м, маневровый гусек $l = 31{,}16$ м					
Основной подъем			Вспомогательный подъем		
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
19–20	130	71,4	22	16	75,3
21	118	71,2	24	16	74,3
22	108	69,6	26	16	72,5
23	102	68,9	28	16	70,8
24	95	68,4	30	16	68,6
26	83	66,4	32	16	65,6
28	73	64,4	34	16	62,5
30	65	61,7	36	16	58,5
33	55	55,6	–	–	–

Стрела $L = 57{,}78$ м, маневровый гусек $l = 43{,}83$ м					
Основной подъем			Вспомогательный подъем		
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
18–20	75	98,6–97,8	22	16	103
22	68	97	25	16	101
25	59,5	95,4	28	16	100
28	52	93,4	32	16	97,5
32	43	90,4	36	16	93
36	35	86,4	40	16	88
40	28	81	44	16	83
44	22	71,5	47	16	72,8
–	–	–	–	–	–

Таблица 8.9. Грузовысотные характеристики СКР-3500

Стрела $L = 68{,}5$ м, маневровый гусек $l = 42{,}63$ м					
Основной подъем			Вспомогательный подъем		
L, м	Q, т	H, м	L, м	Q, т	H, м
28–30	100	107,8–106,7	30,8–32,9	16	111–110
31	96	106,1	35	16	108,6
33	88	104,8	37,1	16	107
36	78	102,5	39,2	16	105,3
40	66,4	98,8	41,2	16	103,5
42	62	96,5	45,3	16	98,8
44	57,6	93,8	47,4	16	96
49	47,4	84,2	50,4	16	90,6
51	43,8	77,3	52,3	16	85,8
–	–	–	54,2	16	78,5

8.3. Требования к методам монтажа и конструкциям

8.3.1. Требования к методам производства работ. При организации монтажных работ должны быть предусмотрены меры эффективности, включающие сокращение сроков строительства, снижение его стоимости, рост производительности труда с уменьшением доли ручного труда в монтажных операциях, а также достижение высокого качества работ при строгом соблюдении безопасных методов ведения работ.

Монтаж конструкций производится по утвержденному проекту производства работ. Выбранный способ монтажа должен быть обоснован технико-экономическими расчетами. Выполнение требований технологии монтажа и разработка эффективных конструктивно-компоновочных решений любых сооружений достигаются параллельным проектированием каркаса сооружения и методов его возведения на стадии технического проекта. При разработке проекта должно быть предусмотрено:

- членение конструкций на максимально возможные отправочные марки (колонны – целиком, подкрановые балки – блоком с тормозными конструкциями и т.д.), обеспечивающее монтаж сооружения выбранным методом с сохранением устойчивости отдельных частей сооружения;
- простота заводки и крепления стыков монтажных элементов с обеспечением высокой механизации монтажных операций по закреплению стыков;
- соблюдение устойчивости монтируемых конструкций;
- укрупнение отдельных отправочных элементов до подъема в пространственные блоки с соблюдением их устойчивости;
- соблюдение максимальной заводской готовности крупноблочных конструкций в увязке с примыкающими частями технологического оборудования и другими конструкциями;
- сведение к минимуму непредвиденных на монтаже работ (вырезы, подгонка, доделки по «месту» и др.).

Как правило, из всех имеющихся способов монтажа конструкций выбирается тот, при котором не требуется устройство дополнительных поддерживающих сложных приспособлений, в то же время монтируемые конструкции были бы неизменяемыми на всех стадиях возведения сооружения. В практике строительства это общее требование, касающееся всех конструкций и всех методов производства работ, не всегда выполнимо. Так при монтаже высотных сооружений (радиомачт методом наращивания с помощью самоподъемного ползучего крана) для придания собранной части сооружения прочности и устойчивости применяются временные монтажные расчалки между ярусами постоянных. При поэлементном монтаже покрытия расчаливаются две первые фермы, затем устанавливаются проектные распорки (связи) между ними для создания начального жесткого блока, к которому пристыковываются следующие элементы покрытия.

Всегда целесообразно в качестве временных монтажных приспособлений использовать постоянные проектные элементы. Так поступают при монтаже колонн, если по технологии требуется возводить здание не со связевой панели, а с рядовой (крайней). Тогда между первыми устанавливаемыми колоннами временно монтируются проектные связи, взятые из панели более поздней по ходу монтажа, а к ним уже прикрепляются следующие колонны, распорки, подкрановые балки.

Для обеспечения на монтаже правильного положения конструкций в пространстве в проекте должны быть предусмотрены требования к изготовлению отдельных элементов и всего сооружения в целом. При невозможности обеспечения необходимой точности геометрических размеров (если конструкции изготовляются без применения кондукторов) следует требовать выполнения на заводе общей сборки, присверловки сборочных отверстий, приварки монтажных (сборочных) приспособлений.

В условиях реконструкции здания производство строительно-монтажных работ должно быть увязано с производственной деятельностью реконструируемого предприятия. Сроки остановки основного производства и ее необходимость определяются рабочим проектом на реконструкцию и проектом производства работ.

8.3.2. Монтажные требования к конструкциям. Прочность и устойчивость как отдельных элементов конструкций, так и сооружения в целом, должны быть обеспечены на всех стадиях монтажа. При выборе вариантов производства работ на стадии основных решений должны быть проверены на монтажные нагрузки стальные конструкции возводимого сооружения. Прежде всего на монтажные нагрузки проверяются те узлы, в которых эти нагрузки превышают расчетные или отличаются по знаку от расчетных, и в том случае, когда могут возникнуть отличные от расчетных условий деформации:

- элементы, к которым непосредственно приложены монтажные нагрузки, а также их опорные части;
- плоские элементы (при этом должны быть обусловлены места строповки конструкций) на устойчивость в процессе монтажа;
- отдельные монтажные элементы или блоки при типовых методах производства работ по строповке, перемещению и установке в проектное положение.

Допускается, как исключение, в индивидуальных сооружениях усиление отдельных элементов, которое следует включать в рабочие чертежи. Конструкции усиления должны быть просты в изготовлении, установке и демонтаже.

В конструкциях массового применения временное усиление, рассчитанное на действие монтажных нагрузок, недопустимо.

При конвейерно-блочном монтаже покрытия конструкция блока должна быть неизменяемой; прочность и устойчивость его должны быть обеспечены при транспортировке, подъеме и установке в проектное положение без установки дополнительных элементов. Укладка стального оцинкованного профилированного настила должна производиться после приемки собранного блока и окраски несущих конструкций покрытия. В целях исключения непроизводительных операций по перегрузкам и кантовкам фермы и балки, как правило, должны укрупняться в вертикальном положении.

Расположение монтажных стыков должно соответствовать заданной очередности и принятым методам производства работ. К примеру, монтажные стыки колонн в этажерках в большинстве случаев располагаются выше элементов связей, распорок, ригелей, обеспечивающих устойчивость собранной части. Целесообразно монтажные стыки располагать в местах наименьших усилий. Примыкания конструкций в узлах должны быть надежными в работе и простыми (без «вилок») в исполнении.

В монтажных узлах при опирании тяжелых или крупногабаритных конструкций должны быть предусмотрены столики для промежуточного временного опирания до оформления стыка. При общем болтовом креплении в узле нескольких разновременно монтируемых элементов конструкций следует предусматривать дополнительное крепление, обеспечивающее последовательность и надежность монтажа.

Монтаж настила рабочих площадок целесообразно производить блоками, включающими вспомогательные балки, при этом монтажные стыки должны обеспечивать возможность установки укрупненного блока настила простым опусканием сверху после установки главных балок, без необходимости каких-либо сложных манипуляций с поднятой конструкцией. В конструкции стыков должны быть предусмотрены зазоры, позволяющие осуществлять небольшой поворот блока при его заводке на место.

В практике монтажных работ довольно трудной операцией представляется установка точно изготовленного по длине элемента между двумя смонтированными колоннами. Узел примыкания балок к стенке колонн должен обеспечивать свободную их заводку при установленных колоннах, при этом имеющиеся ребра жесткости колонн не должны мешать установке балок. При опирании ферм и балок на

торцы столиков, приваренных к стенке колонн, следует учитывать отклонение от геометрических размеров смонтированных колонн. Между стыкуемыми плоскостями для компенсации монтажных зазоров проектом должны предусматриваться компенсирующие прокладки.

В сдвигоустойчивых соединениях соприкасающие поверхности деталей должны быть обработаны одним из способов, предусмотренным проектом. Обработанные поверхности до сборки необходимо предохранять от попадания на них грязи, масла, краски и образования льда. При несоблюдении этих требований обработку поверхностей следует повторить.

Чтобы обеспечить высокое качество сварочных работ, в сварных монтажных узлах должно быть предусмотрено не менее двух отверстий для болтовой сборки и подтяжки элементов узла. При проектировании сварных соединений и разработке технологии сварочных работ предпочтительно закладывать выполнение монтажной сварки в нижнем положении с направлением электрода относительно шва примерно под углом 45°.

Конструкция монтажных узлов должна быть простой и доступной, чтобы при выполнении всех операций по их сборке и закреплению могли быть применены типовые монтажные инструменты и приспособления и чтобы была обеспечена возможность поддержки головки болта при затягивании гайки.

Выполнение определенных монтажных требований к конструкциям дает наибольший эффект при монтаже колонн «безвыверочным способом», конвейерно-блочным монтажом покрытия каркасов одноэтажных промышленных зданий и др. Требования к особенностям и определенной последовательности выполнения монтажных работ перечисляются в пояснительной записке проекта конструкций и должны быть учтены при разработке проекта производства работ. Главой СНиП III–18–75 установлены допускаемые отклонения проектных размеров для монтажных элементов при изготовлении. В СНиП 3.03.01.87 «Несущие и ограждающие конструкции» приведены предельные отклонения проектных размеров, допускаемые при монтаже отдельных элементов.

В табл.8.10 приведены предельные отклонения от проектных размеров при монтаже одноэтажных промышленных зданий.

Таблица 8.10. Предельные отклонения от проектных размеров

Параметр	Предельное отклонение, мм
Колонны и опоры	
Отклонения отметок опорных поверхностей колонны и опор от проектных	5
Разность отметок опорных поверхностей соседних колонн и опор по ряду и в пролете	3
Смещение осей колонн и опор относительно разбивочных осей в опорном сечении	5
Отклонение осей колонн от вертикали в верхнем сечении при длине колонн, мм:	
свыше 4000 до 8000	10
свыше 8000 до 16000	12
свыше 16000 до 25000	15
свыше 25000 до 40000	20
Стрела прогиба (кривизна) колонны, опоры и связей по колоннам	0,0013 расстояния между точками закрепления, но не более 15
Смещение оси рельса с оси подкрановой балки	15
Отклонение оси рельса от прямой на длине 40 м	15

Продолжение табл.8.10

Параметр	Предельное отклонение, мм
Разность отметок головок рельсов в одном поперечном разрезе пролета здания:	
на опорах	15
в пролете	20
Разность отметок подкрановых рельсов на соседних колоннах (расстояние между колоннами L):	
при L менее 10 м	10
при L 10 м и более	$0{,}001L$, но не более 15
Взаимное смещение торцов стыкуемых рельсов в плане и по высоте	2
Зазор в стыках рельсов (при температуре 0°С и длине рельса 12,5 м); при изменении температуры на 10°С допуск на зазор изменяется на 1,5 мм	4
Подвесные краны	
Разность отметок нижнего ездового пояса на смежных опорах (вдоль пути) независимо от типа крана (расстояние между опорами L)	$0{,}0007L$
Разность отметок нижних ездовых поясов соседних балок в пролетах в одном поперечном сечении двух и многоопорных подвесных кранов:	
на опорах	6
в пролете	10
То же, но со стыковыми замками на опорах и в пролете	2
Смещение оси балки с продольной разбивочной оси пути (для талей ручных и электрических не ограничивается)	3
Односторонний зазор между фрезерованными поверхностями в стыках колонн	0,0007 поперечного размера сечения колонны; при этом площадь контакта должна составлять не менее 65% площади поперечного сечения
Фермы, ригели, балки, прогоны	
Отметки опорных узлов	10
Смещение ферм, балок, ригелей с осей на оголовках колонн из плоскости рамы	15
Стрела прогиба (кривизна) между точками закрепления сжатых участков пояса фермы и балки ригеля	0,0013 длины закрепленного участка, но не более 15
Расстояние между осями ферм, балок, ригелей по верхним поясам между точками закрепления	15
Совмещение осей нижнего и верхнего поясов ферм относительно друг друга (в плане)	0,004 высоты ферм
Отклонение стоек фонаря и фонарных панелей от вертикали	8
Расстояние между прогонами	5
Подкрановые балки	
Смещение оси подкрановой балки с продольной разбивочной оси	5
Смещение опорного ребра балки с оси колонны	20
Перегиб стенки в сварном стыке (измеряют просвет между шаблоном длиной 200 мм и вогнутой стороной стенки)	5

Продолжение табл.8.10

Параметр	Предельное отклонение, мм
Крановые пути мостовых кранов	
Расстояние между осями рельсов одного пролета (по осям колонн, но не реже, чем через 6 м)	10
Стальной оцинкованный профилированный лист	
Отклонение длины опирания настила на прогоны в местах поперечных стыков	0; -5
Отклонение положения центров:	
высокопрочных дюбелей, самонарезающих болтов и винтов	5
комбинированных заклепок:	
вдоль настила	20
поперек настила	5

Примечание. Отклонение симметричности установки фермы, балки, ригеля, щита перекрытия и покрытия (при длине площади опирания 50 мм и более) – 10 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительные нормы и правила. Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции СНиП III-18-75. –М.: Стройиздат, 1976.
2. Строительные нормы и правила. Несущие и ограждающие конструкции. СНиП 3.03.01-87. –М.: ЦИТП, 1988.
3. Строительные нормы и правила. Организация строительного производства. СНиП 3.01.01-85*. – М.: ЦИТП, 1985.
4. Справочник монтажника. Монтаж стальных и железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1980.
5. **Ходов М.П.** Монтажные краны, машины и механизмы для промышленного строительства. –М: Стройиздат, 1972.
6. **Кочетков Б.В., Огай К.А., Клевцов К.В.** Строительно-монтажный конвейер. – М: Стройиздат, 1974.
7. Монтаж строительных конструкций с применением вертолетов. $\frac{\text{ВСН } 463-85}{\text{ММСС СССР}}$.

ГЛАВА 9

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

9.1. Назначение технико-экономических показателей

Технико-экономические показатели проектов металлических конструкций предназначены для оценки их технического уровня при выборе и обосновании проектных решений и при сравнении вариантов. Технико-экономические показатели проектов используются также для оценки свойств конструкций с точки зрения экономических интересов различных участников строительного цикла, интересов заказчика, а также общего экономического эффекта в народном хозяйстве.

Экономические интересы заказчика и каждого из участников строительного цикла неодинаковы. Строительство происходит в разных хозяйственных условиях. Соответствующие экономические интересы и хозяйственные условия связаны с разными технико-экономическими показателями. Принимая техническое решение, проектировщик должен ясно представлять себе его последствия в возможных, применительно к проектируемому объекту, ситуациях и для всех заинтересованных лиц и организаций. Поэтому при технико-экономической оценке проекта нельзя ограничиться рассмотрением какого-либо одного технико-экономического показателя, а нужно рассматривать некоторую их совокупность.

Применительно к металлическим конструкциям строительный цикл разделен на этапы, выполняемые различными организациями, а именно: изготовление, транспортировка и монтаж. Изготовленная заводом конструкция есть товар, покупаемый монтажной организацией. Отдельные части строительной системы хозяйственно независимы и общаются через внешнюю среду, в современных условиях – через рынок. Свойственные внешней среде конъюнктурные изменения существенно сказываются на величинах некоторых из технико-экономических показателей. Однако существуют и такие показатели, на которые среда влияет слабо, а зависят они в основном от технических факторов, проектных решений по конструкции, технологии завода-изготовителя и технологии монтажно-строительной организации. Проектировщик должен выбрать состав определяемых технико-экономических показателей, исходя из существа задачи экономического анализа проекта, которую он перед собой ставит.

Необходимость при экономическом анализе проектов и при принятии технических решений иметь дело с несколькими показателями создает определенные трудности, поэтому предпринимались многочисленные попытки свести дело к какому-либо одному, «универсальному» показателю и рекомендовать его для применения в любых ситуациях. Из сказанного ясно, что технические решения, принятые на основе «универсального» показателя, могут быть ошибочными.

Технико-экономические показатели могут относиться к строительному объекту в целом или к его составной части, какой является металлическая конструкция, или к элементу конструкции – колонне, балке, ферме и т.д. Возможны технико-экономические показатели, относящиеся к условно выделенным фрагментам конструкции, например к узлам сопряжения элементов.

Технико-экономические показатели делятся на абсолютные и относительные. И те, и другие необходимы и имеют свои области применения. Фактические относительные показатели вычисляются по абсолютным. При прогнозе показателей предпочтительнее исходить из относительных величин.

При применении методов оптимального проектирования технико-экономические показатели используются в качестве целевых функций и ограничений.

9.2. Абсолютные технико-экономические показатели

Состав основных абсолютных технико-экономических показателей представлен на рис.9.1. При расчете многих показателей необходимо использовать значения некоторых других показателей, и определенную последовательность в выполнении расчета. На рис.9.1 показаны связи между показателями, необходимые для установления указанных последовательностей. Далее рассматривается каждый из показателей в отдельности.



Рис.9.1.

9.2.1. Масса металла конструкций. На сегодня это наиболее употребительный показатель при оценке проектных решений. Его легко можно рассчитать и измерить. Это одна из причин его широкого применения, но, разумеется, не единственная.

В составе затрат на изготовление и монтаж конструкции затраты непосредственно на металл составляют в среднем половину. Кроме того, вес металла существенно влияет на трудоемкость изготовления и монтажа и соответственно затраты, зависящие от трудоемкости, затраты на транспортировку и некоторые другие затраты, входящие в состав наиболее важных технико-экономических показателей. Фактически подавляющая часть затрат на изготовление, транспортировку и монтаж стальных конструкций растет с увеличением массы. Поэтому массу часто рассматривают как обобщающий показатель и ограничиваются при сопоставлении вариантов конструкций только сравнением по массе. Здесь могут возникнуть серьезные ошибки и нужно ясно себе представлять, откуда они идут и когда они существенны.

Масса является естественным критерием «механического» совершенства конструкции, когда конструкция рассматривается как объект строительной механики. При прочих равных условиях, чем меньше масса, тем совершеннее конструкция с точки зрения рационального использования металла. При сопоставлении конструкций, близких по назначению, применяются различные относительные показатели, когда масса делится на какую-либо величину, характеризующую назначение (площадь, объем и т.д.).

Когда нужно сравнивать затраты, связанные со строительством (в целом или на каком-то этапе), то при сравнении по массе возникают ошибки. Не все составляющие затрат зависят от массы. Зависимость затрат от массы может быть нелинейна, немонотонна и даже разрывна, на кривой зависимости затрат от массы могут быть ступеньки вверх или вниз. Это связано с тем, что при изменении массы изменяется технология. Во многих случаях указанное обстоятельство оказывается важным принципиально.

Иногда сравнение вариантов конструктивных решений только по массе мотивируется тем, что в рассматриваемых конструкциях затраты на металл преобладают над другими затратами. Такая мотивировка не верна. Для сравнения конструкций важна не вся масса металла и не полные величины затрат, а только возможный в данном рассмотрении диапазон изменения массы от варианта к варианту (максимально возможная вариация массы в пределах совокупности возможных вариантов) и возможный диапазон изменения других затрат. Если даже затраты на металл существенно превышают другие виды затрат, например затраты на изготовление или на монтаж, соотношение диапазонов их изменения в пределах совокупности возможных вариантов может быть совершенно другим. Например, малому диапазону изменения затрат на металл может соответствовать существенно бóльший диапазон изменения затрат на изготовление или монтаж, если появляются различия в технологии.

Кроме явного сравнения по массе, когда неточности такого сопоставления грамотному проектировщику ясны и он принимает это во внимание, критерий массы иногда выступает в скрытом виде. Это бывает, когда применяются упрощенные методики расчета стоимостных показателей и трудоемкости по формулам, выражающим непрерывные зависимости, в которых масса является единственным аргументом. Основные недостатки критерия массы при этом сохраняются, но они не видны.

9.2.2. Затраты на материалы при изготовлении включают в себя затраты на прокат, сварочные и лакокрасочные материалы, рассчитанные по действующим ценам с учетом отходов. При сопоставлении проектных решений по этому показателю в отличие от массы учитываются различия, связанные с использованием сталей разных марок и других материалов. По сравнению с массой показатель зависит не только от параметров конструкции, но и от конъюнктуры на рынке строительных материалов. Затраты на материалы включают в себя свои транспортно-заготовительные расходы.

9.2.3. Трудоемкость заводского изготовления есть сумма затрат труда на выполнение технологических процессов изготовления. Трудоемкость – один из показателей, характеризующих качество проектного решения с точки зрения удовлетворения требованиям производства и облегчения изготовления. Она является одной из числовых характеристик совокупности свойств конструкции, обобщаемых понятием *технологичность*.

Трудоемкость зависит от проектных решений по конструкции (конструктивной формы, размеров, материалов), а также от используемой технологии изготовления, следовательно от организации, технической оснащенности и квалификации производства. Трудоемкость не зависит от рыночной конъюнктуры.

Приведенное выше определение трудоемкости соответствует ГОСТу. Во избежание недоразумений (частых в проектной практике) необходимо дать некоторые пояснения. Технологический процесс разделяется на технологические операции. Трудоемкость есть сумма трудоемкости отдельных операций. Каждая операция выполняется на соответствующем ей рабочем месте. Трудоемкость операции – это полное время занятости рабочего места выполнением операции. Ее нельзя путать с машинным временем – временем работы оборудования на рабочем месте, трудоемкость может быть существенно больше.

Технологические процессы изготовления, затраты труда на выполнение которых составляют трудоемкость, включают в себя только операции, непосредственно связанные с изменением или измерением состояния объекта производства (изделия, заготовки). Все другие трудозатраты, например, подготовка сварочных материалов, изготовление специального инструмента в трудоемкости не учитываются, даже когда они значительны и зависят от конструктивного решения. Трудозатраты, не связанные с технологическими процессами изготовления, учитываются косвенным образом в показателях себестоимости изготовления.

Масса и трудоемкость – физические величины. Они зависят только от технических решений проектировщика и от организационного и технического состояния производства. Они не зависят от тарифных сеток зарплаты, накладных расходов, цен, от рыночной конъюнктуры и других внешних по отношению к производству, экономических факторов. Остальные технико-экономические показатели имеют денежное выражение и уже связаны с экономическим состоянием производства и внешней экономической средой.

9.2.4. Технологическая себестоимость изготовления есть сумма затрат (в денежном выражении) на осуществление технологических процессов изготовления изделия. Она включает в себя следующие затраты заводских цехов-изготовителей:

- заработную плату производственных и вспомогательных рабочих, ИТР и служащих;
- затраты на содержание и эксплуатацию основного и вспомогательного оборудования (энергозатраты, амортизация, ремонт и пр.);
- затраты на эксплуатацию инструмента, приспособлений, штампов и проч.;
- общецеховые расходы.

Технологическая себестоимость изготовления является важнейшей количественной характеристикой *технологичности* конструкции применительно к процессу изготовления – т.е. совокупности свойств конструкции, определяющих ее приспособленность к изготовлению с оптимальным уровнем затрат.

Эффективность мероприятий по совершенствованию конструкции, имеющих целью облегчение и удешевление изготовления, оценивается, в первую очередь, показателем – технологической себестоимостью. В то же время по технологической себестоимости изготовления заданных конструкций типопредставителей целесооб-

разно оценивать варианты технологических процессов изготовления – при разработке новых технологических процессов и при назначении технологического маршрута изготовления.

9.2.5. Заводская себестоимость (полная себестоимость изготовления) есть сумма денежных затрат предприятия на изготовление и реализацию конструкций. Основные слагаемые заводской себестоимости это: технологическая себестоимость; затраты на материалы; общезаводские расходы; расходы на подготовку производства; внепроизводственные расходы. Последние три позиции учитываются в части, относящейся к конструкции (методика отнесения здесь не рассматривается).

Показатель «заводская себестоимость» объединяет в одном денежном измерении затраты труда, затраты на материалы, затраты на эксплуатацию оборудования, зарплату и прочие затраты завода на изготовление конструкции. Влияние конъюнктуры на себестоимость проявляется только через цены на материалы и услуги, а также вследствие изменения тарифных ставок зарплаты. При стабильном состоянии экономики эти величины изменяются во времени незначительно и для задач оценки технического уровня проектных решений могут рассматриваться как константы. В этих условиях заводская себестоимость зависит только от проектных решений по конструкции, а также от принятых на заводе-изготовителе технологии и организации производства. Она может использоваться как интегральный показатель их технического уровня (в пределах этапа изготовления).

Снижение себестоимости полезно во всех случаях. Если уменьшение себестоимости сопровождается снижением цены на конструкцию – это полезно покупателю. Если цена не снижается – растет прибыль завода-изготовителя. Себестоимость существенно зависит от технических решений (конструктора и технолога). Следовательно, это именно тот показатель, который должен быть в центре внимания проектировщика.

Поскольку в себестоимость входят все затраты завода, связанные с изготовлением и реализацией конструкции, может случиться, что полезное мероприятие по улучшению конструкции или технологии даст небольшой эффект в снижении себестоимости и могут быть сделаны ошибочные выводы о целесообразности его реализации. Поэтому кроме себестоимости полезны и другие, частные показатели, описанные выше.

9.2.6. Цена конструкции. Прибыль завода-изготовителя. Цена конструкции это та сумма, за которую ее продает завод-изготовитель. Существуют договорные цены и цены, определяемые по прейскуранту. Прибыль завода-изготовителя зависит от разности между ценой и заводской себестоимостью (не вдаваясь в подробности). Прибыль завода может быть интересна проектировщику, когда ему нужно понять интересы завода-изготовителя.

Иногда используется понятие расчетной цены и расчетной прибыли. Расчетная прибыль есть определенный процент заводской себестоимости, расчетная цена – себестоимость плюс расчетная прибыль. В интересующие проектировщика задачи оценки технического уровня и сопоставления проектных решений эти величины не вносят ничего нового по сравнению с себестоимостью.

9.2.7. Транспортные затраты включают в себя затраты на перевозку от станции отправки с завода-изготовителя до приобъектного склада в районе строительства. Самостоятельный интерес представляют лишь случаи необычных ситуаций, которые входят в состав ряда последующих показателей.

9.2.8. Трудоемкость монтажа есть сумма затрат труда на выполнение технологических процессов монтажа. Является показателем, характеризующим качество проектного решения с точки зрения удовлетворения требованиям производства работ и облегчения монтажа. Представляет собой одну из числовых характеристик монтажной *технологичности* конструкции. Показатель «трудоемкость монтажа» ана-

логичен показателю «трудоемкость изготовления» и к нему приложимы все те замечания, которые сделаны в п.9.2.3. Трудоемкость монтажа зависит только от проектных решений конструкции и от технологии монтажа.

9.2.9. Технологическая себестоимость монтажа (прямые затраты на монтаже без цены конструкции). Этот показатель представляет собой сумму затрат на осуществление технологических процессов монтажа. Здесь учитываются следующие основные виды затрат: заработная плата; эксплуатация машин, механизмов и пр.; транспортные расходы от приобъектного склада.

Именно этот показатель должен использоваться как количественная характеристика *технологичности* конструкции применительно к процессу монтажа. По нему должна оцениваться эффективность мероприятий по совершенствованию конструкций, имеющих целью удешевление монтажа. По технологической себестоимости монтажа заданных конструкций – типопредставителей целесообразно сравнивать варианты технологических процессов монтажа.

9.2.10. Себестоимость монтажа есть сумма затрат строительно-монтажной организации на монтаж конструкции. Включает в себя затраты, указанные в предыдущем пункте, к которым добавляются: цена конструкции; транспортные расходы; накладные расходы монтажной организации, относящиеся к конструкции.

Для монтажной организации себестоимость монтажа имеет тот же смысл и значение, что и себестоимость изготовления для завода металлоконструкций. Для проектировщика металлоконструкций при решении вопросов оценки технического уровня проектных решений и сравнения вариантов себестоимость монтажа неудобна, поскольку в нее входит цена металлоконструкции – величина, которая может не зависеть от оцениваемых проектировщиком особенностей проектного решения и сильно подвержена воздействию конъюнктурных факторов. Предпочтительнее является показатель «себестоимость в деле», разъясняемый далее.

9.2.11. Себестоимость в деле есть сумма затрат, осуществляемых на всех этапах строительного цикла, идущих на изготовление, транспортировку и монтаж конструкции. Численно она равна себестоимости монтажа, в которой цена конструкции заменена на заводскую себестоимость конструкции. Таким образом исключаются те слагаемые цены, которые выражают прибыль завода и оплаты, не связанные с конструкцией (не входящие в состав себестоимости).

Себестоимость в деле характеризует весь строительный цикл и имеет для него тот же смысл, что и заводская себестоимость для этапа изготовления. Себестоимость в деле зависит от проектных решений конструкции и от технологий, принятых изготовителем и монтажной организацией. Себестоимость в деле является предпочтительным интегральным показателем технического уровня проектного решения.

Из сказанного нельзя делать вывод, что надо всегда пользоваться этим показателем. Большое число слагаемых показателя (если они не выделены) усложняет анализ причин его изменения при изменении проектного решения. Кроме того, отдельные усовершенствования конструкции могут быть весьма существенны, например для изготовления или монтажа, но незначительно скажутся на величине себестоимости в деле, в связи с чем могут быть незаслуженно отвергнуты.

9.2.12. Приведенные затраты. Термин применяется в разных смыслах, поскольку в нем указывается на наличие операции приведения, а не на те затраты, которые приводятся. Используются два вида приведения – по капитальным затратам и по расходам на эксплуатацию конструкций. При приведении по капитальным затратам к себестоимости в деле добавляется доля капитальных вложений в фонды монтажных организаций и в изготовление. При приведении по затратам на эксплуатацию конструкции к себестоимости в деле добавляется доля эксплуатационных затрат. Иногда, применяют более сложные виды приведения, например для учета изменений параметров здания, вызванных изменением проектных решений по металлоконструкциям и др.

Показатель «приведенные затраты», учитывающий капитальные вложения, следует использовать с осторожностью, и только в том случае, когда в связи с изготовлением и монтажом рассматриваемой конструкции действительно необходимы конкретные капитальные затраты.

9.2.13. Сметная стоимость строительно-монтажных работ. В большинстве случаев условия строительства и состав строительно-монтажных работ для объектов оказываются различными, даже при одинаковых основных проектных решениях. Для того чтобы учесть специфику каждого конкретного строительства вычисляется сметная стоимость строительно-монтажных работ. Расчет ведется, по специальным сметным нормативам.

Сметная стоимость для строительства является аналогом прейскурантной цены на промышленную продукцию. Отсюда естественно требование минимизации сметной стоимости проектируемого объекта, когда оно высказывается заказчиком. Знание сметной стоимости нужно и проектировщику.

Составление сметы является составной частью работ по проектированию. Однако, сметная стоимость не обязательно становится другой с изменением проектных решений конструкции и с изменением технологии изготовления и монтажа. Можно улучшать конструкцию и технологию, обеспечивать снижение себестоимости изготовления и себестоимости в деле, не уменьшая соответственно прейскурантную цену конструкции и сметную стоимость строительно-монтажных работ. Поэтому при оценке технического уровня проектных решений и при сопоставлении их вариантов не следует руководствоваться сметной стоимостью как основным показателем.

9.2.14. Рекомендуемые показатели. При оценке технического уровня проектных решений и при сопоставлении их вариантов следует пользоваться, как правило, "себестоимостью в деле" в качестве интегрального показатели, а также технологической себестоимостью монтажа, себестоимостью изготовления, технологической себестоимостью изготовления, трудоемкостью и массой конструкции как показателями, характеризующими отдельные свойства проектного решения и отдельные этапы строительного цикла.

9.3. Нормативная база расчета технико-экономических показателей

Расчет технико-экономических показателей разных вариантов конструкций независимо от применяемого метода расчета должен вестись для одинаковых условий изготовления, транспортировки и монтажа. Поэтому важно установление определенных расчетных условий, применительно к которым следует вести все расчеты и исходя из которых должны определяться все необходимые для этого параметры. Использование при расчете сравниваемых проектных решений различных расчетных условий и нормативов является распространенной причиной недоразумений и ошибок при принятии решений. Расчетные условия могут периодически изменяться с учетом новых конструктивных форм, материалов, технологии, нормативов и цен. В случае, если для рассматриваемой конструкции на каком-либо этапе изготовления и монтажа имеются существенные отличия от расчетных условий, результаты расчета по соответствующим статьям затрат должны корректироваться.

Расчетные условия изготовления и монтажа задаются в форме исходных информационных моделей, включающих следующие составные части:

- комплект описаний типовых технологических процессов изготовления и монтажа, в том числе: перечень технологических операций и соответствующих рабочих мест; перечень оборудования применительно к каждому рабочему месту;
- нормы трудоемкости;

- нормативы затрат по статьям себестоимости, отнесенные к каждому из рабочих мест;
- прейскуранты на прокат, сварочные и лакокрасочные материалы;
- нормативы транспортных затрат.

Если на этапе проектирования место строительства или место изготовления неизвестны, то расчет транспортных расходов ведется для устанавливаемых условного расчетного расстояния и района перевозки.

На основе исходной модели разрабатываются конкретные методики расчета технико-экономических показателей. В зависимости от назначения методики и допустимой при данном назначении величины методической ошибки разработчик методики вводит упрощающие предположения и проводит аппроксимацию и осреднение данных.

Единая исходная информационная модель изготовления и монтажа необходима для обеспечения сопоставимости результатов расчетов технико-экономических показателей различных проектных решений и их вариантов. Модель может полностью соответствовать какому-либо заводу и монтажно-строительной организации. Более предпочтительной является абстрактная модель, соответствующая некоторым средним условиям изготовления и монтажа, характерным для отрасли металлостроительства, ко времени изготовления и монтажа.

В качестве примера абстрактной исходной модели можно привести модель, разработанную группой организаций; (ЦНИИПСК, ВНИКТИСК, МакИСИ) применительно к металлоконструкциям каркаса промышленного здания [1]. Исходная информационная модель не зависит от методик расчета технико-экономических показателей и от способа составления методик.

9.4. Методы расчета технико-экономических показателей

Применяемые методы расчета технико-экономических показателей отличаются, в первую очередь, уровнем подробности описания процессов изготовления и монтажа и соответственно уровнем подробности требуемых сведений о конструкции. Данные исходной информационной модели изготовления и монтажа используются или непосредственно или осредняются, т.е. на базе исходной модели создается упрощенная рабочая модель. Чем больше осреднений и упрощений исходной модели, тем грубее метод и, следовательно, значительнее методическая ошибка, но при этом метод становится проще в употреблении и требует меньшего состава исходных данных о конструкции. В проектной практике используются методы разного уровня точности. Каждому уровню соответствует своя сфера применения.

Методы расчета технико-экономических показателей конструкции в целом (например каркаса здания) и ее элементов (колонн, ферм, балок и т.д.) неодинаковы. Разработчик метода расчета для элементов конструкции сталкивается с трудностью, связанной с необходимостью отнести к элементу конструкции часть затрат на монтаже, для чего приходится вводить те или иные упрощающие гипотезы. В большинстве методов учитывается необходимость расчета технико-экономических показателей по чертежам КМ и тем или иным способом прогнозируются доработки проекта на стадии КМД.

Методы расчета технико-экономических показателей делятся на две основные группы: калькуляционные и аналитические (укрупненные) методы. *Калькуляционный* метод характеризуется минимальным упрощением исходной информационной модели. Используются данные, относящиеся к отдельным операциям и

даже переходам технологических процессов изготовления и монтажа. Метод включает в себя:

- подетальный расчет потребного проката;
- расчет затрат на основные материалы по прейскурантам;
- пооперационный или непереходный расчет трудоемкости изготовления и трудоемкости монтажа;
- пооперационный расчет затрат по статьям себестоимости;
- доопределение данных о конструкции, если исходной является документация КМ.

Для выполнения калькуляционного расчета необходимы, во-первых, исходные данные, характеризующие конструкцию в целом и, во-вторых, исходные данные, характеризующие входящие в конструкцию сборочные единицы и детали. Расчет калькуляционным методом требует большого объема вычислений и использования обширной справочно-нормативной информации. Для удобства использования в практике проектирования он должен выполняться автоматизированно, с использованием ЭВМ. Современные вычислительные средства обеспечивают оперативность выполнения калькуляционного расчета, удобство ввода данных и наглядность результатов. В случаях применения методов автоматизированного оптимального проектирования калькуляционный расчет целевых функций и ограничений может быть включен в состав оптимизационного цикла.

Преимущество калькуляционного метода – возможность в числе прочего выявлять влияние на технико-экономические показатели особенностей конкретного проектного решения, сравнивать проекты, имеющие даже небольшие конструктивные отличия. Калькуляционный метод определяет структуру затрат – ценную информацию, помогающую найти пути дальнейшего совершенствования конструкции.

Калькуляционный метод пригоден для расчета новых конструктивных форм, опыт изготовления которых отсутствует. Любая реализация калькуляционного метода допускает замену нормативной базы (изменение исходной модели).

В аналитических (укрупненных) методах определение технико-экономических показателей сводится к расчету по некоторой последовательности несложных формул, иногда, с использованием таблиц малого объема и номограмм. Исходные данные ограничиваются небольшим объемом параметров, характеризующих конструкцию и условия производства в целом. Формулы и таблицы, используемые в аналитических методах, получены статистической обработкой, аппроксимацией и осреднением данных исходной модели (нормативов) применительно к рассматриваемой группе конструкций. Каждая конкретная аналитическая методика ориентирована на один какой-либо вид конструкций, определенные основные проектные решения, уровень развития конструктивной формы и нормативную базу. Переход на новые конструктивные формы, появление новых технологических процессов, изменение цен и тарифных ставок требуют, как правило, переработки методик.

Калькуляционный и укрупненный методы расчета не находятся в противоречии, а взаимодополняются, давая возможность решать разнообразные задачи. Очевидно, что для совместного и согласованного использования калькуляционные и укрупненные методы должны основываться на одной и той же исходной информационной модели. В условиях быстро изменяющейся экономической конъюнктуры жизнеспособными оказываются только калькуляционные методы, поскольку только они обладают возможностью оперативно отслеживать изменения цен и нормативов.

9.5. Калькуляционный метод расчета технико-экономических показателей металлоконструкций каркасов промышленных зданий

Примером реализации калькуляционного метода расчета, отвечающего перечисленным выше требованиям, является автоматизированная система, краткое описание которой дано в [1]. Она может эксплуатироваться на ЭВМ Единой системы. Вычисляется полный состав показателей, рекомендуемый п.9.2.

В исходной информационной модели за основу технологии изготовления принят специально разработанный комплект типовых технологических процессов, ориентированный на технологию крупных заводов отрасли – Челябинского и Белгородского. Технологический процесс изготовления разбит на 65 операций, а монтажа на 15 операций.

Исходные данные для расчета представляют собой упрощенное описание конструкции, содержащее только информацию, необходимую для данного расчета и составленное непосредственно по чертежам. Подготовка исходных данных заключается в занесении сведений по конструкции на бланки анкетной формы. Бланки и программы обработки данных предусматривают возможность подробного описания сложных конструкций, но возможно занесение и весьма ограниченного объема информации. В зависимости от состава исходных данных система вызывает различные программы, использующие нормативы разного уровня укрупнения, т.е., в зависимости от состава исходных данных система выполнит расчет, неодинаковый по точности.

Расчет технико-экономических показателей разбит на четыре этапа: «Кодирование», «Трудоемкость», «Себестоимость», «Дело». Этапы выполняются последовательно, в указанном порядке. Последующие этапы используют результаты предыдущих, имеется возможность ограничить расчет выполнением части этапов. На этапе «Кодирование» осуществляется чтение данных, контроль и составление внутримашинного описания конструкции. Выполняется также расчет массы деталей, стержней и отправочных марок. На этапе «Трудоемкость» выполняется расчет трудоемкости изготовления. В зависимости от состава исходных данных расчет ведется по различным нормативам. Если занесена информация чертежей КМ, программа проводит доработку информации до уровня, обеспечивающего привязку к нормативным таблицам. На этапе «Себестоимость» выполняется расчет затрат на прокат и на основные материалы, а также расчет технологической и полной себестоимости изготовления. На этапе «Дело» выполняется расчет затрат на монтаж и расчет себестоимости «в деле». В составе одного задания можно провести расчет для нескольких значений серийности изготовления.

Результаты работы системы по указанию пользователя могут выдаваться в различном составе. Минимально это четыре таблицы: данные по трудоемкости изготовления (по операциям), сведения по себестоимости, показатели монтажа и сводная таблица основных исходных данных и результатов. Более подробная печать содержит исходные данные, сведения по каждой операции технологического процесса, весовые сводки и т.д. Исходные данные и результаты расчета сохраняются, на машинных накопителях памяти для последующего использования. Система содержит 173 таблицы нормативной информации, которая может корректироваться.

Другим примером реализации калькуляционного метода являются автоматизированные системы расчета себестоимости металлоконструкций [7], разработанные применительно к персональным компьютерам и используемые плановыми отделами ряда заводов. Системы эти специально ориентированы на функционирование в условиях быстро изменяющихся цен и нормативов.

9.6. Аналитические (укрупненные) методы расчета технико-экономических показателей

Каждый из аналитических методов расчета технико-экономических показателей ориентирован на определенный тип конструкций и заданный круг задач проектирования. Наиболее подробные методы, предназначенные для использования на этапе проектирования для выбора основных параметров элементов конструкций каркасов промышленных зданий, подробно изложены и обоснованы в [2–4]. Рассматриваются трудоемкость изготовления и монтажа, себестоимость изготовления, себестоимость в деле и приведенные затраты. Подобно обсуждается влияние различных факторов на показатели.

Подробное обоснование методик, содержащееся в [1, 2], помогает создавать аналогичные методики для конструкций других видов. Рекомендации по расчету себестоимости и приведенных затрат представляют на сегодня только методический интерес, ввиду резкого изменения цен и тарифных ставок. В [1, 2] вместо термина «себестоимость» используется термин «стоимость».

Удобные формулы расчета трудоемкости элементов конструкций каркасов промышленных зданий предложены в руководстве [5]. Основное назначение последнего – расчеты при проектировании производства металлических конструкций. Но они вполне применимы при проектировании конструкций для оценки трудоемкости на этапе выбора параметров каркаса и основных параметров элементов конструкции.

Руководство [6] предназначено для численной оценки технологичности конструкций одноэтажных каркасов промышленных зданий на этапе выбора основных параметров, исходя из приближенных расчетов трудоемкости по предлагаемой укрупненной методике.

Все приведенные аналитические методики в настоящее время следует рассматривать только как примеры построения приближенных выражений. Рекомендуемые в них цифровые значения коэффициентов устарели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа расчета технико-экономических показателей стальных каркасов промышленных зданий. Руководство программиста / ЦНИИпроект. – М.: 1984 (Межотраслевой фонд алгоритмов и программ автоматизированных систем в строительстве. Вып. П–48).
2. **Лихтарников Я.М.** Экономика стальных конструкций. – Киев: 1962.
3. **Лихтарников Я.М.** Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979.
4. **Кузнецов А.Ф.** Строительные конструкции из стали повышенной и высокой прочности. – М.: 1975.
5. Руководство по проектированию заводов металлоконструкций. Методика и нормы расчета трудоемкости изготовления металлоконструкций промышленных зданий / ЦНИИпроектстальконструкция. – М: Стройиздат, 1985.
6. Руководство по количественной оценке технологичности металлических конструкций промышленных зданий на стадии проектирования. – ЦНИИПСК. – М.: 1982.
7. **Зеленков В.И.** Составление плановых калькуляций изготовления стальных конструкций с помощью ПЭВМ. – Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1993. – № 5.

ГЛАВА 10

КЛАССИФИКАЦИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

10.1. Классификация агрессивных сред

При проектировании металлических конструкций необходимо учитывать коррозионную стойкость материалов в средах с различной степенью агрессивного воздействия и стремиться к применению, в первую очередь, материалов, не требующих защиты от коррозии, при обеспечении минимума приведенных затрат по СН 423-71. По этому признаку к материалам повышенной коррозионной стойкости следует отнести некоторые низколегированные стали, оцинкованную листовую сталь по ГОСТ 14918-80*, алюминированную листовую сталь по ТУ 14-11-236-88, сталь с алюмоцинковым покрытием по ТУ 14-11-247-88 и ряд алюминиевых сплавов по ГОСТ 21631-76*Е и ГОСТ 13726-78*Е. Особую категорию материалов представляют высоколегированные нержавеющие стали, титановые сплавы и др., которые из-за их высокой стоимости целесообразно применять в строительных конструкциях в основном в качестве плакирующего или облицовочного слоя при дополнительном технико-экономическом обосновании.

С повышением степени агрессивного воздействия среды возрастают требования к коррозионной стойкости материалов, применяемых без защиты от коррозии, и к защитным покрытиям. Поэтому степень агрессивного воздействия среды может быть оценена по коррозионной стойкости материалов, если конструкции применяются без защиты от коррозии, или по устойчивости материалов, используемых для защитных покрытий, которые обеспечивают долговременную защиту конструкций от коррозии. Исходя из скорости коррозии материалов конструкций и защитных металлических покрытий в средах с определенной степенью агрессивного воздействия, приведенной в табл.10.1, тонколистовые ограждающие конструкции изготовляют из более коррозионностойких материалов, чем конструкции из прокатного профиля или толстого листа.

Чаще всего строительные металлические конструкции подвергаются атмосферной коррозии (на открытом воздухе, внутри промышленных зданий и под навесами). Степень агрессивного воздействия среды на конструкции при атмосферной коррозии определяется продолжительностью воздействия фазовой и адсорбционной пленок влаги, а также видом и концентрацией газов, составом, растворимостью и гигроскопичностью твердых пылевидных частиц, наличием солей и аэрозолей в воздухе.

Коррозия металлических конструкций, эксплуатируемых в закрытых помещениях определяется воздействием адсорбционной пленки влаги, а также агрессивностью воздуха. С повышением относительной влажности и агрессивности воздуха помещений воздействие адсорбционной пленки увеличивается. Фазовая пленка влаги на конструкциях внутри зданий образуется в виде конденсата. Образование фазовой пленки влаги на металлических конструкциях ускоряет коррозию на порядок.

Таблица 10.1. Оценка степени агрессивного воздействия среды на основные материалы металлических конструкций

Степень агрессивного воздействия среды на конструкцию	Средняя скорость коррозии, мм/год		Возможность применения конструкций без защиты от коррозии или с защитой долговечными покрытиями (в скобках – минимальная долговечность покрытия, год.)		
	углеродистой стали	алюминия, алюминиевых и цинковых защитных покрытий	несущих конструкций из углеродистой стали	ограждающих тонколистовых конструкций	
				из алюминия	из оцинкованной или алюминированной стали при толщине покрытия не менее 20 мкм
Неагрессивная среда	До 0,01	До 0,001	Защита только на период транспортировки, хранения и монтажа*	Без защиты	Без защиты со стороны помещения, при окрашивании со стороны утеплителя (20)
Слабоагрессивная	Св. 0,01 до 0,05	Св.0,001 до 0,005	Цинковые или алюминиевые покрытия (20), лакокрасочные покрытия (10–20), металлизационные покрытия (20)	То же	Лакокрасочные покрытия по оцинкованной стали (25), алюминированная сталь – без защиты
Среднеагрессивная	Св. 0,05 до 0,5	Св. 0,005 до 0,05	То же, в комбинации с химически стойкими лакокрасочными покрытиями (15)**, лакокрасочные покрытия (10)	Электрохимическое анодирование (20)	Полимерные покрытия на панелях заводского изготовления (15)
Сильноагрессивная	Св. 0,5	Св. 0,05	Металлизация распылением цинка или алюминия в комбинации с химически стойкими лакокрасочными покрытиями (12)**, лакокрасочные покрытия (5–7)	То же, в комбинации с химически стойкими лакокрасочными покрытиями (15)	—

* Защита от коррозии в процессе эксплуатации конструкций не требуется.

** Долговечность подобных систем покрытий в 1,6–2,3 раза больше арифметической суммы долговечности металлических и лакокрасочных покрытий.

Коррозия конструкций, эксплуатируемых на открытом воздухе, в основном определяется продолжительностью воздействия фазовой пленки влаги (дождь, мокрый снег, роса и т.д.), которая изменяется в зависимости от местности и в некоторых районах сухой зоны в 5–6 раз меньше, чем в ряде районов влажной зоны. Зона влажности устанавливается в соответствии с СНиП II-3-79. Продолжительность воздействия фазовой пленки влаги на конструкции, расположенные под навесами, меньше (только роса, туман, иней), чем на конструкции, находящиеся на открытом воздухе в той же зоне влажности. Поскольку фазовая пленка влаги вызывает более существенную коррозию, чем адсорбционная, степень агрессивного воздействия среды на конструкции под навесами при прочих равных условиях примерно такая же, как внутри неотапливаемых зданий. В зданиях, в которых действующими санитарными нормами допускается образование конденсата, фазовая пленка влаги образуется, в первую очередь, на поверхности ограждающих конструкций.

Коррозионная активность газов при равной влажности воздуха возрастает от группы А к группе Г (табл.10.2). Классификация степени агрессивного воздействия сред при атмосферной коррозии в зависимости от концентрации газов приведена в табл.10.3. Коррозионная активность солей, аэрозолей и пыли значительно возрастает при переходе от малорастворимых к хорошо растворимым гигроскопичным (табл.10.4). Классификация степени агрессивного воздействия сред при атмосферной коррозии в зависимости от вида и свойств солей, аэрозолей и пыли приведена в табл.10.5.

Таблица 10.2. Группы агрессивных газов в зависимости от их вида и концентрации

Название газа	Концентрация, мг/м^3			
	А	Б	В	Г
Сернистый ангидрид	До 0,1	0,1–25	25–90	Св. 90
Хлористый водород	До 0,1	0,1–0,6	0,6–1	Св. 1
Сероводород	До 0,01	0,01–10	10–200	Св. 200
Окислы азота	До 0,1	0,1–5	5–25	Св. 25
Аммиак	До 0,2	Св. 0,2	–	–
Углекислый газ	До 1000	Св. 1000	–	–
Фтористый водород	До 0,02	0,02–5	5–10	Св. 10

Воздействию неорганических жидких сред (природных и технических вод, растворов неорганических солей, щелочей и кислот) подвергаются конструкции гидротехнических сооружений, очистных сооружений, некоторых объектов доменных комплексов, резервуаров и газгольдеров. Конструкции резервуаров для нефти и нефтепродуктов подвергаются также воздействию органических жидких сред. Степень агрессивного воздействия жидких сред определяется кислотностью (pH), концентрацией растворенных солей и газов, включая кислород, температурой, а также напором или скоростью движения потока жидкости. Классификация степени агрессивного воздействия жидких сред на материалы конструкций и защитных металлических покрытий приведена в СНиП 2.03.11-85.

Таблица 10.3. Степень агрессивного воздействия газов при атмосферной коррозии металлических конструкций

Относительная влажность воздуха помещения, % / Продолжительность увлажнения фазовой пленкой, ч/год (ГОСТ 9.039-74)	Группа газов	Степень агрессивного воздействия среды на конструкции	
		на открытом воздухе, под навесами, в неотапливаемых зданиях (определяется по продолжительности увлажнения)	Внутри отапливаемых зданий (определяется по относительной влажности помещений)
До 60 / До 2000	А	Слабоагрессивная	Неагрессивная
	Б	Слабоагрессивная	Неагрессивная
	В	Среднеагрессивная	Слабоагрессивная
	Г	Сильноагрессивная	Среднеагрессивная
60–75 / 2000–3000	А	Слабоагрессивная	Неагрессивная
	Б	Среднеагрессивная	Слабоагрессивная
	В	Среднеагрессивная	Среднеагрессивная
	Г	Сильноагрессивная	Средне агрессивная
Св. 75 / 3000–4500	А	Среднеагрессивная	Слабоагрессивная
	Б	Среднеагрессивная	Среднеагрессивная
	В	Сильноагрессивная	Среднеагрессивная
	Г	Сильноагрессивная	Среднеагрессивная

Таблица 10.5. Степень агрессивного воздействия солей, аэрозолей и пыли на металлические конструкции

Относительная влажность воздуха помещения, % / Продолжительность увлажнения фазовой пленкой, ч/год (ГОСТ 9.039-74)	Группа солей, аэрозолей и пыли по табл.10.4	Степень агрессивного воздействия среды на конструкции	
		на открытом воздухе, под навесами, в неотапливаемых помещениях (определяется по продолжительности увлажнения)	Внутри отапливаемых зданий (определяется по относительной влажности помещений)
До 60 / До 2000	А	Неагрессивная	Неагрессивная
	Б	Слабоагрессивная	Неагрессивная
	В	Среднеагрессивная	Слабоагрессивная
60–75 / 2000–3000	А	Слабоагрессивная	Неагрессивная
	Б	Среднеагрессивная	Слабоагрессивная
	В	Среднеагрессивная	Среднеагрессивная
Св. 75 / 3000–4500	А	Слабоагрессивная	Неагрессивная
	Б	Среднеагрессивная	Слабоагрессивная
	В	Сильноагрессивная	Среднеагрессивная

Таблица 10.4. Группа солей, аэрозолей, пыли и их характеристики

А	Б	В
Мало растворимые	Хорошо растворимые, малогигроскопичные	Хорошо растворимые, гигроскопичные
Силикаты, фосфаты (вторичные и третичные) и карбонаты магния, кальция, бария, свинца; сульфаты бария, свинца; оксиды и гидрооксиды железа, хрома, алюминия, кремния	Карбонаты и сульфаты натрия, калия, аммония; нитраты калия, бария, свинца, магния	Хлориды натрия, калия, аммония, кальция, магния, алюминия, цинка, железа; сульфаты магния, марганца, цинка, железа; нитраты и нитриты натрия, калия, аммония; все первичные фосфаты, вторичный фосфат натрия; оксиды и гидрооксиды натрия, калия

10.2. Коррозионная стойкость строительных сталей

Конструкции из углеродистой стали марок ВСт3сп5, ВСт3пс6 ВСт3кп2 по ГОСТ 380-88* в агрессивных средах[1] следует применять только при условии обеспечения защиты от коррозии. Низколегированная сталь марок 14Г2АФ, 16Г2АФ, 09Г2С, 10Г2С1, 15Г2СФ, 14Г2АФД, 12Г2СМФ по коррозионной стойкости близка к углеродистой стали. К защите от коррозии конструкций из стали перечисленных марок предъявляются те же требования, что и к защите конструкций из углеродистой стали.

Повышенной коррозионной стойкостью обладает низколегированная сталь марок 10ХСНД, 15ХСНД, 10ХНДП, 10ХДП, 12ХГДАФ, 08ХГСДП, причем последние четыре марки созданы специально как коррозионностойкие материалы для строительных конструкций. Эти стали целесообразно применять без защиты от коррозии для конструкций, не имеющих нахлесточных соединений, эксплуатируемых на открытом воздухе в слабоагрессивной среде, поскольку на их поверхности образуется плотный слой продуктов коррозии (после 1–3 лет эксплуатации).

В элементах несущих конструкций из стали марки 10ХНДП с толщиной стенки не менее 5 мм, не подлежащих защите от коррозии, очистка поверхности от прокатной окалины не является обязательной.

Сталь марок 10ХСНД и 15ХСНД при атмосферной коррозии практически во всех слабо- и среднеагрессивных средах в 1,5–3 раза более коррозионностойка, чем углеродистая сталь. Поэтому конструкции из стали этих марок, эксплуатируемые на открытом воздухе в сухой зоне влажности при концентрации агрессивных газов по группе А, можно применять без защиты от коррозии. Требования к очистке поверхности стали остаются теми же, что и для стали марки 10ХНДП. В более агрессивных средах на открытом воздухе, а также в агрессивных средах внутри помещений сталь повышенной коррозионной стойкости должна быть защищена от коррозии. Долговечность лакокрасочных покрытий на поверхности стали повышенной коррозионной стойкости по крайней мере в 1,5 раза больше, чем на поверхности углеродистой стали.

Пониженной по сравнению с углеродистой сталью коррозионной стойкостью в атмосфере с серосодержащими газами и в жидких средах обладает марганцовистая сталь марок 09Г2, 14Г2, а также сталь 18Г2АФпс. К защите от коррозии конструкций из стали этих марок предъявляются такие же требования, как и к защите конструкций из углеродистой стали. Тем не менее конструкции из стали пониженной

[1] Здесь и далее под агрессивными средами следует понимать среды со слабо-, средне- и сильноагрессивной степенями воздействия.

коррозионной стойкости главой СНиП 2.03.11-85 не допускаются в средах с повышенным содержанием сернистого ангидрида и сероводорода (по группам газов Б–Г), поскольку даже под защитными лакокрасочными покрытиями будет протекать избирательная коррозия по включениям сульфида марганца, ускоряющая потерю несущей способности конструкций. Сталь марок 15Г2СФ, 14Г2АФ, 16Г2АФ и18Г2АФпс менее подвержена язвенной коррозии, чем марганцовистая или кремнемарганцовитсая стали, и на эти марки не распространяются ограничения по применению.

10.3. Влияние напряжений на коррозию стальных строительных конструкций

Внутренние и рабочие напряжения практически не влияют на скорость равномерной коррозии материалов конструкций. Исключение составляет коррозия в кислых (pH ниже 3) сильноагрессивных жидких средах, постоянному воздействию которых строительные конструкции подвергаться не должны. Однако воздействие некоторых рабочих сред может изменять характер коррозии стали в напряженном состоянии и вызывать коррозионное растрескивание. Снижение уровня рабочих напряжений обычно замедляет процесс коррозионного растрескивания, но эта мера требует увеличения расхода металла и ухудшает технологические параметры. В приводимых далее примерах рассмотрены другие пути предотвращения коррозионного растрескивания конструкций.

Примерами коррозионного растрескивания стали в щелочной среде могут служить случаи разрушения декомпозеров и воздухонагревателей доменных печей. В декомпозерах технологический процесс происходит в щелочной среде. Внутренняя поверхность кожухов воздухонагревателей подвергается воздействию конденсата, в котором могут быть растворены щелочные составляющие, содержащиеся в рудной пыли при производстве ферромарганца. Щелочному охрупчиванию подвержена углеродистая и низколегированная сталь всех марок. Этот процесс происходит при температуре выше 40–50°С. Трещины зарождаются на участках максимальных сварочных напряжений и распространяются межкристаллитно по основному металлу.

Поскольку в щелочных средах конструкции обычно не защищают от общей коррозии, для повышения их устойчивости против коррозионного растрескивания необходимо применять сталь как можно более чистую по неметаллическим включениям, в частности, углеродистую сталь спокойных марок, а также выносить монтажные сварные швы из зоны непосредственного воздействия жидких щелочных сред или возможного образования щелочного конденсата. В этих зонах не допускаются технологические приварки на монтаже; заводские сварные швы следует отжигать в термических печах при температуре 650°С для снятия сварочных напряжений.

В ряде сред немодифицированная марганцовистая сталь корродирует с развитием глубоких язв, которые в зонах концентрации напряжений могут переходить в межкристаллитные трещины коррозионной усталости или коррозионного растрескивания. Эти виды разрушения особенно характерны для листовых конструкций и конструкций типа сосудов со стыковой сваркой.

Относительное влияние агрессивной среды на выносливость конструкций снижается с усложнением формы элемента или соединения, т.е. с ростом концентрации напряжений. Для защиты скрубберов от коррозии помимо применения стали, не склонной к местной коррозии, целесообразно использовать защитные металлизационно-лакокрасочные покрытия или снижать агрессивность воды.

Роль статических и циклических напряжений, действующих на конструкции, существенно возрастает с повышением прочности стали. При одновременном воздействии напряжений растяжения и агрессивной внешней среды элементы конструкций из термически упрочненной стали могут подвергаться разрушению вследствие водородного охрупчивания, коррозионного растрескивания или коррозионной усталости.

Водородное охрупчивание высокопрочной стали происходит даже при атмосферной коррозии, если в воздухе содержатся агрессивные газы SO_2, H_2S, HCl, HF в концентрации по группам Б–Г. Степень охрупчивания иногда не настолько велика, чтобы привести к самопроизвольному разрушению статически нагруженных элементов конструкций, но заметно снижает сопротивление динамическим нагрузкам и пластичность строительной стали с прочностью до 700 МПа и более высокой прочности (высокопрочные болты, канаты и т.п.). Пластическая деформация (до 2 %) увеличивает склонность этих сталей к водородному охрупчиванию.

Для предотвращения коррозионного растрескивания высокопрочных болтов необходимо выполнять следующие требования. По окончании монтажа конструкции вместе с выступающими частями высокопрочных болтов должны быть окрашены. Кроме того должна быть обеспечена герметизация соединений на высокопрочных болтах.

В слабоагрессивной среде допускается применение высокопрочных болтов из стали марок 40Х, 40ХФА, 30ХЗМФ и 30Х2НМФ без дополнительной защиты от коррозии, а лишь с окраской конструкций и выступающих частей болтов после монтажа. Однако предотвращение коррозионного растрескивания высокопрочных болтов обеспечивается лишь при условии точного соответствия химического состава требованиям ГОСТ 4543–71, соблюдения режимов термической обработки болтов и указаний по производству монтажа соединений.

У высокопрочных болтов склонность к коррозионному растрескиванию после проведения соответствующей термообработки, хотя и уменьшается, но полностью не устраняется. Кроме того в процессе эксплуатации болты без защитных покрытий начнут корродировать, при этом может дополнительно происходить процесс наводороживания, и вероятность растрескивания болтов увеличивается. В средне- и сильноагрессивных средах высокопрочные болты должны быть защищены от коррозии металлическими покрытиями до монтажа.

Для защиты болтов от коррозии применяются главным образом цинковые металлические покрытия, которые наносятся различными методами. Однако необходимо учитывать, что при нанесении гальванических покрытий будет наблюдаться наводороживание металла и увеличение склонности болтов к коррозионному растрескиванию. Болты с гальваническим покрытием обязательно должны быть подвергнуты обезводороживающему отпуску.

Защита от коррозии стали цинком, осажденным из расплава (горячий метод), когда создается цинковое покрытие толщиной 40–80 мкм, не наводороживает сталь, но при этом толстые покрытия могут перекрывать допуск на размеры и появится затруднение при свинчивании болта и гайки.

Оптимальным методом нанесения защитных металлических покрытий на высокопрочные болты является термодиффузионный процесс насыщения поверхности болта. Процесс термодиффузионного обогащения поверхности болта цинком изменяет структуру поверхностного слоя металла и удаляет из стали водород, оба эти фактора способствуют предотвращению коррозионного растрескивания. Общая коррозионная стойкость высокопрочных болтов с термодиффузионным цинковым покрытием по сравнению с цинковым гальваническим покрытием при одинаковых

толщинах повышается в несколько раз за счет более высокой коррозионной стойкости, образовавшейся в поверхностном слое δ-фазы ($FeZn_7$).

Термодиффузионное покрытие цинком, не изменяя механических свойств стали, полностью предотвращает коррозионное растрескивание болтов из высокопрочных сталей марок 38ХС, 40Х2Ф, 40Х.

10.4. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов

Наиболее высокой коррозионной стойкостью в слабо- и среднеагрессивных средах обладают технический алюминий АД1, сплав системы алюминий – марганец АМц и сплавы системы алюминий – магний АМг1, АМг2, АМг3, АМг4. Поэтому конструкции из рекомендованных СНиП 2.03-06-85 термически неупрочняемых сплавов АД1М, АМцМ и АМг2М допускается применять без защиты от коррозии не только в слабоагрессивных, но и в среднеагрессивных средах (листовые ограждающие конструкции по табл.38 СНиП 2.03.11-85).

В средах, содержащих хлористые соли, газообразный хлор или хлористый водород по группам А и Б, наиболее высокой коррозионной стойкостью обладают сплавы системы алюминий – магний. Нагартовка сплавов этой системы не снижает их коррозионной стойкости, поэтому сплав АМг2Н2 в слабоагрессивных средах обычно также применяется без защиты от коррозии. Другие сплавы алюминия с магнием в строительных конструкциях применяются ограниченно, особенно сплавы, содержащие более 5 % магния, поскольку в нагартованном состоянии последние приобретают склонность к межкристаллитной коррозии после длительных (свыше 3000 ч) нагревов до температуры 60–70°С.

Коррозионная стойкость сплавов системы алюминий – магний – кремний снижается в следующем порядке: АД35, АД31, АД33, АВ. Сплав АВ содержит 0,2–0,6 % меди и в состоянии после искусственного старения приобретает склонность к межкристаллитной коррозии. Искусственное старение сплава АД31 незначительно снижает его коррозионную стойкость по сравнению с состоянием после естественного старения. Ограждающие конструкции из сплавов АД31Т и АД31Т1 можно применять без защиты от коррозии в слабоагрессивных средах.

С повышением прочности сплавов алюминия и увеличением расчетных нагрузок или внутренних напряжений, связанных с нагартовкой или сваркой, возрастает опасность потери несущей способности конструкций в результате язвенной или расслаивающей коррозии, а также коррозионного растрескивания. Поэтому к защите от коррозии несущих конструкций из алюминиевых сплавов при эксплуатации их в средах, содержащих хлор, хлористый водород или фтористый водород по группе газов Б, предъявляются более жесткие требования. Эти конструкции должны быть защищены электрохимическим анодированием уже при слабоагрессивной степени воздействия среды.

Особое внимание должно быть уделено высокопрочным свариваемым сплавам системы алюминий – цинк – магний (01915, 01920 и 01925). Хотя по сопротивлению общей коррозии они и относятся к числу стойких, но в состоянии после естественного старения, в том числе в зоне термического влияния после сварки, подвергаются расслаивающей коррозии.

В агрессивных средах сплавы этой системы и их сварные соединения после естественного старения могут проявить склонность к коррозионному растрескиванию. Анодная пленка толщиной 15–20 мкм не обеспечивает достаточной защиты от этого вида коррозии. Скорость роста трещин, как и склонность к их образованию, заметно повышается при переходе от слабоагрессивной к среднеагрессивной степени воздействия среды и снижается при переходе от сплава 01920Т и сварных

соединений, полученных с использованием проволоки В92св, к сплаву 01915Т. Этот сплав и его сварные соединения, полученные с использованием проволоки 01557 (системы Al–Mg), в состоянии естественного старения не подвергаются коррозионному растрескиванию в слабоагрессивных средах даже в случае образования сварочных трещин или других острых концентраторов напряжений.

ГЛАВА 11

ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКТИВНОЙ ФОРМЕ ДЛЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ КОНТАКТНОЙ КОРРОЗИИ

Металлические конструкции для зданий с агрессивными средами и сооружений на открытом воздухе следует проектировать такой формы, которая исключала бы возможность скопления на поверхности элементов конструкций атмосферной влаги, конденсата, производственной пыли и жидких агрессивных сред и не затрудняла бы их удаление. Необходимо предотвращать образование застойных мест в виде пазух, карманов, узких щелей и т.п. Элементы и соединения металлических конструкций должны иметь свободный доступ для осмотров и возобновления защитных покрытий.

Металлические конструкции зданий и сооружений для производств с агрессивными средами следует проектировать из профилей с меньшим периметром при площади сечения, требуемой по расчету несущей способности. Конструктивные решения должны предусматривать принцип концентрации материала и уменьшения общей поверхности конструкций с полным использованием их несущей способности путем увеличения пролетов и шагов до 12 м и более. Для сильноагрессивных сред конструкции зданий следует проектировать преимущественно сплошностенчатыми, а не решетчатыми.

При выборе конструктивных форм элементов конструкций в агрессивных средах необходимо учитывать влияние профиля элементов и расположения их в пространстве на продолжительность сохранения на их поверхности влаги (атмосферных осадков или конденсата) и накопления пыли, а следовательно, на скорость коррозии и разрушение защитных покрытий. В среднеагрессивных и сильноагрессивных средах листовой и профильный прокат с плоскими гранями и развитой поверхностью применяют преимущественно для конструктивных элементов, расположенных наклонно или вертикально. Примерами удачных конструктивных решений, удовлетворяющих этим требованиям, могут служить фермы с элементами из труб или замкнутых прямоугольных профилей.

Для металлических конструкций в средне и сильноагрессивных средах не следует применять тавровые сечения из двух спаренных уголков, крестовые сечения из четырех уголков, незамкнутые коробчатые или двутавровые сечения из двух швеллеров и гнутого профиля.

Конструкции из стали и алюминиевых сплавов для агрессивных сред должны преимущественно применяться в виде сварного профиля замкнутого сечения и труб. Однако применение внутри помещений с агрессивными средами конструкций из стальных элементов замкнутого сечения без защиты внутренней поверхности от коррозии допускается только при условии заделки торцов.

Для конструкций сооружений на открытом воздухе в слабоагрессивной среде допускается применение сечений в виде труб и замкнутого профиля без проверки

их герметичности, но при обязательном условии, что исключено попадание атмосферных осадков внутрь элементов и обеспечен дренаж. Влага внутри таких элементов конденсируется очень редко из-за запаздывания изменений температурно-влажностного режима, и среда внутри элементов имеет неагрессивную степень воздействия (скорость коррозии углеродистой стали не достигает 0,01 мм/год).

Влияние формы, расположения в пространстве и размера щелей, возникающих в узлах, на характер протекания коррозии на открытом воздухе в слабоагрессивной среде иллюстрируется на примере стальных конструкций радиобашни системы Шухова после многолетней (50 лет) эксплуатации. Как показало обследование наиболее вероятно возникновение коррозии между элементами в узлах, где щели расположены горизонтально, что затрудняет вымывание загрязнений дождевой водой. В щелях, расположенных наклонно или вертикально, повышенная скорость коррозии по сравнению со скоростью коррозии основной поверхности наблюдается лишь при содержании сернистого газа или сероводорода в атмосфере выше концентраций по группе А. Коррозия внутренних поверхностей элементов в двухзаклепочных соединениях возрастает с увеличением расстояния между заклепками от 30 до 75 мм; при дальнейшем увеличении этого расстояния до 140 мм она снижается, благодаря более легкому вымыванию загрязнений, и вновь несколько возрастает при увеличении расстояния между заклепками или болтами до 190 мм.

В жестких стыках коррозия не возникает при расстоянии между болтами или заклепками до 120 мм, а при увеличении этого расстояния, особенно до 200–650 мм, постепенно возрастает. Степень ускорения коррозии зависит от толщины стенок элементов, с уменьшением которой облегчается расклинивающее действие продуктов коррозии. Отдельные элементы конструкций из уголка с толщиной стенки 8–10 мм подвергаются значительной деформации продуктами коррозии.

Таким образом, степень опасности коррозии сопряженных элементов определяется еще и жесткостью стыка: чем выше жесткость стыка (толщина элемента и число заклепок), тем большим может быть расстояние между заклепками или болтами, при котором коррозия не возникает; следует рекомендовать для слабоагрессивной среды расстояние между крепежом не более 400 мм, а для средне- и сильноагрессивной среды – 200 и 120 мм соответственно. В этом отношении болтовые соединения и особенно соединения на высокопрочных болтах более устойчивы против коррозии в щелях, чем заклепочные. В соединениях на высокопрочных болтах положительно сказывается роль больших усилий, направленных нормально толщине элемента.

В местах соединения фасонок со стойками или опорными кольцами коррозия возникает уже при расстоянии между заклепками 60–100 мм. Значительная площадь фасонок способствует накоплению пыли в стыках и препятствует омыванию их дождевой водой. Наибольшая скорость коррозии элементов в подобных узлах наблюдается в случаях, когда образуются трехмерные полости. Так, в узлах, находящихся у самой поверхности земли, зазоры заполняются снегом, и во время оттепели в них застаивается талая вода, что увеличивает фактическую продолжительность коррозии. Это явление характерно также для сварных и болтовых узлов конструкций на открытом воздухе. Поэтому подобные узлы на уровне земли целесообразно замоноличивать в бетон на высоту снежного покрова, а на большой высоте – располагать в вертикальной плоскости.

Одноэтажные отапливаемые здания, в которых применяют легкие несущие металлические конструкции, должны проектироваться для производств с неагрессивными и слабоагрессивными средами, а для производств со среднеагрессивными

средами – только при условии, если обеспечена долговременная защита конструкций (см. табл.10.1). Это требование вызвано тем, что невозможно обеспечить полную защиту конструкций лакокрасочными покрытиями на достаточно длительный период эксплуатации.

Ограждающие конструкции в виде металлических или комбинированных панелей для отапливаемых зданий следует проектировать с таким расчетом, чтобы в холодные периоды года было предотвращено образование конденсата на внутренней поверхности панелей и на несущих конструкциях, а также обеспечена возможность систематического удаления пыли и грязи с поверхности конструкций.

При проектировании конструкций из разнородных металлов или сплавов необходимо избегать решений, при которых может возникнуть контактная коррозия. В атмосферных условиях резкое ускорение коррозии конструкций из стали и алюминия независимо от способа их защиты, как правило, происходит только при контакте с медью. Такой контакт предотвращают применением неметаллических (паронитовых и т.п.) прокладок между элементами конструкций и медными деталями. Нельзя допустить, чтобы дождевая вода с поверхности медных деталей стекала на поверхность конструкций из алюминия, алюминированной или оцинкованной стали.

В сопряжениях элементов конструкций из углеродистой или низколегированной стали с конструкциями, покрытыми цинком или алюминием с толщиной слоя более 40 мкм, не требуется дополнительной защиты, сверх необходимой для данной степени агрессивного воздействия среды. Однако при проектировании конструкций из стали повышенной коррозионной стойкости, сопряженных с оцинкованными, алюминированными конструкциями или алюминием, необходимо учитывать, что до того, как на поверхности стали марок 10ХСНД 10ХНДП или 15ХСНД полностью сформируется защитный слой продуктов, дождевая вода, стекающая с конструкций, может загрязнять алюминий, алюминиевые и цинковые покрытия, равно как и бетон, кирпич, другие неметаллические материалы, не оказывая значительного агрессивного воздействия. Для предотвращения загрязнений обеспечивают отвод дождевой и талой воды.

Если на конструкции воздействуют средне- или сильноагрессивные жидкие среды, то в зависимости от природы среды определенную опасность может представлять контакт элементов конструкций с нержавеющей сталью, сплавами титана, а также контакты алюминия со сталью повышенной коррозионной стойкости и некоторых сплавов алюминия между собой.

Опасность контактной коррозии в жидких средах возникает и в случае неоправданного назначения материалов для сварки конструкций. Так, контактная коррозия сварного соединения в среднеагрессивной жидкой среде наблюдается, например, когда сталь состава (% по массе): 0,16 C; 0,50 Si; 1,42 Mn; 0,013 P; 0,016 S; 0,045 Al; 0,044 Nb сваривали с применением электродной проволоки состава (% по массе): 0,08 C; 0,25 Si; 0,8 Mn; 0,4 Ni; 0,6 Cu с более высокой коррозионной стойкостью, т.е. металл шва обладал значительно большей коррозионной стойкостью, чем основной металл.

Возможное возникновение контактной коррозии между швом и основным металлом необходимо предотвращать выбором соответствующих электродов для ручной сварки низколегированной стали (таблица 11.1), которые обеспечивают равную коррозионную стойкость металла шва и основного металла из более широкой номенклатуры электродов, рекомендованной СНиП. В этом случае проволока для автоматической и полуавтоматической сварки конструкций имеет состав, возможно близкий к составу стали, для сварки которой она предназначена.

Таблица 11.1 Материалы для сварки конструкций из низколегированной стали, при которых контактная коррозия минимальна

Степень агрессивного воздействия среды	Сталь марки	Марка электродов для ручной сварки конструкций*
Слабо-, средне-, сильноагрессивная	10ХСНД 15ХСНД	Э 138-50 Н**, АН-Х7, ВСН-3, Э 138-45 Н
	10ХНДП 12ХГДАФ 08ХГСДП	Электроды типа Э50А марки 03С-18 и электроды марки ДСК-50к
Средне-, сильноагрессивная	15Г2СФ 14Г2АФ 16Г2АФ 18Г2АФпс	УОНИ 13/65 УОНИ 13/55

* 1. Для автоматической сварки стали марок 10ХНДП, 12ХГДАФ, 08ХГСДП под слоем флюса рекомендуется применять сварочную проволоку марки Св-08Х1ДЮ по ТУ 14-1-1148-75 в сочетании с флюсом марки АН-348А по ГОСТ 9087-81*Е. 2. Механизированную сварку в среде CO_2 рекомендуется выполнять сварочной проволокой марки Св-08ХГ2СДЮ по ТУ 14-1-3665-83 в углекислом газе по ГОСТ 8050-85. 3. Полуавтоматическую сварку самозащитной проволокой рекомендуется выполнять сварочной проволокой ППВ-5к по ТУ 36-2528-83.

** Только для стали марки 10ХСНД.

При выборе материалов для сварки несущих конструкций из стали повышенной коррозионной стойкости в условиях эксплуатации их без защиты от коррозии необходимо учитывать внутренние напряжения в зоне термического влияния (ЗТВ). В случае сварки стали марки 10ХНДП даже при применении электродной проволоки с составом, близким к составу стали, могут возникать напряжения, нарушающие адгезию продуктов коррозии к металлу шва и ЗТВ. Минимальные внутренние напряжения создаются при использовании проволоки марки Св08Х1ДЮ для автоматической сварки.

Конструкции, эксплуатирующиеся в сильноагрессивных средах, должны иметь сплошные сварные швы. Угловые сварные швы должны быть проварены с обеих сторон.

Существенное влияние на коррозионную стойкость стали, алюминия и защитных металлических покрытий может оказать контакт с неметаллическими материалами, способствующими неблагоприятному изменению pH среды. Поэтому для конструкций промышленных зданий, связанных с производством или применением в технологических процессах твердой щелочи, соды или других солей со щелочной реакцией, которые могут входить в состав пыли в этих цехах, не допускается применение алюминиевых сплавов и оцинкованной стали, а также металлических защитных покрытий, даже при условии дополнительной их защиты лакокрасочными покрытиями.

Перечисленные материалы не следует также применять в агрессивных средах при возможном воздействии металлической (или соединений металлов) пыли, вызывающей контактную коррозию, если в ней содержатся медь, никель, сульфиды, хлориды этих металлов, другие тяжелые, благородные или полублагородные металлы. При относительной влажности воздуха помещений выше 75 % и в условиях конденсации влаги графит, коксовая и угольная крошка, также образуют электрохимические пары с цинком и алюминием.

Неблагоприятные по отношению к алюминию значения pH имеют незатвердевшие раствор и бетон. Поэтому главой СНиП 2.03.11-85 предъявляются повышенные требования к защите от коррозии конструкций из алюминия, примыкающих к кирпичным, бетонным и железобетонным конструкциям.

ГЛАВА 12

ЗАЩИТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ОТ КОРРОЗИИ

Защита стальных и алюминиевых конструкций от коррозии может производиться специальными покрытиями или электрохимическими методами.

12.1. Защитные покрытия

По виду материалов защитные покрытия для строительных металлических конструкций могут быть классифицированы как лакокрасочные, металлические, оксидные, изоляционные. Возможны комбинации различных видов покрытий. По механизму защитного действия покрытия могут быть классифицированы как барьерные, т.е. обеспечивающие только изоляцию, протекторные и с комбинированным барьерно-протекторным действием. Применение преобразователей и модификаторов ржавчины как правило недопустимо.

Лакокрасочные покрытия в зависимости от вида пигмента обеспечивают барьерную, комбинированную или протекторную (электрохимическую) защиту стали. Цинковые защитные покрытия стальных конструкций обеспечивают как протекторную, так и барьерную защиту от коррозии; алюминиевые – обычно только барьерную, а в присутствии хлористых солей или хлора – также и протекторную.

Защита конструкций из алюминиевых сплавов выполняется с помощью искусственно создаваемого на их поверхности (химическим или электрохимическим способом) естественного окисного слоя, который обеспечивает барьерную защиту металла от окружающей среды. Изоляционные покрытия выполняются из тканевых материалов, пропитываемых битумно-резиновыми мастиками, или из полимерных пленок, приклеиваемых к металлической поверхности, и применяются для защиты тонкого листа или гидроизоляции конструкций в грунте.

Нанесению лакокрасочных или металлических защитных покрытий должна предшествовать соответствующая подготовка поверхности конструкций; цель подготовки поверхности – удаление прокатной окалины, продуктов коррозии, жировых и других загрязнений и придание поверхности шероховатости, улучшающей сцепление с ней защитного покрытия.

12.2. Подготовка поверхности стальных конструкций перед нанесением защитных покрытий

На заводах металлических конструкций применяются следующие основные методы подготовки поверхности проката или конструкций, покрытых продуктами коррозии (окалиной или ржавчиной), независимо от степени окисленности и зажиренности поверхности по ГОСТ 9.402-80*:

- *механические*: обработка сухим абразивом (дробеструйная, дробеметная, металлическим песком); обработка механизированным инструментом (проволочными щетками, шлифовальными машинками, иглофрезами);
- *химические*: обезжиривание в водных щелочных растворах; обезжиривание в органических растворителях; травление в кислотах.

Подготовка поверхности может производиться:

- на механизированных и автоматизированных технологических линиях очистки проката механическими или химическими методами с последующей консервацией поверхности на время изготовления конструкций; консервирующие покрытия не должны препятствовать сварке и в дальнейшем входить в систему лакокрасочного покрытия (грунтовки ВЛ-02, ВЛ-023, ЭФ-0121 и т.п.); после сварки конструкций в этом случае необходимо производить зачистку сварных швов и околошовной зоны под грунтование; очистка проката абразивом производится и перед нанесением металлизационных покрытий;
- в тупиковых камерах дробеструйной очистки или в ваннах травления элементов и конструктивных отправочных марок после их сборки и сварки; подготовка поверхности готовых конструкций и отправочных марок на механизированных технологических линиях целесообразна только при условии достаточной повторяемости конфигураций и габаритов, а также доступности всей поверхности для обработки.

Кислотное травление допускается для собранных конструкций лишь при условии отсутствия карманов и зазоров, в которых может остаться электролит, и не допускается для конструкций из стали 600 МПа и более высокой прочности. Кислотное травление на ЗМК рекомендуется как метод подготовки поверхности стальных конструкций под нанесение металлических (цинковых, алюминиевых) покрытий методом погружения в расплав. Сварные конструкции должны иметь в основном стыковые или угловые соединения. Нахлесточные соединения должны производиться только лобовыми или только фланговыми швами при гарантированном зазоре между элементами не менее 1,5 мм или при сплошной обварке по контуру.

Травление с последующим пассивированием, как и обработка сухим абразивом – дробеструйным или дробеметным методами, обеспечивает вторую и третью степени очистки поверхности по ГОСТ 9.402-80; обработка механизированным инструментом допускается при малых объемах работ (зачистка сварных швов, местное удаление продуктов коррозии) обеспечивает при этом третью степень очистки. Главой СНиП 2.03.11-85 эта степень очистки поверхности допускается только для конструкций, эксплуатируемых в слабоагрессивных и неагрессивных средах.

Очистка ручными щетками поверхности конструкций, покрытой прокатной окалиной или толстым слоем ржавчины, не обеспечивает степени очистки свыше четвертой и может быть допущена только для конструкций, предназначенных для эксплуатации в неагрессивных средах. Полное удаление продуктов коррозии почти в 5 раз увеличивает срок службы лакокрасочных покрытий (табл.12.1).

Таблица 12.1. Влияние метода подготовки поверхности стального проката на долговечность лакокрасочных покрытий в слабоагрессивной среде на открытом воздухе

Методы подготовки поверхности под окраску	Срок службы покрытия, год	
	двухслойного	четырехслойного
Очистка сухим абразивом	Св. 6	Св. 10
Травление	Св. 4	Св. 9
Очистка ручными металлическими щетками	Св. 1	Св. 2

Очистка от окислов поверхности рулонных материалов (тонколистовая оцинкованная сталь, алюминий) перед нанесением полимерных покрытий в заводских условиях производится специальными методами. Легкий налет продуктов корро-

зии, который может быть на поверхности листа, снимается дисковыми щетками из нетканого материала с вкраплениями абразива. За удалением продуктов коррозии следует промывка.

Обезжиривание конструкций перед окрашиванием, как правило, производится в тех случаях, когда металл не покрыт толстыми слоями окалины или ржавчины (холоднокатная сталь, алюминий) или когда прокат уже защищен металлическими покрытиями, консервационными смазками, межоперационными или консервационными грунтовками (оцинкованная сталь, канаты, очищенный и законсервированный прокат). Зажиренные участки в этих случаях очищают органическими растворителями, которые не разрушают уже имеющееся защитное покрытие. Исключение составляют случаи, когда необходимо обезжиривание поверхности, зажиренной до первой или второй степеней (ГОСТ 9.402-80), а также перед очисткой от ржавчины ручным или механизированным инструментом или перед кислотным травлением.

В тех случаях, когда подготовка поверхности и нанесение покрытий выполняются полностью на монтажных площадках, например, при защите от коррозии рулонируемых конструкций негабаритных резервуаров, очищать поверхности от окислов необходимо сухим абразивом.

12.3. Защита стальных строительных конструкций от коррозии металлическими покрытиями

12.3.1. Горячее цинкование и алюминирование. Процесс нанесения покрытия основан на погружении сварных конструкций или проката в расплавленный металл. Толщина покрытия на конструкциях из толстолистового или профильного проката колеблется в широких пределах (60–200 мкм) и зависит от продолжительности нанесения покрытий, состава ванны, температуры расплавленного металла или сплава, конструктивной формы и скорости извлечения конструкции из ванны. Процесс отличается простотой технологии и высокой производительностью.

Возможные ограничения в применении горячего цинкования или алюминирования связаны: с габаритами ванн (в настоящее время глубина вертикальных ванн для цинкования в РФ достигает 7 м, размеры зеркала ванны – до 2×2 м). Более перспективны горизонтальные ванны, длина которых может достигать 20 м. Однако следует считаться с возможным короблением при нагреве тонкостенных конструкций и с невозможностью получить качественное покрытие в нахлесточных соединениях, если не обеспечен зазор между элементами не менее 1,5 мм или не выполнена обварка по контуру.

12.3.2. Металлизационные покрытия могут быть нанесены как на технологических линиях в заводских условиях, так и на монтажных площадках. Процесс заключается в распылении расплавленного металла на очищенную от окислов поверхность проката или конструкций. Скорость коррозии металлизационных покрытий выше, чем скорость коррозии покрытий из соответствующего металла, полученных методом погружения в расплав, а расход металла несколько больше. Поэтому металлизационные покрытия рекомендуется применять для конструкций, которые нетехнологично защищать методом погружения в расплав. Металлизация готовых решетчатых конструкций вообще нецелесообразна из-за непроизводительных потерь металла.

При малых толщинах металлизационное покрытие пористое и требует дополнительной пропитки, а получение толстых слоев (150–300 мкм) при ручном нанесении покрытия – длительный процесс, поэтому желательна механизация работ на линиях. Эффективность металлизации труб и листовых конструкций на линиях по

расходу материалов и производительности труда сопоставима с эффективностью горячего цинкования или алюминирования.

Преимущества металлизационных покрытий, наносимых распылением, по сравнению с покрытиями, полученными погружением в расплав, следующие:

- можно получать практически любую заданную толщину, в связи с чем целесообразно применять относительно тонкие металлизационные покрытия как подслой под лакокрасочное покрытие для конструкций, эксплуатируемых в средне- или сильноагрессивных средах;
- покрытия можно наносить на конструкции любых габаритов, в том числе после монтажа;
- можно получать металлизационные покрытия заданного состава, например алюминий с цинком (псевдосплав).

12.3.3. Гальванические покрытия. Гальваническим методом наносят на поверхность стали цинковые, кадмиевые, хромовые и другие металлические покрытия. Гальванические покрытия получают осаждением металлов из растворов или расплавов солей под действием электрического тока на поверхности защищаемых изделий. Метод применяется для защиты относительно мелких деталей. Толщина гальванического покрытия в зависимости от материала покрытия обычно не превышает 20 мкм. Заданную толщину покрытия можно регулировать с точностью до нескольких микрон.

12.4. Защита от коррозии стальных и алюминиевых конструкций лакокрасочными материалами

Лакокрасочное покрытие в большинстве случаев состоит из грунтовочных и покрывных слоев. Грунтовочные слои (первые слои лакокрасочного покрытия, наносимые непосредственно на защищаемую поверхность) обеспечивают адгезию всего покрытия, в некоторых случаях – протекторную защиту стали, а при современной технологии производства – полную защиту конструкций на период транспортировки, хранения и монтажа (в среднем 6 мес.). Состав грунтовки определяется материалом защищаемой поверхности (сталь, оцинкованная сталь, алюминиевые сплавы) и качеством подготовки поверхности с учетом степени агрессивного воздействия среды, в которой эксплуатируются конструкции. Покровные слои обеспечивают барьерную защиту и непроницаемость всей системы покрытия для внешней среды, а также придают конструкциям хороший внешний вид. При выборе грунтовок и покрывных материалов, составляющих систему лакокрасочного покрытия, должна быть предусмотрена их совместимость, т.е. адгезия между покрывными материалами и данной грунтовкой.

Лакокрасочные материалы наносят пневматическим или безвоздушным распылением, струйным обливом, окунанием, кистью. На ЗМК целесообразно бóльшую часть слоев покрытия наносить на технологических линиях; на монтажной площадке в этом случае наносят только последний слой. Если же заводы выполняют только грунтование конструкций в один-два слоя, то для повышения защитной способности покрытия необходимо увеличивать общее число слоев (табл.12.2).

Производительность труда может быть значительно повышена, благодаря использованию тиксотропных материалов, при нанесении которых в два слоя можно получить покрытие толщиной свыше 150 мкм. Тиксотропные покрытия наносят одним из наиболее прогрессивных методов – безвоздушным распылением. К перспективным лакокрасочным материалам относятся также водорастворимые и

Таблица 12.2. Группы и толщины лакокрасочных покрытий для защиты стальных конструкций от коррозии

Условия эксплуатации конструкций		Степень агрессивного воздействия среды	Группы лакокрасочных покрытий (римские цифры), индекс материала по таб.12.4 (буквы), число покрывных слоев (арабские цифры) и общая толщина лакокрасочного покрытия, включая грунтовку, мкм (в скобках), наносимые на поверхность			
			из углеродистой или низколегированной стали	из оцинкованной стали	с цинковым или алюминиевыми покрытиями (горячее цинкование или алюминирование)	с цинковым или алюминиевыми покрытиями (металлизация распылением)
Внутри отапливаемых помещений	Помещение с газами группы А	Слабоагрессивная Средне агрессивная	Iп-2(55)[1] IIа-4(110)	IIп-2(40)[2] По табл.12.3	Без лакокрасочного покрытия IIа-2(60)	 IIа-2(60)
	То же, группы Б–Г	Слабоагрессивная Среднеагрессивная Сильноагрессивная	IIIх-2(60) IIIх-4(110)[3] IVх-7(180)	IIIх-2(60)[2] По табл.12.3	Без лакокрасочного покрытия IIIх-4(110)	 IIIх-2(60) IVх-5(130)
На открытом воздухе, под навесом и в неотапливаемых зданиях	Газы группы А	Слабоагрессивная Среднеагрессивная	Iа-2(55)[4] IIIа-3(80)[3,4]	IIа-2(40)[2,4] По табл.12.3	Без лакокрасочного покрытия IIа,IIIа-2(60)[4]	 IIа,IIIа-2(60)[4]
	То же, В	Слабоагрессивная Среднеагрессивная Сильноагрессивная	IIа-2(55)[4] IIIа-3(80)[3] IVа-5(130)[3]	IIа-2(40)[2] По табл.12.3 –	Без лакокрасочного покрытия IIIа-2(60) –	 IIIа-2(60) IVа-3(80)
В жидких органических и неорганических средах[5]		Слабоагрессивная Среднеагрессивная Сильноагрессивная	II,III-3(80) IV-5(130) –	– – –	II,III-2(60) IV-3(80) Не применять	II,III-2(60) IV-3(80) IV-5(130)

Примечание. Соотношение грунтовых и покровных слоев в зависимости от агрессивности среды и условий их нанесения см. в СНиП 2.03.11-85.

[1] При относительной влажности воздуха выше 80% или в условиях конденсации влаги – IIа-2(40).

[2] При толщине цинкового покрытия 40 мкм – без лакокрасочного покрытия, при толщине 20 мкм допускается окраска через 8–10 лет после монтажа.

[3] При нанесении эмалей перхлорвиниловых и на сополимерах винилхлорида число слоев увеличивается на один, а толщина покрытия – на 20 мкм.

[4] Для защиты конструкций, находящихся под навесами, допускается применение лакокрасочных покрытий с индексом «ан» вместо индекса «а» (см. СНиП 2.03.11-85).

[5] Покрытия должны быть стойкими к воздействию конкретных сред.

водоэмульсионные грунтовки и эмали. Эти материалы могут быть нанесены любым из перечисленных выше методов и имеют существенное преимущество перед материалами на масляной или синтетической основе, связанное с пониженными токсичностью, взрыво- и пожароопасностью.

12.5. Защита стальных конструкций комбинированными металлизационно-лакокрасочными покрытиями

Характерные особенности металлизационных покрытий – развитая поверхность (шероховатость) и пористость обусловливают их способность резко повышать адгезию и долговечность лакокрасочных материалов. Учитывая, что толщину металлизационного подслоя и лакокрасочного слоя можно легко регулировать, эти покрытия рекомендуют для сред с повышенной степенью агрессивного воздействия (табл.12.3). Ограничения в использовании металлизационных покрытий (см. п.12.3.2) распространяются и на металлизационно-лакокрасочные покрытия.

12.6. Электрохимическая защита стальных конструкций

Электрохимическую защиту необходимо применять в жидких средах и грунтах, имеющих достаточно высокую удельную электропроводность. Катодная защита обеспечивается от внешнего источника, протекторная – контактом защищаемых конструкций со специальными протекторами из сплавов алюминия с цинком и магнием (АМЦ), алюминия с цинком (АЦ5), а также цинка или магния. Проект электрохимической защиты (расчет необходимого тока защиты, массы и числа протекторов или анодов, их расположение, методы контроля и т.д.) осуществляется специализированной организацией в соответствии с требованиями ГОСТ 9.602-89.

12.7. Проектирование защиты стальных конструкций от коррозии

Общие затраты на защиту конструкций от коррозии складываются из первоначальных затрат в процессе изготовления и монтажа конструкций и затрат на восстановление покрытий при эксплуатации зданий и сооружений. Поэтому при выборе способа защиты конструкций целесообразно учитывать приведенные затраты на все работы. В некоторых случаях для восстановления недолговечных покрытий необходимы длительные остановки производства, затраты на которые могут превысить стоимость ремонта. В табл.12.3 приведенные затраты на защиту конструкций от коррозии возрастают от поз. «а» к поз. «д»

Защита лакокрасочными материалами требует наибольших затрат в силу необходимости частого восстановления покрытия. Тем не менее эти покрытия применяются наиболее широко, в первую очередь, благодаря низким первоначальным затратам. Группа и толщина лакокрасочного покрытия приведены в табл.12.2, а рекомендуемые материалы в табл.12.4.

Выбор системы лакокрасочного покрытия производится следующим образом. Допустим, необходимо защищать несущие конструкции неотапливаемого здания в сухой зоне влажности при концентрации агрессивных газов по группе Б (см. табл.10.2) и наличии внутри здания малорастворимой пыли (см. табл.10.4). Степень агрессивного воздействия среды оценивается как слабоагрессивная (см. табл.10.3 и 10.5); по табл.12.3 необходимо назначить покрытие, состоящее из химически стойких материалов группы III: один-два слоя грунтовки и два слоя эмали. Затем по табл.12.4 находят соответствующую грунтовку, имеющую адгезию к стали, например ФЛ-ОЗК, и эмаль, совместимую с этой грунтовкой, например ХВ-124.

Таблица 12.3. Защита стальных конструкций от коррозии

Степень агрессивного воздействия среды на конструкции	Способ защиты от коррозии	
	несущих конструкций из углеродистой и низколегированной стали	ограждающих конструкций из оцинкованной стали
Неагрессивная	Лакокрасочные покрытия группы I без ограничения толщины слоя	Без защиты со стороны помещения при окрашивании битумом или лакокрасочными материалами со стороны утеплителя
Слабоагрессивная	а). Горячее цинкование или алюминирование б). Металлизационные покрытия (δ=120-250 мкм) в). Лакокрасочные покрытия групп I, II или III	Окрашивание – ОД-ХВ-221 или лакокрасочными материалами групп II или III нанесением на поточных линиях
Среднеагрессивная	а). Горячее цинкование или алюминирование с последующим нанесением лакокрасочных покрытий групп II или III б). Электрохимическая зашита (в жидких средах) в). Металлизиционные покрытия (δ=120-180 мкм) с последующим нанесением лакокрасочных покрытий групп II–IV г). Лакокрасочные покрытия групп II, III или IV д). Металлизационные покрытия (δ=200...250 мкм)*	Не допускается к применению
Сильноагрессивная	а). Металлизационные покрытия (δ=200...250 мкм) с последующим нанесением лакокрасочных покрытий группы IV б). Электрохимическая защита (в жидких средах) в). Лакокрасочные покрытия группы IV	–

Примечание. В среднеагрессивных и сильноагрессивных средах, содержащих сернистый ангидрид, сероводород и окислы азота по группам газов Б, В и П, защитные покрытия из алюминия обладают в 1,5–2 раза более высокой коррозионной стойкостью, чем покрытия из цинка.

* При металлизации алюминием δ=250...300 мкм.

12.8. Защитно-декоративная отделка алюминия

Электрохимическое анодирование на толщину 8–20 мкм применяют для защиты от коррозии в среднеагрессивных средах элементов клепаных конструкций из алюминия, а также для декоративной отделки конструкций, предназначенных для слабоагрессивных и неагрессивных сред. При эксплуатации конструкций в сильноагрессивных средах они должны быть дополнительно окрашены материалами группы IV по табл.12.4 при толщине слоя лакокрасочного покрытия не менее 70 мкм.

Таблица 12.4. Перечень возможных вариантов систем лакокрасочных покрытий для защиты стальных и алюминиевых конструкций

I. Для защиты от коррозии стальных строительных конструкций, эксплуатирующихся в условиях атмосферы открытого воздуха и внутри помещений

Системы лакокрасочных покрытий	
1. Грунтовка ГФ–021[1] ГОСТ 25129-82*	а). Эмаль ПФ-115[1], ГОСТ 6465-76* с изм. №1 б). ПФ-133[1], ГОСТ 926-82* в). ПФ-1126[1], ТУ 6-10-1540-78 г). Эмаль УРФ-1128[1], ТУ 6-10-1421-76 с изм. №1 д). Эмаль ПФ-188[1], ГОСТ 24784-81* е). Краска БТ-177[1], ОСТ 6-10-426-78 ж). Краски масляные густотертые для внутренних работ[1], ГОСТ 695-77 з). Краски масляные густотертые для наружных работ[1], ГОСТ 8292-85 и). Лак ПФ-170 с 10–15% алюминиевой пудры[1], ГОСТ 15907-70* с изм. №1 к). Эмаль НЦ-132[1], ГОСТ 6631-74*
2. Грунтовка ГФ-0119[1] ГОСТ 22348-86	Эмали “а–к” по п.1
3. Грунтовка ГФ-0163[1] ОСТ 6-10-409-77	Эмали “а–к” по п.1
4. Грунтовка ПФ-020[1] ГОСТ 18186-79	Эмали “а–к” по п.1
5. Грунтовка ГФ-017[1] ОСТ 6-10-428-79	Эмали “а–к” по п.1
6. Железный сурик густотертый на олифе[1] ГОСТ 8866-76	Эмали “а–к” по п.1
7. Грунтовка ПФ-0142[1] ТУ 6-10-1698-78	Эмаль ПФ-1126[1] ТУ 6-10-1540-78
8. Грунтовка УРФ-0106[1] ТУ 6-10-1424-76	Эмаль УРФ-1128[1] ТУ 6-10-1421-76
9. –	Эмаль ПФ-1189[1] ТУ 6-10-1710-78
10. –	ЭмальЭФ-1219[1], ТУ 6-10-1727-79
11. Грунтовка ГФ-021 ГОСТ 25129-82*	а). Эмаль ХВ-16[2], ТУ 6-10-1301-78 б). ЭмальХВ-113[2], ГОСТ 18374-79* в). Эмаль ХВ-110[2], ГОСТ 18374-79* г). Эмаль ХВ-124[2-3], ГОСТ 10144-89* с изм. №1 д). ЭмальХВ-125[2-3], ГОСТ 10144-89* с изм. №1 е). Эмаль ХС-119[2-3], ГОСТ 21824-76* ж). Эмаль ХВ-1100[3], ГОСТ 6393-73*

12. Грунтовка ГФ-0119[1], ГОСТ22348-86	Эмаль "а–ж" по п.11
13. ГрунтовкаГФ-0163[1], ОСТ 6-10-409-77	Эмаль "а–ж" по п.11
14. Грунтовка ПФ-020[1], ГОСТ 18186-79	Эмаль "а–ж" по п.11
15. ГрунтовкаФЛ-03К[2-3], ГОСТ 9109-81*	Эмаль "а–ж" по п.11
16. Грунтовка АК-070[2], ОСТ 6-10-401-76 с изм. № 2	Эмаль "а–ж" по п.11
17. Грунтовки ВЛ-02[2]+ФЛ-03К[2-3], ГОСТ 12707-77* + ГОСТ 9109-81*	Эмаль "а–ж" по п.11
18. Грунтовка ХС -010[3-4], ГОСТ 9355-71	а). Эмаль ХВ-1100[3], ГОСТ 6393-73* б). Эмаль ХВ-1120[3], ТУ 6-10-1227-77 в). Эмаль ХВ-124[2-3], ГОСТ 10144-89* с изм. №1 г). Эмаль ХВ-125[2-3], ГОСТ 10144-89* с изм. №1
19. Грунтовка ХС-068[3-4], ТУ 6-10-820-75 с изм. № 2	Эмаль "а–г" по п.18
20. Грунтовка ХС-059[3-4], ГОСТ 23494-79*	Эмаль "а–г" по п.18
21. Грунтовка ХВ-050[3-4], ОСТ 6-10-314-79	Эмаль "а–г" по п.18
22. Грунтовка ХС-010[3-4]	а). Эмаль ХВ-785 + лак ХВ-784[4], ГОСТ 7313-75* с изм. № 1 б). Эмаль ХС-759 + лак ХС-724[4], ГОСТ 23494-79* в). Эмаль ХС-710 + лак ХС-76[4] г). Эмаль ХС-717[3-4], ТУ 6-10-961-76 с изм.
23. Грунтовка ХС-068[3-4], ТУ 6-10-820-75 с изм. № 2	Эмаль "а–г" по п.22
24. Грунтовка ХС-059[3-4], ГОСТ 23494-79*	Эмаль "а–г" по п.22
25. Грунтовка ХВ-050[3-4], ОСТ 6-10-314-79	Эмаль "а–г" по п.22
26. Шпатлевка ЭП-0010[3-4], ГОСТ 10277-90	а). Эмаль ЭП-755[3], ТУ 6-10-117-75 б). Эмаль ЭП-773[3-4], ГОСТ 23143-83* в). Эмаль ЭП-1155[3], ТУ 6-10-1504-75 г). Эмаль ЭП-5116, ТУ 6-10-1369-78 с изм. №1 д). Эмаль ЭП-7105[4], ТУ 6-10-11-334-6-79
27. Грунтовка АК-069[2] или АК-070, ОСТ 6-10-401-76 с изм. № 2	а). Эмаль ЭП-140[3], ТУ 6-10-599-79 б). Эмаль ЭП-575[3-4], ТУ 6-10-1634-77 в). Эмаль ЭП-755[3], ТУ 6-10-117-75
28. Грунтовка ЭП-057[3-4], ТУ 6-10-1117-75 с изм. № 1	а). Эмаль ЭП-575[3-4], ТУ 6-10-1634-77 б). Эмаль ЭП-1155[3], ТУ 6-10-1504-75 в). Эмаль ЭП-5116[3-4], ТУ 6-10-1369-78 с изм. №1 г). Эмаль ЭП-7105[4], ТУ 6-10-11-334-6-79

II. Для защиты от коррозии стальных строительных конструкций, эксплуатирующихся в воде, а также в атмосфере с высокой влажностью

29. –	Краска КО-42[3], ТУ 6-10-1468-79
30. Грунтовка ХС-04	Эмаль ХС-558
31. Грунтовка ПС -0203[3], ТУ 51-33-019-80	а). Эмаль ПС-1184[3] б). Эмаль ПС-1186[3], ТУ 51-164-83
32. –	Эмаль ВЛ-515[2], ТУ 6-10-1052-75
33. Шпатлевка ЭП-0010[3-4], ГОСТ 10277-90	–
34. Грунтовка ЭП-057[3-4], ТУ 6-10-1117-75 и 23–26, 27 в–д, 29	Эмаль ХС-5132[3], ТУ 6-10-11-19-12-79

III. Для защиты от коррозии стальных строительных конструкций, подвергающихся воздействию масел, бензина, нефти и нефтепродуктов

35. –	Эмаль ФЛ-62[2], ТУ 6-10-11-308-6-79
36. Грунтовка ВЛ-02[2], ГОСТ 12707-77*	а). Эмаль ВЛ-515[2], ТУ 66-10-1052-75 б). Эмаль ЭП-755[3], ТУ 6-10-717-75 в). Эмаль ЭП-56[3], ТУ 6-10-1243-77
37. Грунтовка ЭП-057[3-4], ТУ 6-10-1117-75	а). Эмаль ХС-972[3], ТУ 6-10-11-1990-75 б). Эмаль ХС-5132[3], ТУ 6-10-11-19-12-79
38. Грунтовка ВЛ-023[2], ГОСТ 12707-77* или без грунтовки и 26 (а, б, г), 34	Эмаль ХС-717[3-4]

IV. Для защиты от коррозии стальных строительных конструкций, подвергающихся воздействию повышенных температур покрытия

39. –	Лаки ПФ-170 и ПФ 171[1] с 10–15% алюминиевой пудры, ГОСТ 15907-70*
40. –	Краска БТ-177[1], ОСТ 6-10-426-79
41. –	Эмаль ЭП-140[3], ГОСТ 24709-81*
42. –	Эмаль КО-811[3], ГОСТ 23122-78*
43. –	Эмаль КО-813[3], ГОСТ 11066-74*

V. Для защиты от коррозии строительных конструкций из алюминия и оцинкованной стали

44. Грунтовка ФЛ-03Ж[2-3], ГОСТ 9109-81* или АК-069[2], АК-070[2], ОСТ 6-10-401-76 ВЛ-02[2], ГОСТ 12707-77*	Эмаль АС-1115[2], ТУ 6-10-1029-78
45. Грунтовка АК-070[2], ОСТ 6-10-401-76	Эмаль АС-182[2], ГОСТ 19024-79
46. Грунтовка ЭП-0200[3]	а). Эмаль АС-1171[2], ТУ 6-10-16--93-79 б). Эмаль МЛ-1202[2], ТУ 6-10-800-6-78
47. Грунтовка АК-0138[2], ТУ 6-10-1591-77-74	а). Краска ОД-ХВ-221, ТУ 6-10-16-06-77 б). Краска ПЛ-ХВ-122, ТУ 6-10-11-146-13-76
48. Грунтовка КЧ-0189[2], ТУ 6-10-1688-78	а). Краска ОД-ХВ-221 б). Краска ОД-ХВ-714, ТУ 6-10-1687-78 в). Краска ПЛ-ХВ-122

Примечание. Допускается также использование систем 15 (по грунтовке ФЛ-03Ж), 16, 17, 27.

[1-4] Группа материалов по СНиП 2.03.11-85 (приложение 15).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Голубев А.И., Волкова Т.С.** Коррозия внутренних поверхностей элементов замкнутого сечения // Защита металлов, т.25. – №6. – 1989.
2. **Голубев А.И., Мальцева Т.А.** Прогнозирование разрушения лакокрасочных покрытий в атмосферных условиях // Промышленное строительство. – 1980. – № 3.
3. **Шляфирнер А.М., Голубев А.И.** О классификации агрессивных сред и методах коррозионных испытаний // Защита металлов, т.23. – №5. – 1987.
4. **Марутьян С.В., Бойко И.А., Голубев А.И.** Активация поверхности стали путем ее ударной обработки // Физика и химия обработки металлов. – 1988. – № 2
5. **Марутьян С.В., Бойко И.А., Голубев А.И.** Повышение коррозионной стойкости алюминиевых покрытий на стали из расплава // Защита металлов, т.24, – № 1. – 1988.
6. **Проскурин Е.В., Попович В.А., Мороз А.Т.** Цинкование. – М.: Металлургия, 1988.
7. **Липухин Ю.В., Гринберг Д.Л.** Производство эффективных видов оцинкованной листовой стали. – М.: Металлургия, 1987.
8. **Коряков А.С.** Расчет элементов конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред. – Саратовский политехнический ин-т, 1985.
9. Рекомендации по проектированию защиты от коррозии строительных металлических конструкций. ЦНИИпроектстальконструкция. – М.: 1988.
10. Справочник. Промышленные алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1984.
11. **Розенфельд И.Л., Рубинштейн Ф.И.** Антикоррозионные грунтовки и ингибированные лакокрасочные покрытия. – М.: Химия, 1989.
12. ЦНИИпромзданий. Технические условия. Типовые решения. Металлические ограждающие конструкции промышленных зданий. – М.: Стройиздат, 1980.
13. **Банник Я., Ясовский Ф.** Развитие производства листов с алюминиево-цинковым покрытием. – М.: Черметинформация, 1982, «Информсталь», вып.8(132), 19.
14. **Бакалюк Я.Х., Проскурин Е.В.** Трубы с металлическими противокоррозионными покрытиями. – М.: Металлургия, 1985.
15. Справочник. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. – М.: Машиностроение, 1987.
16. **Бойко И.А., Марутьян С.В., Голубев А.И.** Влияние горячего алюминирования на свойства строительных сталей // Сталь. 1987. – № 9.
17. **Марутьян С.В., Бойко И.А.** Влияние марганца на коррозионную стойкость горячеалюминированной стали // Защита металлов. – 1982. – 2.
18. **Марутьян С.В., Бойко И.А., Голубев А.И.** Способ получения алюминированных изделий из углеродистых сталей // А.С. СССР № 1087563, 1983.
19. **Misawa Tachihei.** Образование ржавчины на железе и на атмосферостойкой стали с точки зрения современной науки. Басёку чидзюиу. Corros. Eng. 37,8,1983.
20. **Barton K., Kuchynka D., Bartonova S.** Формирование защитной ржавчины на нелегированной стали. «Koroze a ochr. mater.» 25, № 2, 1981.

РАЗДЕЛ V

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ

ГЛАВА 13

ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И КОНСТРУКЦИИ

13.1. Понятие о предварительном напряжении конструкций и их классификация

Под предварительным напряжением строительных конструкций понимают разнообразные приемы искусственного регулирования напряжений (управление напряженно-деформированным состоянием) в конструкциях для повышения их эффективности. Вмешательство в естественную работу объекта для направленного изменения его потенциальной энергии деформации может происходить на разных стадиях: в процессе изготовления, при монтаже, при эксплуатации или реконструкции и на различных уровнях: конструктивных элементов или узловых соединений, локальных фрагментов и системы сооружения в целом.

Критериями эффективности применения предварительного напряжения в строительных металлоконструкциях могут быть как экономические требования по снижению массы и стоимости объектов, так и технологические (повышение жесткости, сохранение формы элементов несущих конструкций, изменение динамических характеристик и т.д.). В этом отношении металлоконструкции имеют более широкие возможности применения предварительного напряжения, чем железобетонные и сталежелезобетонные, где этот прием развился, прежде всего как средство борьбы с малой прочностью бетона, при растяжении.

Во всех случаях на регулирование внутренних усилий в конструкциях требуются дополнительные затраты труда и остается возможность потери или перестройки наведенного фона внутренних напряжений во времени вследствие развития длительных процессов в материалах и связях. Поэтому внедрение рациональных приемов управления напряженно-деформированным состоянием в практику создания современных конструкций требует для каждой конструктивной формы накопления определенного комплекса опытных и теоретических данных.

Цели предварительного напряжения:

- экономия металла и средств во вновь возводимых конструкциях, благодаря более выгодному распределению изгибающих моментов, продольных и поперечных сил, увеличению области упругой работы конструкций и широкому использованию гибких элементов из высокопрочных металлов, работающих только на растяжение;
- повышение несущей способности (в некоторых случаях области упругой работы) конструкций, находящихся в эксплуатации, также в результате изменения напряженного состояния в связи с намечаемым ростом нагрузок или изменением условий эксплуатации;
- снижение деформативности всей конструкции или отдельных ее элементов, а также уменьшение амплитуды и изменение частот колебаний при действии динамических нагрузок;
- повышение устойчивости всей конструкции или ее отдельных элементов;

- увеличение выносливости отдельных элементов конструкции при действии циклических нагрузок;
- благоприятное изменение некоторых свойств конструкций (динамических характеристик при динамических и сейсмических воздействиях, аэродинамических характеристик при ветровых воздействиях, повышение хладостойкости);
- обеспечение в некоторых случаях удобства монтажа, и в связи с этим снижение трудозатрат.

Первая цель достигается прежде всего созданием системы предварительных напряжений в элементах конструкций, для большинства из них обратных по знаку тем, которые возникают от эксплуатационных нагрузок. Например, растянутый стержень с несущей способностью $N_1 = R_y A$, будучи предварительно сжат до появления напряжений σ_0, имеет увеличенную несущую способность $N_2 = (\sigma_0 + R_y)A$ (рис.13.1). Очевидно, что при сохранении несущей способности, площадь стержня может быть соответственно уменьшена. Область упругой работы предварительно напряженного стержня увеличивается на величину σ_0.

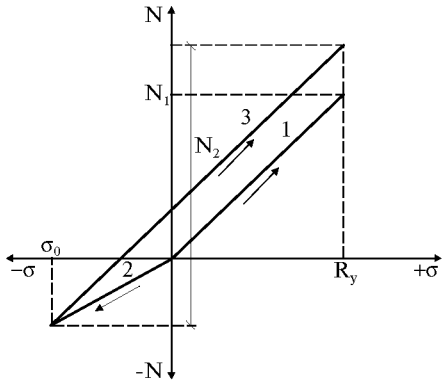


Рис.13.1. Работа предварительно сжатого стержня

1 – работа стержня без предварительного напряжения, *2* - то же, при предварительном сжатии; *3* – работа стержня с предварительным напряжением

Предварительное напряжение открывает возможность эффективно использовать высокопрочные стали, прочность которых в несколько раз выше, чем у обычных строительных сталей. Из высокопрочных материалов изготовляют только гибкие элементы в виде канатов, тяг, шарнирно-сочлененных многозвенников и др., которые не могут воспринимать сжимающие усилия, не будучи предварительно растянутыми.

Снижение деформативности достигается постановкой дополнительных упругих опор в виде предварительно растянутых тросов или стержней. Кроме того, в некоторых конструкциях, например в балках с затяжкой, в процессе предварительного напряжения образуется выгиб f_0. При этом, хотя сечение балки можно уменьшить, что приведет к увеличению деформативности, относительный прогиб, отсчитанный от начального положения балки $f_2 = f_p - f_0$, тем не менее будет меньше полного прогиба, аналогичной конструкции без предварительного напряжения (рис.13.2).

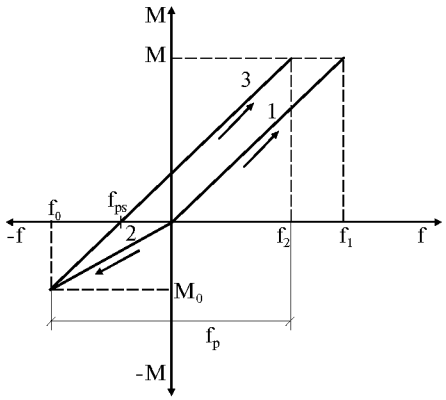


Рис.13.2. Прогибы балки с предварительно напряженной затяжкой

1 – работа балки с затяжкой без предварительного напряжения; *2* – выгиб балки при предварительном натяжении затяжки; *3* – работа балки уменьшенного сечения с предварительно напряженной затяжкой

Следующая цель – повышение устойчивости достигается благодаря снижению расчетной длины сжатых стержней постановкой дополнительных закреплений из предварительно напряженных гибких элементов, например оттяжек или шпренгелей в высотных сооружениях и в других системах.

Увеличение выносливости обеспечивается за счет достижения более благоприятной области определения коэффициента асимметрии напряжений (ρ) . Так, если стержень, работающий на растяжение и сжатие при циклических нагружениях и имеющий отрицательный коэффициент асимметрии, будет заменен на предварительно напряженный гибкий элемент, то ρ всегда будет положительным, а выносливость элемента повышается. В другом случае перегруженный растянутый стержень, также работающий на циклические нагрузки, может быть предварительно обжат, но так, чтобы в нем оставались минимальные растягивающие напряжения, чем и обеспечивается повышение выносливости. Кроме того, благодаря предварительному напряжению в некоторых случаях сглаживается острота концентраторов напряжений, а это, в свою очередь, предотвращает раннее развитие в зонах концентраторов усталостных трещин.

С помощью предварительного напряжения можно изменять в благоприятную сторону некоторые свойства металлических конструкций. Так, различными приемами предварительного напряжения можно регулировать динамические и аэродинамические характеристики конструкций. Например фермы с предварительно напряженными затяжками обладают повышенной способностью к поглощению энергии колебаний по сравнению с аналогичными конструкциями без предварительного напряжения. В этом случае затяжка играет роль демпфера, она удачно перераспределяет усилия между стержнями, в частности, при сейсмических воздействиях уменьшает динамические напряжения, увеличивает декременты колебаний.

Введение предварительно напряженных шпренгелей в высотных сооружениях позволяет уменьшить площади и параметры сечений основных элементов, изменять характеристики обтекания ветровым потоком сечений и снижать воздействие ветровой нагрузки.

Предварительное напряжение в некоторых случаях повышает хладостойкость конструкций, смещая вторую критическую температуру в сторону более низких температур. Предварительное напряжение дает конструкции своеобразную тренировку, благодаря которой сглаживаются напряжения в зонах концентраторов и тем самым оказывается благоприятное влияние на хладостойкость.

Наконец, цель – обеспечение удобства монтажа также достигается постановкой временных предварительно напряженных затяжек или шпренгелей, которые уменьшают расчетную длину из плоскости такой конструкции, устойчивость которой в процессе подъема до постоянного раскрепления связями пришлось бы обеспечивать расчалками или дополнительным усилением сечений.

Группы конструкций, объединенные в классификации общей целью создания предварительного напряжения, не однородны. К основной группе, в которой предварительное напряжение обеспечивает экономию металла, относится подавляющее большинство конструкций различных видов. При этом часть из них может принадлежать и к другим группам классификации. Расширение областей применения предварительно напряженных конструкций в значительной мере будет происходить за счет систем с регулированием деформативности, устойчивости, выносливости, сейсмостойкости и др. Очень перспективна группа, в которой предварительное напряжение используется при реконструкции.

При выборе технических решений для новых или реконструируемых объектов с применением регулирования напряженно-деформированного состояния на основе описанных выше приемов должен быть рассмотрен экономический фактор наряду с фактором надежности. Выбор окончательного решения во всех случаях опирается на технико-экономический анализ проекта.

Классификация предварительно напряженных конструкций может осуществляться по ряду признаков: по способам, видам воздействия на конструкцию, материалам,

видам работы, месту осуществления и др. В широком смысле напряженное состояние конструкций можно регулировать различными методами:

- собственно предварительным напряжением новых и эксплуатируемых конструкций с введением специальных напрягающих элементов;
- частичной разгрузкой или пригрузом системы, в том числе в результате изменения положения внешних связей;
- обеспечением пространственной работы конструкции с постановкой дополнительных связей;
- включением в совместную работу с несущей конструкцией элементов ограждающих конструкций – настилов, листов, плит и др.;
- изменением статической схемы конструкций (изменением условий закрепления на опорах, постановкой дополнительных опор, введением временных или постоянных шарниров, стоек и др.);
- изменением режима эксплуатации.

Все эти способы удобно использовать и при реконструкции. Предварительно напряженные конструкции можно разделить также на две категории – могущие работать и без предварительного напряжения, и те, которые не могут существовать без него как статически неизменяемые объекты. Это, прежде всего, некоторые висячие системы, мачты на оттяжках и др. В таких конструкциях гибкие элементы не могут воспринимать сжимающих усилий или образуют механизмы (и мгновенно изменяемые системы), если они предварительно не растянуты.

По способам осуществления предварительного напряжения все конструкции делятся на две большие группы: конструкции, у которых предварительное напряжение осуществляется с помощью различных высокопрочных элементов – затяжек, шпренгелей, вант и др., и конструкции, у которых предварительное напряжение осуществляется другими способами.

К группе конструкций, напрягаемых с помощью высокопрочных элементов, относятся:

- балки разрезные и неразрезные с прямолинейными и ломаными предварительно напряженными затяжками и шпренгелями, как в пределах высоты балки (рис.13.3,*а*,*б*,*в*), так и вне балки (рис.13.3,*г*,*д*,*е*,*ж*);

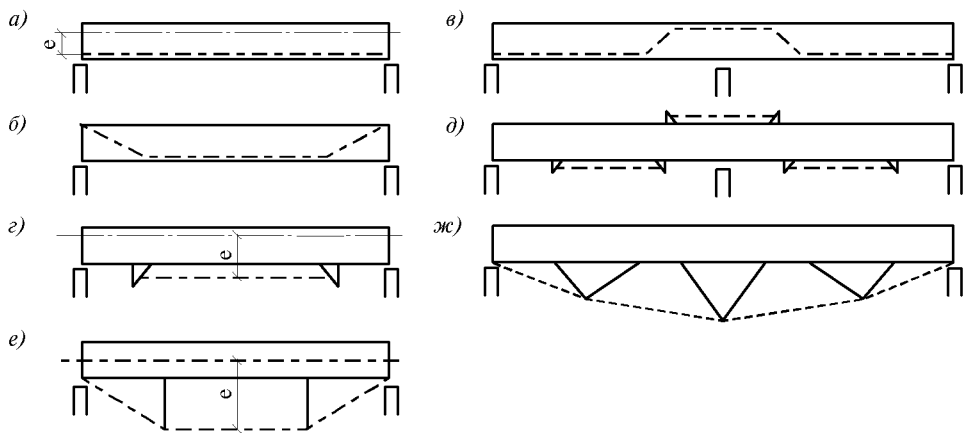
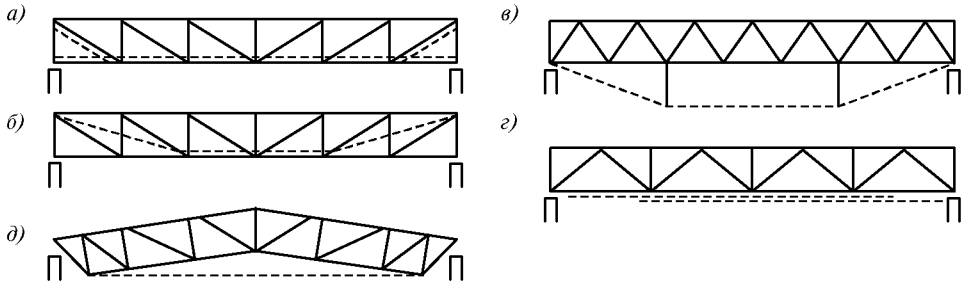


Рис.13.3. Балки с предварительно напряженными затяжками и шпренгелями

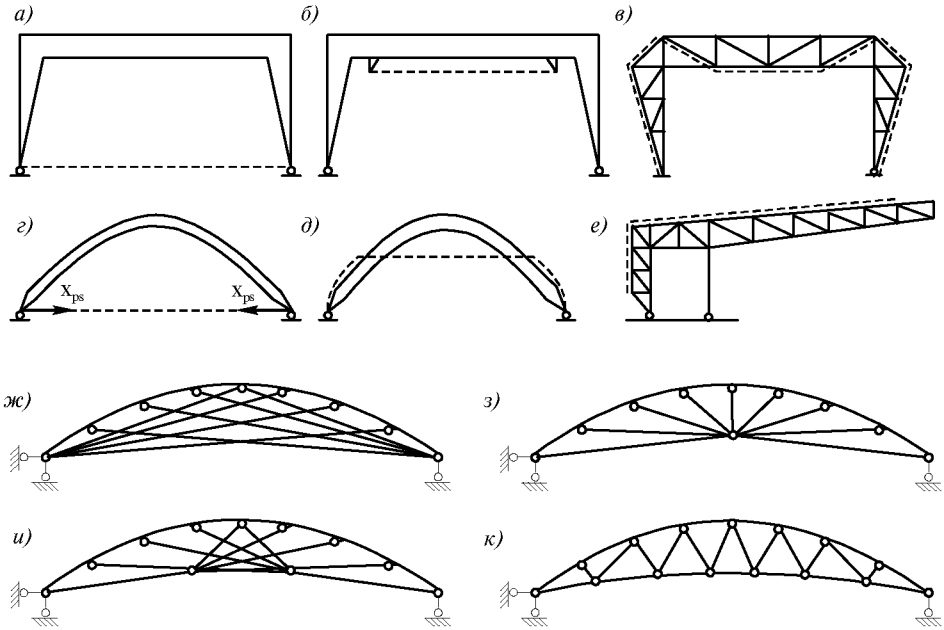
- фермы с высокопрочными предварительно напряженными элементами, располагаемыми в зоне растянутых поясов и других стержней (рис.13.4,*а*,*г*);

- фермы с предварительно напряженными шпренгелями различного очертания, расположенные как в пределах высоты, так и вынесенные за габариты фермы (рис.13.4,*б*,*в*,*д*);



13.4. Фермы с предварительно напряженными затяжками и шпренгелями

- кровельные панели, усиленные шпренгельными системами;
- рамы, арки, своды и другие системы с включением предварительно напряженных высокопрочных элементов (рис.13.5,*а*,*б*,*в*,*г*,*д*,*е*);



13.5. Рамы, арки, консольные системы с предварительно напряженными гибкими элементами

- балки жесткости комбинированных систем с предварительно натянутыми вантами;
- висячие двухпоясные системы с натяжением стабилизирующих тросов или однопоясные системы с натяжением оттяжек;
- висячие системы из перекрестных тросов с натяжением стабилизирующих тросов;
- многоэтажные здания с этажами на предварительно напряженных подвесках;
- многоэтажные здания, усиленные предварительно напряженными высокопрочными элементами;
- мачты и опоры на предварительно напряженных оттяжках;
- мачты со шпренгелями;

- предварительно напряженные сетчатые башни;
- листовые конструкции с навитой высокопрочной предварительно напряженной проволокой (или лентами).

К группе конструкций, в которой используются другие способы предварительного напряжения, относятся:

- балки с предварительно изогнутыми элементами (рис.13.6);

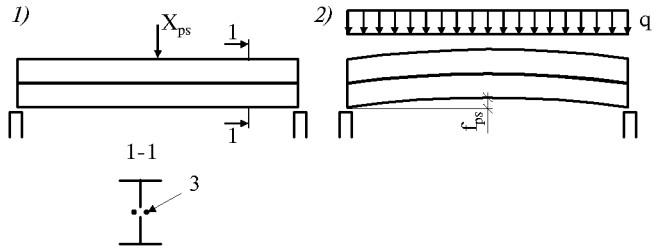


Рис.13.6. Предварительно изогнутые балки

1 – предварительный изгиб элементов балки силой X_{ps}; *2* – балка в рабочем положении под действием нагрузки *q*; 3 – швы, накладываемые после предварительного изгиба элементов балки

- балки с предварительно растянутыми тонкими стенками или одним из поясов;
- колонны с предварительно растянутыми тонкими стенками;
- неразрезные конструкции со смещением уровня опор;
- рамы и арки со смещением опор в горизонтальном направлении;
- пространственные структурные плиты со смещением уровня опор;
- системы с введенными дополнительными опорами или шарнирами;
- конструкции, замыкаемые стягиванием или расклиниванием смежных сечений элементов (рис.13.40);
- неразрезные, консольные, рамные и другие конструкции с частичными пригрузом или разгрузкой (рис.13.7,*а*,*б*);
- фермы с предварительно изогнутыми стержнями;
- панели и оболочки с натянутыми тонкими листами.

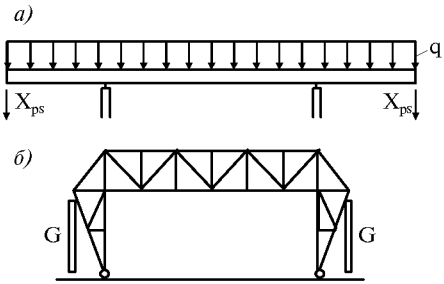


Рис.13.7. Пригруз (X_{ps}) на консолях и подвеска стен к раме

По видам воздействия на конструкцию различаются следующие случаи:

- внутреннее предварительное напряжение. Равновесие внутри системы, опорные реакции не изменяются (балки и другие конструкции с затяжками, шпренгелями; балки с предварительно изогнутыми или растянутыми элементами и т.п.);
- внешнее предварительное напряжение. Равновесие вследствие изменения реакций (балки и другие системы с изменением уровня опор, конструкции на оттяжках и т.п.);
- изменение статической схемы в процессе регулирования напряжений.

По видам работы возможно: предварительное центральное растяжение; предварительное центральное сжатие; предварительный изгиб; предварительные внецентренные сжатие и растяжение.

По материалам напрягающих элементов: металлические прокатные профили, включая тонкие листы; гибкие элементы (стальные проволочные пучки и пряди,

канаты, стержневая арматура, полосы, а также стержни из стеклопластиков и других специальных конструкционных материалов).

По месту осуществления предварительного напряжения: на заводе-изготовителе металлоконструкций; на монтаже до подъема и установки монтажных блоков; на монтаже после подъема и установки конструкций, включая однократное и многократное предварительное напряжение; в процессе реконструкции – на объекте или на специальном стенде при замене на новые.

13.2. Предварительно напряженные конструкции с высокопрочными элементами

13.2.1. Общие положения. На конструктивные формы предварительное напряжение накладывает определенный отпечаток. Вводятся дополнительные элементы – затяжки, шпренгели, распорки и др. Появляются специальные узлы, главным образом, для крепления этих дополнительных элементов. Помимо того, что в узлах должны быть обеспечены прочность, технологичность изготовления, они должны быть удобны для размещения натяжного оборудования (домкратов, муфт и др.). При предварительном натяжении часть элементов конструкции оказывается сжатой. В связи с этим возникает проблема обеспечения их устойчивости.

Изготовление конструкций с предварительным напряжением каких-либо существенных особенностей не имеет. Главная особенность – это осуществление операции регулирования и контроля напряжений. Эти операции могут осуществляться уже на заводе металлических конструкций, либо на монтаже перед подъемом, либо после того, как конструкция установлена в проектное положение. Часть операций требует значительных затрат труда, например вытяжки гибких элементов, а затем их расчетное натяжение. Некоторые операции удачно вписываются в технологическую последовательность изготовления, например нагрев тонкой стенки в балках или колоннах в процессе их сварки.

У большинства предварительно напряженных конструкций отсутствуют существенные отличия в особенностях их эксплуатации по сравнению с обычными металлоконструкциями. Следует избегать применения технических решений, в которых требуется уделять повышенное внимание защите от коррозии гибких растянутых элементов и проводить в период эксплуатации трудоемкое восстановление потерь предварительного напряжения.

13.2.2. Балки с высокопрочными затяжками. При действии эксплуатационных нагрузок несущая способность балок повышается, если со стороны их растянутых волокон расположить преднапряженные затяжки. Растягивающие усилия в затяжке, уравновешиваемые сжимающими усилиями в балке, образуют дополнительный момент внутренних сил, который уравновешивает часть внешнего изгибающего момента. В результате предварительного напряжения увеличивается область упругой работы стали, а балка работает как статически неопределимая система.

Метод предварительного напряжения затяжками эффективен для разрезных и неразрезных балок рабочих площадок, для ригелей одноэтажных и многоэтажных зданий, для многоэтажных промышленных этажерок. Арки с затяжкой применяются в мостостроении, в системах большепролетных перекрытий и в других сооружениях.

Особенности работы предварительно напряженных балок, их конструктивная форма и экономичность зависят от схемы размещения затяжки по длине и высоте балки. По очертанию затяжки могут быть прямолинейными, криволинейными или ломаными (см. рис.13.3,*а*-*г*). Они располагаются в пределах высоты балки или выносятся за пределы ее сечения (рис.13.3,*г*,*е*,*ж*).

Балки с затяжками, значительно удаленными за пределы сечения (шпренгельного типа), можно применять в случаях, когда не ограничена строительная высота конструкции. По затрате металла они экономичнее балок с затяжками, расположенными в пределах их высоты. Однако они имеют некоторые недостатки: их сложнее транспортировать; труднее защитить затяжку от коррозии; сжатый пояс в процессе создания предварительного напряжения, недостаточно жестко связанный с затяжкой, может потерять устойчивость, что лимитирует величину предварительного напряжения. В неразрезных балках прямолинейные затяжки рационально размещать на участках с наибольшими значениями изгибающих моментов со стороны растянутых волокон. Криволинейные и ломаные затяжки, расположенные в пределах высоты балок, создают предварительное напряжение переменного по длине балок значения. В местах перегиба затяжки возникают вертикальные составляющие усилия предварительного натяжения, облегчающие работу балки.

Изготовление криволинейных затяжек сложнее, так как для их укладки необходимы специальные направляющие. При создании предварительного напряжения между затяжкой и криволинейными направляющими возникают силы трения, поэтому приходится увеличивать необходимое усилие натяжения затяжки.

В неразрезных балках одна криволинейная затяжка может заменить несколько прямолинейных с уменьшением количества анкерных устройств. Усилие предварительного натяжения затяжки передается на конструкцию балки с помощью анкеров, располагаемых на концах затяжек, и анкерных упоров, размещаемых на балке в местах прикрепления затяжек.

Затяжки могут выполняться в виде стальных канатов или сплошных круглых стержней, а также из полосовой стали. Недостатки канатов – их пониженный модуль деформации и проявление эффектов продольной и поперечной ползучести.

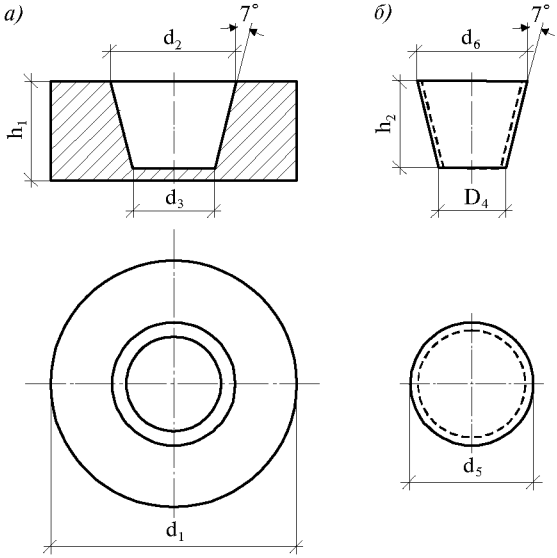
Для частичного устранения этих недостатков применяется предварительная вытяжка канатных элементов в процессе их изготовления на специальных стендах, что увеличивает трудоемкость изготовления и монтажа. Рационально применение закрытых спиральных канатов, имеющих повышенный шаг свивки (до 14 диаметров каната). Такие канаты в оцинкованном исполнении широко применяются в предварительно напряженных комбинированных большепролетных системах, включая и системы типа балка (ферма) с затяжкой.

Затяжки из канатов целесообразно проектировать прямолинейными с устройством на концах анкерных креплений стаканного типа. Для получения необходимого обжатия и уплотнения заделки каната в стакане следует произвести вытяжку затяжки совместно с анкерными стаканами. Для затяжек при сравнительно небольших усилиях в канатах (до 1500 кН) можно использовать гильзо-клиновые анкеры.

Затяжки из высокопрочной проволоки изготовляют в виде пучков, в которых проволоки располагаются или по периметру окружности и образуют трубчатое сечение, или образуют сплошной пучок круглого или прямоугольного сечений. Проволока применяется высокопрочная, гладкая арматурная диаметром 2,5–8 мм с расчетным сопротивлением 780–1120 МПа.

Пучки затяжек круглого сечения натягиваются гидравлическими домкратами двойного действия (число проволок в пучке принимают кратным шести – 12, 18, 24, 36 шт в соответствии с конструкцией домкрата и расчетным усилием в затяжке) и применяют анкерные крепления типа «колодка с пробкой» (рис.13.8). Наиболее мощные затяжки выполняют из пучков сплошного сечения, которые могут иметь практически неограниченное число проволок.

Затяжки из сплошных стержней изготовляют из термоупрочненных сталей. Возможно применение горячекатаной арматуры периодического профиля без упрочнения или упрочненной вытяжкой, однако следует принимать во внимание их



13.8. Анкер «колодка с пробкой»
а – колодка; б – коническая пробка

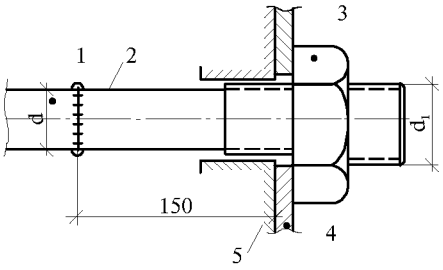


Рис.13.9. Анкер для затяжки из стержней
1 – стержень; *2* – концевой элемент с резьбой; *3* – закрепляющая гайка; *4* – упорный лист; *5* – конструкция

сравнительно невысокое расчетное сопротивление (400–510 МПа). Ограниченная длина прокатываемой арматуры (до 15 м) усложняет устройство затяжек большой длины из-за частичного разупрочнения термоупрочненных сталей в процессе сварки укрупнительных стыков. Для затяжек из сплошных стержней можно применять анкеры в виде упорных листов и закрепляющих гаек (рис.13.9) и анкеры в виде опрессованных стальных гильз (рис.13.10).

Небольшое по значению предварительное напряжение может быть создано фаркопфом, включенным в затяжку, или натяжением торцовой гайки, закрепляющей затяжку. Однако применение этого метода затруднено необходимостью принятия мер против закручивания затяжки в процессе натяжения.

Возможно применение сплошных петлевидных затяжек круглого или прямоугольного сечений, которые выполняются методом непрерывной навивки и закрепляются на упорах криволинейного очертания (рис. 13.11). Затяжка имеет один подвижный и другой неподвижный упоры. Подвижный упор с помощью домкрата перемещается и затем сваркой или болтами прикрепляется к балке, после чего домкрат демонтируется. Для затяжек ломаного очертания в местах их перегиба устраивают упоры с желобами.

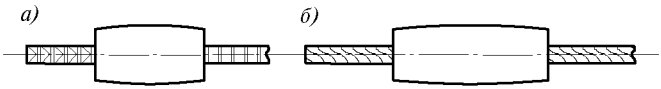


Рис.13.10. Анкеры из опрессованных гильз
а – на стержнях из арматуры; *б* – на прядях

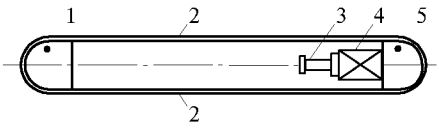


Рис.13.11. Натяжение петлевидной затяжки
1 – неподвижный анкер; *2* – затяжка; *3* – упор для домката; *4* – домкрат; *5* – подвижный анкер

13.2.3. Фермы с предварительно напряженными затяжками. Эффект применения предварительного напряжения в фермах в значительной мере зависит от конструктивных форм ферм и схемы расположения затяжек. Согласно принятой классификации затяжки могут размещаться в пределах наиболее нагруженных стержней и создавать в них эффект предварительного напряжения (рис.13.4,*а*) или размещаться в пределах всего пролета или части пролета фермы (рис.13.4,*б*,*г*) и создавать предварительное напряжение в нескольких или во всех стержнях фермы.

Фермы с предварительным напряжением по первому типу рациональны при больших пролетах и нагрузках, когда каждый предварительно напрягаемый стержень представляет собой отдельную отправочную марку. Предварительное напряжение стержней может производиться на заводе или при укрупнительной сборке на монтажной площадке. Недостатками их являются более сложные конструкции узлов и большое число анкерных креплений затяжек.

Наиболее простая схема ферм с предварительным напряжением по второму типу получается при размещении одной или нескольких прямолинейных затяжек вдоль нижнего растянутого пояса (рис.13.4,*г*). Число затяжек принимается в зависимости от пролета фермы, несущей способности на сжатие крайних панелей и формы сечения пояса.

Эффективность предварительного напряжения повышается при устройстве затяжек ломаного очертания как в пределах высоты фермы (рис.13.4,*б*), так и вынесенных за пределы габаритов фермы (рис.13.4,*в*). Наиболее эффективны предварительно напряженные фермы типа «арка с затяжкой», которые имеют вспарушенный нижний пояс и прямолинейную затяжку по всей длине пролета или части его (рис.13.4,*д*), при этом габариты фермы не увеличиваются. В результате натяжения затяжки предварительное напряжение создается практически во всех стержнях фермы. Рациональность фермы зависит от ее очертания, уклона поясов, схемы решетки, типа сечений элементов и марок стали для поясов и решетки. Оптимальная высота ферм по середине пролета от затяжки до верхнего пояса составляет 1/6–1/8 пролета, а высота жесткой части фермы принимается в пределах 1/10–1/12 пролета.

В легких предварительно напряженных фермах пролетом 30–36 м рациональны стержни из стали повышенной прочности, выполненные из гнутых тонкостенных профилей квадратного или прямоугольного сечения, а также из труб, что обеспечивает экономию металла до 45 % и экономию стоимости до 35 %. Затяжки следует размещать симметрично относительно центра тяжести сечения нижнего пояса (рис.13.12), при этом необходимо предусмотреть установку диафрагм жесткости и других конструктивных элементов, чтобы избежать потери устойчивости пояса в процессе создания предварительного напряжения.

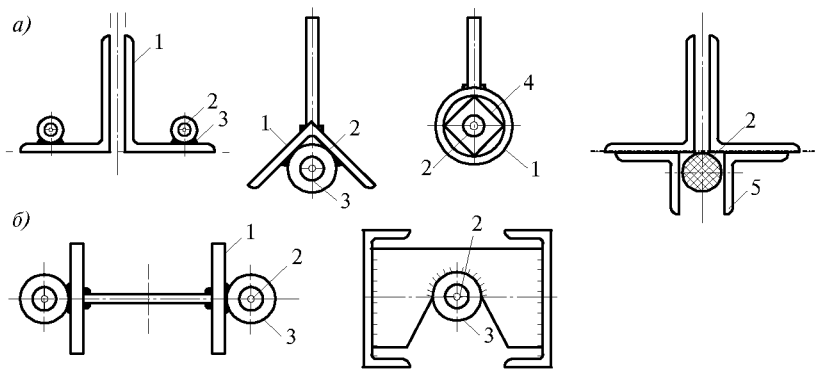


Рис.13.12. Размещение затяжек

а – в легких фермах; *б* – в тяжелых фермах; *1* – стержень; *2* – затяжка; *3* – обрезок трубы; *4* – диафрагма; *5* – обрезки уголков

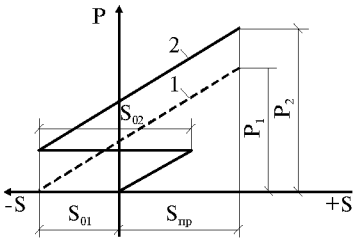


Рис.13.13. Работа предварительно напряженной фермы

1 – при предварительном напряжении до загружения; *2* – при предварительном напряжении после частичного загружения

Эффективность предварительного напряжения также зависит от последовательности натяжения затяжки и загружения фермы. Натяжение затяжки может осуществляться на монтажной площадке в процессе укрупнительной сборки или когда фермы установлены в проектное положение. Во втором случае натяжение затяжки целесообразно осуществлять после передачи на ферму части или всей постоянной нагрузки (многоступенчатое предварительное напряжение), что дает больший эффект, чем натяжение до загружения ферм (рис.13.13). При правильно выбранных последовательности натяжения и значении усилия натяжения затяжки можно получить экономию стали до 25–30 %.

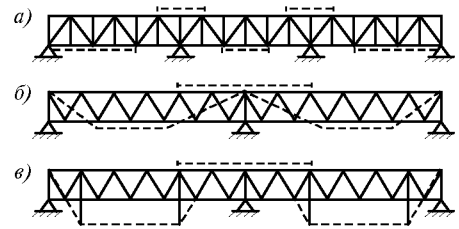


Рис.13.14. Размещение затяжек в неразрезных фермах

а – прямолинейные затяжки на растянутых участках поясов; *б* – ломаные затяжки в пределах габаритов ферм; *в* – выносные затяжки

В неразрезных фермах применяются прямолинейные затяжки, расположенные вдоль растянутых участков поясов (рис.13.14,*а*), а также ломаные в пределах габаритов фермы (рис.13.14,*б*) или выносные (рис.13.14,*в*) затяжки. В предварительно напряженных фермах возможно применение всех типов затяжек и анкерных креплений, рекомендуемых для балок, при этом наиболее изучено и разработано применение затяжек из стальных канатов с анкерами стаканного типа.

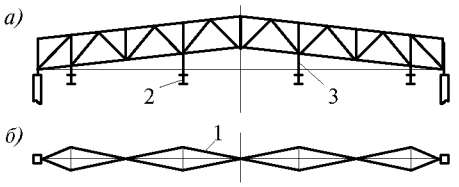


Рис.13.15. Предварительное напряжение ферм и подвесных подкрановых балок петлевидными затяжками, напрягаемыми путем их отклонения из плоскости фермы

1 – затяжка; *2* – подкрановая балка; *3* – связи (подвески)

Для покрытий с подвесными многопролетными кран-балками можно использовать предварительно напряженные фермы типа «арка с затяжкой» с затяжками петлевидного типа (рис.13.15,*а*), которые закрепляются на концевых упорах в опорных узлах ферм. Затем они переходят с одной стороны фермы на другую, закрепляясь в местах перелома на верхних поясах подкрановых балок, образуя многозвеньевую «восьмерку» (рис.13.15,*б*).

Натяжение затяжки, выполненной из круглых стержней арматурной стали, производится наверху оттяжкой ветвей и закреплением их на верхних поясах подкрановых балок. В большепролетных покрытиях ангаров могут применяться консольные предварительно напряженные фермы с расположением затяжек по верхнему поясу (рис.13.5,*е*). В результате предварительного напряжения затяжек, осуществляемого наверху, можно получить экономию стали до 12 %.

Более широкое распространение могут получить затяжки и ванты в виде шарнирно-сочлененных звеньев из полосового или листового проката сталей повышенной и высокой прочности. Такие конструкционные элементы не обладают ползучестью, могут быть изготовлены с высокой точностью, удобны при монтаже, благодаря полной заводской готовности. Вместе с тем работа проушин и штырей

изучена очень хорошо, и поэтому нет никаких проблем с прогнозированием ресурса надежности таких напрягающих растянутых элементов.

13.2.4. Кровельные панели, усиленные шпренгельными системами. При пролетах более 6 м кровельные панели целесообразно усиливать шпренгелем с раскосной или безраскосной решеткой (рис.13.16,*а*,*б*), что позволяет увеличить их жесткость без значительной затраты материала. Так как транспортировать панели с шпренгелями затруднительно, панель и шпренгель перевозят с завода на строительную площадку отдельно, объединяя их на площадке укрупнительной сборки.

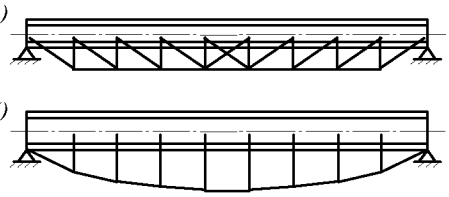


Рис.13.16. Предварительно напряженные кровельные панели

а – с раскосной решеткой; *б* – с безраскосной решеткой

В верхней и нижней обшивках панели создаются растягивающие напряжения, которые погашаются сжимающими усилиями при загружении панели расчетной нагрузкой. Цепные усилия, которые возникают в обшивке, на промежуточных опорах шпренгеля уравновешиваются, а в крайних закреплениях передаются на каркас панели.

13.2.5. Рамы, арки и своды с включением предварительно напряженных высокопрочных элементов. В рамах, арках и сводах большепролетных покрытий зданий, в которых собственный вес несущих и ограждающих конструкций является основной частью нагрузки, предварительное напряжение, осуществляемое с помощью натяжения высокопрочных элементов (рис.13.5), может дать значительный эффект. При расположении затяжки на уровне опорных шарниров стоек рам (рис.13.5,*г*) натяжением затяжки можно разгрузить среднюю часть ригеля и несколько облегчить фундаменты, при этом небольшое увеличение усилий в опорном узле рамы и стойках не сказывается при больших пролетах и невысоких стойках. Варьируя расположением затяжек, можно получить благоприятные эпюры изгибающих моментов от предварительного напряжения для ригеля (рис.13.5,*б*), а также одинаково благоприятные эпюры моментов для ригеля и опор (рис.13.5,*в*), при этом экономия стали по сравнению с рамной решетчатой системой без предварительного напряжения достигает 20–30 %.

В другой схеме предварительного напряжения (рис.13.5,*в*) затяжка расположена посередине пролета вдоль нижнего пояса ригеля, у опор она поднимается к верхнему поясу, перекидывается через выступающие за колонны консольные стержни и закрепляется в нижней части колонн над опорными шарнирами. В результате натяжения затяжки нижний пояс ригеля подвергается эффекту двойного сжатия: от натяжения затяжки и от нагружения наклонных стержней консолей, на которые опирается затяжка.

При действии эксплуатационных нагрузок нижний пояс ригеля остается растянутым, колонны от натяжения затяжки получают дополнительное сжатие, однако это не требует дополнительного их усиления. Определенным преимуществом такой схемы является то, что натяжение затяжки производится внизу. Следует учитывать, что для этих схем предварительного напряжения требуются мощные затяжки, которые выполняются из одного или нескольких стальных канатов.

В арочных конструкциях предварительное напряжение создается главным образом затяжками прямолинейного (рис.13.5,*г*) или ломаного (рис.13.5,*д*) очертания. Чем сложнее конструктивная схема арок и выше ее статическая неопределимость, тем больше рациональных схем предварительного напряжения. Для конструктив-

ных схем, представленных на рис.13.5,*ж–к*, предварительное напряжение позволяет затяжкам воспринимать сжимающие усилия. При этом существенно повышается жесткость конструкции при загружении половины пролета арки. Затяжки примыкают шарнирно к жесткому поясу, в результате предварительным напряжением затяжек может быть достигнуто снижение напряжений в арке до 25–35 %. Анализ этих конструктивных схем показал, что наиболее экономичной по расходу металла является схема с точкой схода затяжек посередине пролета (см. рис.13.5,*з*). Для этой схемы оптимальное отношение стрелы подъема пояса к пролету равно 1/6 и оптимальное число панелей – восемь (при четном числе панелей) и девять (при нечетном числе панелей).

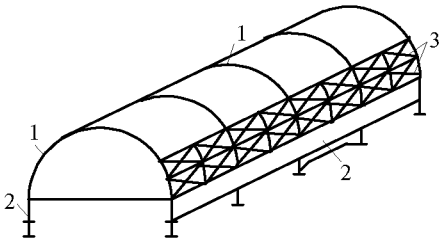


Рис.13.17. Сводчатое предварительно напряженное покрытие

1 – арки с затяжкой; *2* – бортовая предварительно напряженная балка; *3* – связи

Сводчатые пространственные покрытия (рис.13.17) собираются из пространственных решетчатых блоков, грани которых в собранном виде образуют продольные и поперечные фермы. Покрытия опираются по продольным краям на бортовые обвязочные балки, а на торцах – на опорные диафрагмы в виде арки с затяжкой. Колонны продольных рядов работают совместно с покрытием в поперечном направлении. Горизонтальные силы в продольном направлении воспринимаются вертикальными связями, размещаемыми в средних пролетах продольных рядов колонн.

Предварительное напряжение создается после монтажа покрытия стягиванием бортовых балок, в результате чего уменьшаются напряжения от основных нагрузок и провисание покрытия, упрощается его монтаж и исключается необходимость устройства непрерывных связей между колоннами для восприятия сдвигающих усилий и ленточных фундаментов под колонны для восприятия растягивающих усилий.

13.2.6. Висячие двухпоясные системы с натяжением стабилизирующих тросов и однопоясные системы с натяжением оттяжек. Висячие системы, выполняемые из стальных тросов, круглой арматуры или других гибких элементов, могут нормально эксплуатироваться только при применении предварительного напряжения, которое придает им необходимую жесткость. Они перекрывают помещения больших пролетов и любой конфигурации в плане и имеют разнообразные формы поверхности.

Для двухпоясных систем характерно наличие стабилизирующих вант, расположенных параллельно основным несущим вантам. Напрягающие ванты могут находиться ниже или выше несущих вант и соединяться с ними гибкими тяжами или распорками. Двухпоясные системы могут быть в виде вантовых ферм, в которых растяжки заменены наклонными раскосами. Они рациональны при больших временных нагрузках.

В однопоясных предварительно напряженных вантовых (висячих) системах стабилизирующие ванты располагают поперек направления несущих вант. Наилучшей формой поверхности для них является гиперболический параболоид, обеспечивающий одинаковые значения усилий в вантах при равномерно распределенной нагрузке на покрытие. Однопоясные вантовые покрытия с поперечной стабилизацией могут иметь различную конфигурацию в плане.

13.2.7. Многоэтажные здания с этажами на предварительно напряженных подвесках. Многоэтажные каркасные здания прямоугольной или круглой формы в плане, в которых крайние, расположенные по периметру колонны заменены предварительно напряженными вантами (рис. 13.18), состоят из жесткого ствола, выполненного в металле или железобетоне, и вант, которые через поперечные жесткие диафрагмы и узлы сопряжения их со стволом передают на него усилия предварительного натяжения.

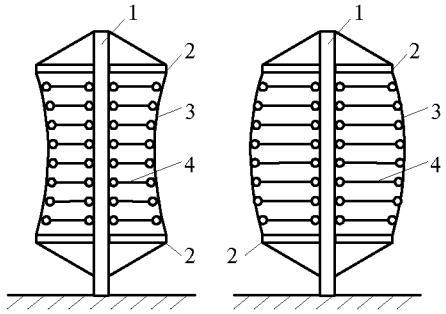


Рис.13.18. Высотные здания с жестким стволом и подвешенными на предварительно напряженных вантах этажами

1 – жесткий ствол; *2* – горизонтальные диафрагмы; *3* – ванты; *4* – балки междуэтажных перекрытий

Балки перекрытий, шарнирно сопряженные со стволом и подвешенные к вантам, работают только на вертикальную нагрузку. В результате предварительного напряжения вант здание обладает способностью удовлетворительно воспринимать горизонтальные ветровые и сейсмические нагрузки без дополнительного расхода стали, а ванты, выполненные из канатов, тросов или полосовой высокопрочной стали, способны воспринимать растягивающие и сжимающие усилия без потери устойчивости.

13.2.8. Многоэтажные здания, усиленные предварительно напряженными высокопрочными элементами. Для многоэтажных зданий с каркасами, выполненными по связевой схеме (рис.13.19), для восприятия горизонтальных ветровых и сейсмических нагрузок вместо жестких наклонных связевых элементов эффективно применение предварительно напрягающих высокопрочных элементов в виде тросов или лент, располагаемых по наружным граням каркаса. В этом случае можно добиться эффекта существенной разгрузки внутренних колонн каркаса, которые будут воспринимать только вертикальные нагрузки и не воспринимать горизонтальные ветровые и сейсмические нагрузки.

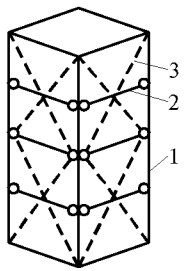


Рис.13.19. Высотные здания связевого типа, усиленные предварительно напряженными элементами

1 – колонны; *2* – балки междуэтажных перекрытий; *3* – напрягающие элементы (ленты или канаты)

13.2.9. Мачты и опоры на предварительно напряженных оттяжках. Мачты и опоры ЛЭП, выполненные из круглых или решетчатых стволов и оттяжек – пример высотных предварительно напряженных сооружений. Натяжение оттяжек позволяет им воспринимать усилия, повышает жесткость сооружений в горизонтальном направлении, дает возможность выдерживать отклонение верха ствола от вертикали в пределах заданной величины и приводит к хорошим показателям по расходу металла, эксплуатационным и монтажным качествам (жесткость, транспортабельность).

13.2.10. Предварительно напряженные шпренгельные мачты. Наибольшее распространение шпренгельные стойки получили в качестве составного элемента ствола шпренгельных радиомачт (рис.13.20). Ствол разделяется на отдельные предварительно напряженные шпренгельные секции, поддерживаемые в местах их

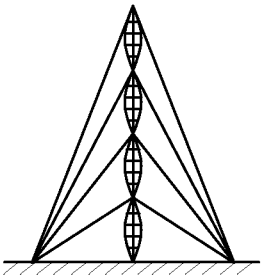
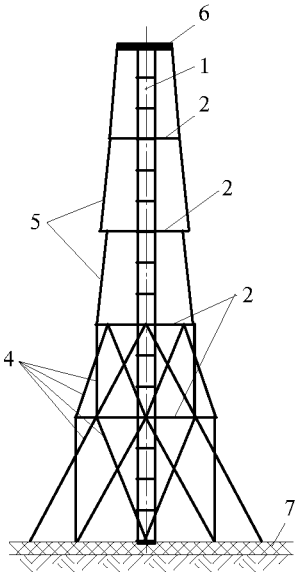


Рис.13.20. Шпренгельная радиомачта



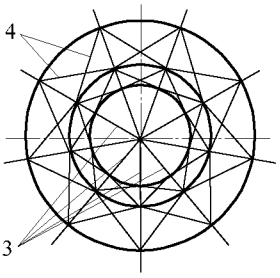


Рис.13.21. Сетчатая предварительно напряженная башня

1 – центральный стержень; *2* – кольца жесткости; *3* – радиальные связи; *4* – предварительно напряженные тяги; *5* – сетчатая оболочка; *6* – жесткие диафрагмы; *7* – кольцевой фундамент

сочленения оттяжками. Каждая шпренгельная секция представляет собой многопанельную предварительно напряженную шпренгельную стойку, обычно усиленную четырехсторонней шпренгельной системой, состоящей из предварительно напряженных оттяжек и распорок и воспринимающей значительную часть поперечной нагрузки, которая действует на ствол в пролетах между смежными ярусами оттяжек и улучшает условия работы центрального стержня на продольный изгиб.

13.2.11. Предварительно напряженные сетчатые башни. Конструктивные формы сетчатых башен, представляющих собой пространственную конструкцию, боковая поверхность которой состоит из взаимно пересекающихся прямолинейных стержней (обычно из уголков или швеллеров, имеющих большую парусность и низкие аэродинамические показатели), могут быть в значительной мере улучшены предварительным напряжением. Такая башня (рис.13.21) состоит из жесткого центрального стержня *1*, колец жесткости *2*, расположенных в несколько ярусов и соединенных с центральным стержнем гибкими радиальными связями *3*, натянутыми с предварительным напряжением, и сетчатой оболочки двоякой кривизны *4*, являющейся боковой поверхностью башни, образованной предварительно напряженными взаимно перекрещивающимися струнами *5*, равномерно распределенными по окружности и идущими вдоль башни по правой и левой спирали. В верхней части башни струны прикреплены к жесткой диафрагме *6*, внизу – к кольцевому фундаменту *7*.

Центральный стержень башни воспринимает вертикальные нагрузки (масса башни, полезная нагрузка, усилия предварительного напряжения струн боковой оболочки). Боковая сетчатая оболочка воспринимает ветровые, сейсмические и другие горизонтальные нагрузки. Струны оболочки, выполненные из предварительно напряженных высокопрочных стальных круглых стержней (с улучшенными аэродинамическими характеристиками) работают на сжатие без потери устойчивости.

13.2.12. Листовые конструкции, предварительно напряженные навивкой высокопрочной проволокой или лентой. В листовых конструкциях типа цилиндрических оболочек, к которым относятся резервуары для хранения жидкостей (вертикальные и горизонтальные), надземные и подземные напорные трубопроводы, сосуды и емкости химической промышленности (аппараты высокого давления), можно получить значительную экономию стали и стоимости, а в некоторых случаях уменьшить трудоемкость изготовления, при

применении предварительного напряжения, осуществляемого путем непрерывной навивки на оболочку высокопрочной проволоки или ленты или постановкой бандажей из высокопрочной полосовой стали (рис.13.22).

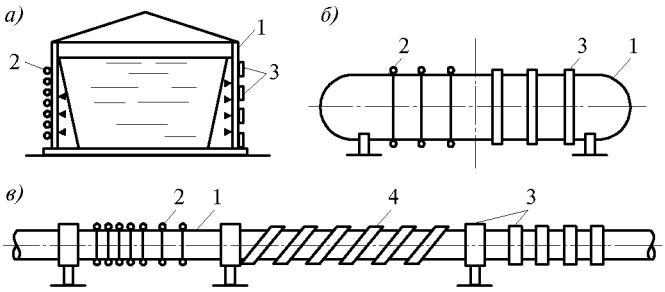


Рис.13.22. Предварительно напряженные листовые конструкции

а – вертикальные цилиндрические резервуары; *б* – горизонтальные цилиндрические резервуары; *в* – напорные трубопроводы; *1* – корпус; *2* – напрягающая проволока; *3* – напрягающие бандажи; *4* – напрягающая лента

Снижение расхода металла и стоимости достигается благодаря частичной замене листового металла обычной прочности высокопрочной проволокой или полосовой сталью, у которых расчетные сопротивления повышаются значительно быстрее, чем стоимость. Снижение трудоемкости изготовления аппаратов и сосудов высокого давления со сравнительно толстыми стенками (30–60 мм и более) можно получить путем перехода на более тонкие стенки и упрощением работ по заготовке и сварке листов. Обмотка габаритных оболочек высокопрочной проволокой производится на стационарных обмоточных машинах в заводских условиях.

Для вертикальных цилиндрических резервуаров объемом более 20 тыс.м^3 корпус может быть изготовлен рулонным способом из полотнищ толщиной до 16 мм, а затем с помощью специальных обмоточных машин часть корпуса на монтаже обматывается высокопрочной проволокой с предварительным натяжением, для чего можно использовать механизмы, аналогичные применяемым для обмотки железобетонных резервуаров.

13.3. Предварительно напряженные конструкции без дополнительных высокопрочных элементов

Положения, характеризующие особенности предварительно напряженных конструкций без дополнительных высокопрочных элементов, являются общими с рассмотренными в п.13.2.1.

13.3.1. Балки с предварительно изогнутыми элементами. Идея этих балок состоит в том, что две части сечения (тавры, двутавры, рельсы и др.) изгибаются независимо одна от другой в противоположном направлении по отношению к тому, в котором они изгибаются от рабочей нагрузки. Затем под нагрузкой с помощью сварки оба элемента объединяются, образуя балки. После снятия предварительного усилия X_{ps} элементы стремятся вернуться в свое первоначальное положение, но сварка препятствует этому. В результате в балке создается уравновешенная система предварительных напряжений (рис.13.23). В рабочее положение такая балка устанавливается выгибом вверх, возникшие предварительные напряжения в поясах имеют противоположный знак по отношению к напряжениям от эксплуатационных нагрузок. Благодаря этому в балке в упругой стадии работы несущая способность повышается почти до предельной, характерной для момента образования шарнира пластичности.

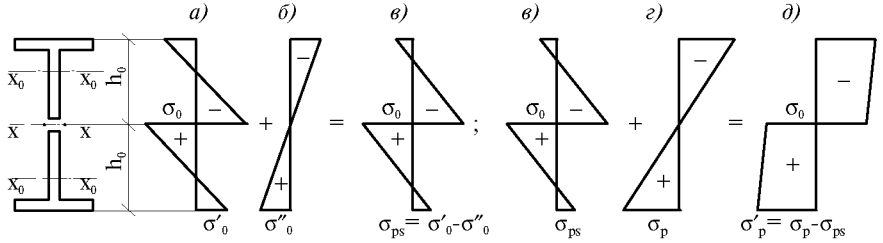


Рис.13.23. Эпюры нормальных напряжений в предварительно изогнутой балке

а – от предварительного изгиба самостоятельных элементов (полусечений) σ_0; *б* – при снятии предварительного усилия; *в* – предварительные напряжения σ_{ps}; *г* – от внешней нагрузки на объединенное сечение; *д* – результирующие напряжения

Изготовление таких балок удобнее всего осуществлять на заводах металлоконструкций. Для этого можно использовать приспособления типа сварочных кантователей. Длина балок из условия перевозки и изготовления 12–15 м. Эффективность – экономия металла составляет 3–7 %. Применение таких конструкций оправдано при отсутствии возможностей для изготовления сварных двутавров. Модификацией этого метода является предварительное растяжение одного полусечения с последующим объединением их в целое под нагрузкой.

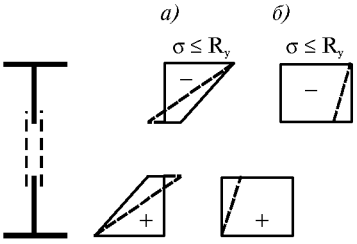


Рис.13.24. Эпюры нормальных напряжений в поясах составной балки (пунктиром показаны возможные границы)

а – без предварительного изгиба; *б* – суммарная от предварительного изгиба и нагрузки

Метод предварительного выгиба поясов может быть использован в составных стержнях, в которых пояса под действием предварительной нагрузки объединяют в балку с помощью планок или решетки. Так как высота таких балок невелика (1/15–1/20 пролета), то напряжения в поясах распределяются неравномерно, уменьшаясь к оси балки (рис.13.24). Благодаря предварительному выгибу можно достичь полного использования несущей способности еще в упругой стадии работы. Увеличение несущей способности достигает при поясах из тавров до 32 %, из прямоугольных сварных труб до 28 %, из швеллеров, расположенных стенкой наружу, до 9 %. Предварительный изгиб осуществляется так же, как в балках со сплошным сечением.

13.3.2. Балки с предварительно вытянутыми стенкой или одним из поясов. Такие балки получили также название бестросовые (беззатяжные) предварительно напряженные балки. В двутавровой балке несимметричного сечения нижний пояс, выполненный из более прочной стали, предварительно растягивается, а затем приваривается к остальной части сечения. Таким образом он исполняет роль затяжки. В балке создается система предварительных напряжений (рис.13.25). Чтобы стенка не потеряла местную устойчивость в процессе предварительного напряжения, ее гибкость должна быть $\lambda \le 110$. Наиболее технологичным методом предварительного напряжения для таких балок является нагрев пояса или стенки (газопламенный, токами высокой частоты, инфракрасный и др.).

Экономия стали при соотношении прочности пояса и стенки 1,5–2,5 около 8–17 % по сравнению с обычной сварной моностальной балкой базовой прочности. Такого же эффекта можно добиться предварительным сжатием верхнего пояса, нагревом одновременно стенки и второго пояса. Самостоятельно верхний пояс по существу не сжимается, он сжат в объединенном сечении, поэтому заботиться о его устойчивости (исключая местную) не приходится (рис.13.26).

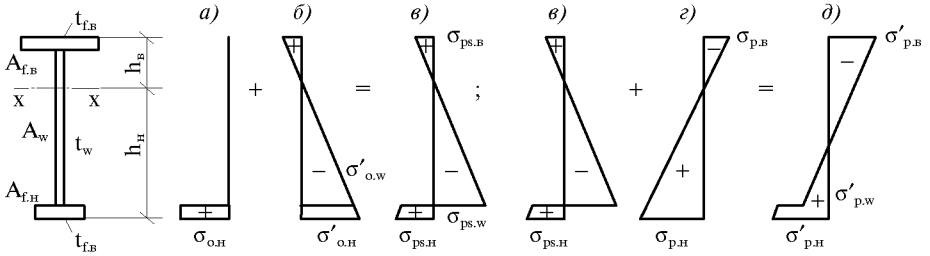


Рис.13.25. Эпюры нормальных напряжений в балке с предварительно растянутым нижним поясом
а – при натяжении пояса при сборке балки σ_0; *б* – при снятии предварительного усилия (при остывании пояса); *в* – предварительные напряжения σ_{ps}; *г* – от нагрузки; *д* – суммарная

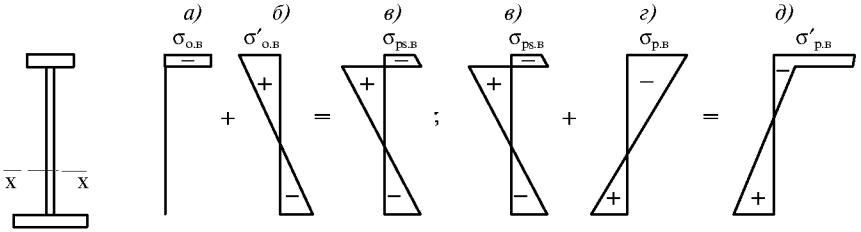


Рис.13.26. Эпюры нормальных напряжений в балке с предварительно сжатым поясом
а – при сжатии пояса (напряжение σ_0); *б* – при снятии предварительного усилия (остывание пояса); *в* – предварительные напряжения σ_{ps}; *г* – от нагрузки; *д* – суммарная

В таких балках необходимо предусмотреть мероприятия по обеспечению общей устойчивости. Возможна, также реализация комбинированного нагрева - стенки на температуру T, а нижнего пояса - на $2T$. Тогда после предварительного напряжения верхний пояс окажется сжатым, а нижний растянутым.

Балки становятся тем эффективнее, чем тоньше стенка, в то же время необходимо обеспечить местную устойчивость стенки. Этого можно добиться, если допустить ограниченное пластическое деформирование стенки в процессе предварительного напряжения. В результате нагрева стенки и нижнего пояса и затем присоединения верхнего пояса в стенке возникнут только растягивающие предварительные напряжения (рис. 13.27). Гибкость стенки может быть повышена до $\lambda_w =$ = 250...300. Нужно учитывать, что сварочные напряжения несколько снижают предварительные растягивающие напряжения и, если не обеспечить нужную температуру при нагреве, они могут вызвать потерю местной устойчивости стенки. Такие балки обеспечивают дополнительную экономию металла до 8-9 % по сравнению с балками с гибкими стенками без предварительного напряжения.

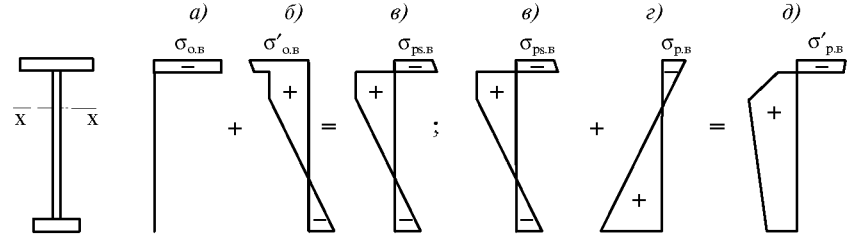


Рис.13.27. Эпюры нормальных напряжений в балке с предварительным пластическим деформированием стенки
а – при сжатии пояса; *б* – при снятии предварительного усилия; *в* – предварительные напряжения σ_{ps}; *г* – от нагрузки; *д* – суммарная

13.3.3. Колонны с предварительно растянутыми стенками. В центрально- и внецентренно- сжатых колоннах, в ветвях сквозных колонн в основном применяются сварные двутавры с весьма толстыми стенками ($\lambda_w \le 60...70$) из-за необходимости обеспечения их местной устойчивости. Предварительное напряжение повышает эффективность колонн. Сравнительно тонкая стенка ($\lambda_w = 120...150$) из обычной стали подвергается нагреву и приваривается к поясам из стали повышенной прочности. После остывания стенка остается растянутой, пояса сжаты. Под нагрузкой стенка работает в области напряжений $\sigma \le \sigma_{ps} + \sigma_{cr}$ (σ_{ps} – предварительное напряжение, σ_{cr} – критическое напряжение для стенки). В таких колоннах также надо учитывать падение предварительных напряжений из-за влияния сварочных напряжений. Благодаря предварительному напряжению расход металла на колонну может быть уменьшен до 10 %.

13.3.4. Неразрезные конструкции со смещением уровня опор. Регулирование рационально осуществлять в двухпролетных и в трехпролетных (при разных крайних и среднем пролете) балках и фермах. При регулировании уровня опор представляется возможность выравнять изгибающие моменты в пролете и на промежуточных опорах и обеспечить постоянство сечений балок, либо поясов ферм. Как правило, конструкции смещаются вниз на промежуточных опорах. Если же конструкции смещаются вверх (вниз на крайних опорах), то снижаются пролетные моменты вследствие роста опорных на коротких участках. При сборке балок следует предусматривать скосы, чтобы после смещения балка становилась сравнительно ровной (рис.13.28).

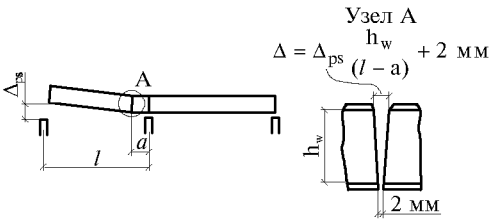


Рис.13.28. Устройство скосов с стенках балок в монтажных стыках

Неразрезные фермы со смещением уровня опор могут использоваться в качестве стропильных систем. В этих фермах следует позаботиться об устойчивости приопорных панелей нижних поясов в плоскости – постановкой дополнительных стоек и из плоскости – дополнительных распорок.

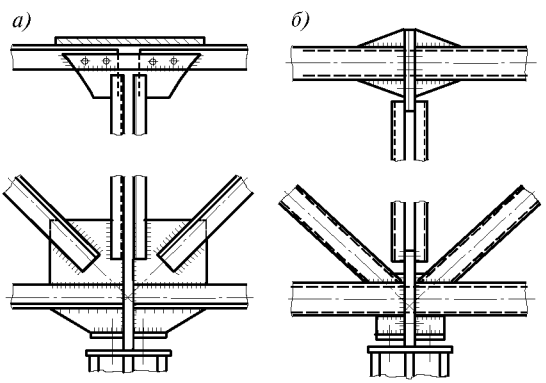


Рис.13.29. Монтажные узлы неразрезных ферм над промежуточными опорами
а – с монтажной сваркой; *б* – на фланцах

При установке ферм возможны два варианта – либо подъем всей фермы на два-три пролета, либо попролетный монтаж. В первом случае монтажные узлы размещаются в пролете и не отличаются от обычных решений. Во втором случае монтажные узлы размещаются на промежуточных опорах, неразрезность создается после установки ферм. Особенность узла – пересечение двух значительных силовых потоков: одного по поясу, второго от опоры к раскосам. Наиболее технологичное решение – на фланцах с высокопрочными болтами (рис.13.29).

Операция смещения уровня опор осуществляется несколькими способами:

- созданием разности в отметках опорных площадок колонн, установкой балок или ферм, замером фактических зазоров между опорной площадкой колонны и опорной плитой (торцом опорного ребра) балки или фермы, установкой прокладки необходимой толщины так, чтобы в чистоте остался расчетный зазор, закрытием зазора, закручиванием гаек на анкерных болтах. Связь между расчетным смещением (Δ_{ps}) и замеренным зазором (δ) вычисляется по формуле

$$\Delta_{ps} = \delta + \Delta_{св} - t,$$

где $\Delta_{св}$ – расчетный прогиб от собственного веса конструкции на опоре, где производится смещение; t – толщина прокладки;

- то же, но смещением под действием собственного веса элементов или плит, опирающихся на неразрезную конструкцию;
- при попролетном монтаже установкой прокладки с толщиной, равной расчетному смещению Δ_{ps}, после создания неразрезности отрыв конструкции на 1–2 мм, чтобы вытащить прокладку. Для ферм опускание, кроме крана, можно осуществить другими способами (рис.13.30);

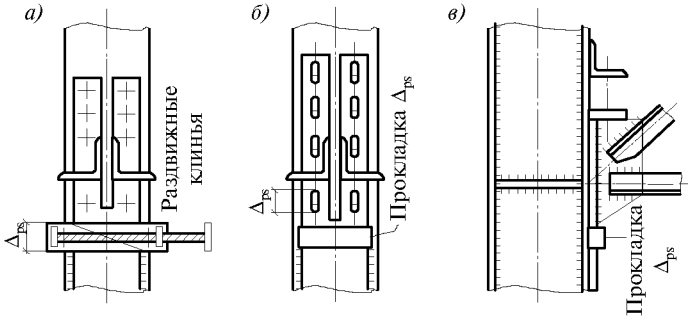


Рис.13.30. Приспособления для регулирования уровня опор
а – раздвижные клинья; *б* – прокладки, овальные дыры; *в* – прокладки, натяжные болты

- подъемом конструкции с помощью домкратов и установкой прокладок с толщиной, равной расчетному смещению Δ_{ps}.

Неразрезные конструкции с регулированием напряжений обеспечивают экономию металла по сравнению с разрезными из металлов той же прочности до 12–25 %, в том числе вследствие неразрезности около 2/3–3/4 и остальное – в результате регулирования напряжений. Трудоемкость осуществления регулирования напряжений составляет всего 1–5 % общих трудозатрат на монтаже и является минимальной по сравнению со всеми другими методами регулирования напряжений.

Неразрезные конструкции с регулированием, рассчитанные с учетом неравномерной осадки оснований, рекомендуется применять в том случае, если экономия металла составляет по сравнению с разрезными не менее 8–10 %, а затраты на укрепление оснований и фундаменты не превышают аналогичных затрат при разрезных конструкциях.

Неразрезные двухпролетные балки со смещением уровня опор рекомендуется применять в качестве: подкрановых при пролетах 6–12 м при кранах грузоподъемностью 30 т и выше и при пролетах более 12 м при кранах грузоподъемностью 20 т и выше; ригелей рам производственных и других зданий постоянной высоты сечения при пролетах 18–24 м и с увеличенной высотой сечения в зоне промежуточной опоры при пролетах 36 м и более; пролетных строений эстакад при пролетах 12–18 м и более; главных балок рабочих площадок при пролетах 12 м и более; хребтовых балок специальных зданий.

Неразрезные двухпролетные фермы со смещением уровня опор рекомендуется применять в качестве: стропильных при пролете 24 м и более с параллельными поясами и высотой не менее 1/20 пролета при $[f/l]=1/250$ и 1/14 пролета при $[f/l]=1/400$; подстропильных ферм при пролете 12 м и более; подкрановоподстропильных ферм; пролетных строений конвейерных мостов при пролете 24 м и более; стропильных ферм большепролетных покрытий и др.

Трехпролетные неразрезные балки и фермы с регулированием напряжений методом смещения уровня опор рекомендуется применять в покрытиях зданий, пролетных строениях галерей только при наличии трех пролетов, причем наибольший эффект от регулирования напряжений достигается при уменьшенных крайних пролетах.

Наиболее выгодно применение неразрезных схем с регулированием напряжений в конструкциях из стали повышенной и высокой прочности. При норме прогиба 1/250 в двухпролетных балках переход на более прочные стали оправдан при относительных нагруженностях μ_0 изгибающим моментом ($\mu_0 = M_0/R_{y0}l$, где M_0 – изгибающий момент в аналогичной разрезной балке, $R_{y0}=235$ МПа – для базовой стали) при $\mu_0 \geq 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ и для $[f/l]=1/500$ при $\mu_0 \geq (3...4) \cdot 10^{-6}$.

Значительный эффект неразрезные системы дают за счет снижения их высоты, сокращения объема здания и затрат в связи с этим на стены, отопление и вентиляцию. Примеры зданий с неразрезными конструкциями, подвергнутыми смещению уровня опор, приведены на рис.13.31, 13.32.

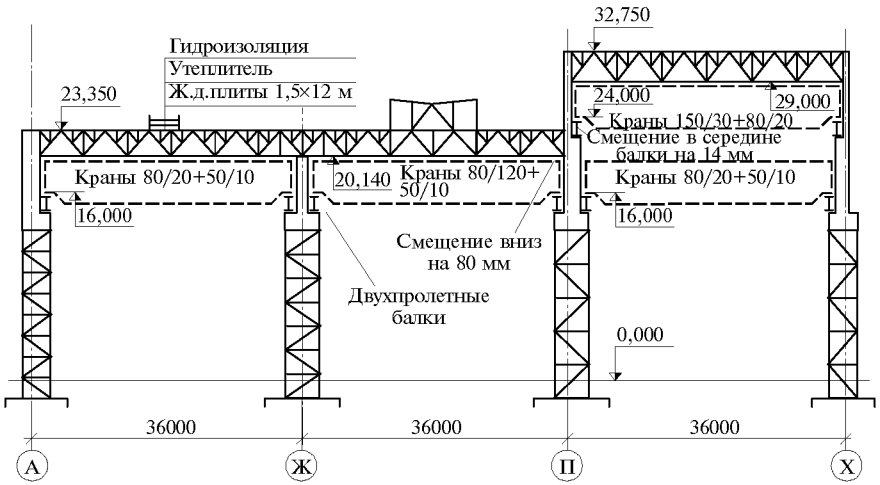


Рис.13.31. Поперечный разрез главного корпуса Новосибирского завода электротермического оборудования

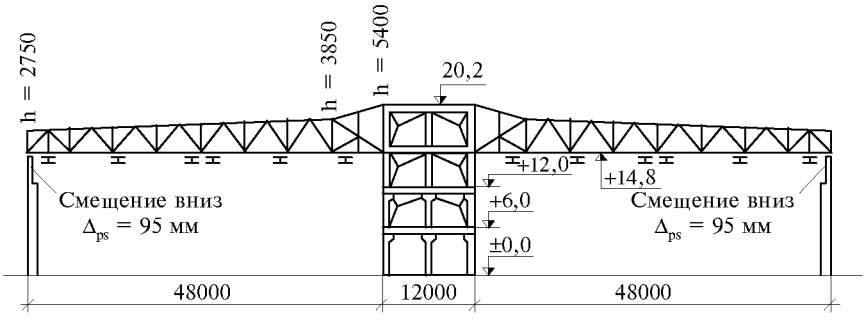


Рис.13.32. Ангары в Иркутске и Арсеньеве

13.3.5. Рамы и арки со смещением опор в горизонтальном направлении. Та же идея регулирования изгибающих моментов благодаря искусственному изменению величины распора заложена в методе смещения опор в рамах и арках в горизонтальном направлении. Смещение осуществляется в результате натяжения затяжки с помощью домкратов, либо завинчиванием гаек. Затяжка размещается ниже отметки пола. При опирании арки на скальное основание смещение может быть произведено домкратами с заполнением образовавшегося зазора, прокладками расчетной толщины.

13.3.6. Системы с введенными дополнительно опорами или шарнирами в процессе монтажа. Регулирование эпюр изгибающих моментов и поперечных сил может быть осуществлено изменением конструктивной схемы сооружения в процессе монтажа. Наиболее простые приемы – обеспечить работу конструкции на собственный вес по одной схеме, а на эксплуатационные нагрузки по другой. Например, при монтаже трехпролетного неразрезного покрытия балки или фермы переменной высоты в пределах среднего пролета могут монтироваться по частям самостоятельно, работая как консоли с вылетом, равным половине среднего пролета. Изгибающие моменты концентрируются в зоне промежуточных опор, где наибольшие высота и мощность сечения. После этого обеспечивается замыкание и на все последующие нагрузки конструкция работает как неразрезная.

Такого же эффекта можно достичь, вводя временные шарниры. На часть нагрузок система работает с учетом этих шарниров, в соответствии с этой схемой распределяются изгибающие моменты и поперечные силы. Затем шарниры замыкаются – на пояса устанавливаются накладки. На оставшиеся нагрузки система работает по иной схеме (рис.13.33). Введение временной опоры позволяет эффективно использовать несущую способность железобетонных плит, входящих в состав комбинированных конструкций.

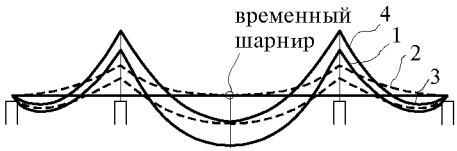


Рис.13.33. Эпюры изгибающих моментов в неразрезной балке

1 – без временного шарнира; *2* – от постоянных нагрузок при введении временного шарнира; *3* – от полезных нагрузок после закрытия шарнира; *4* – суммарная эпюра

13.3.7. Стягивание или расклинивание смежных сечений. В статически неопределимых системах можно изменять напряженное состояние путем стягивания или расклинивания сечений смежных балок (ферм). В смежных элементах устраиваются скосы смежных балок (ферм). В поясах имеются расчетные зазоры, которые должны быть ликвидированы, благодаря стягиванию сечений смежных балок (ферм). В этом случае в опорах возникают реакции, а в балке предварительные изгибающие моменты. Расклиниванием сечений смежных элементов можно также создать системы предварительных изгибающих моментов, но противоположного знака.

13.3.8. Неразрезные, консольные, рамные конструкции с частичным пригрузом или разгрузкой. В таких системах временно в процессе монтажа можно вводить дополнительную нагрузку (балласт), которая будет создавать изгибающие моменты и поперечные силы. В результате этого можно достичь оптимальной эпюры изгибающих моментов.

13.3.9. Плиты и оболочки с растянутыми тонкими листами. В трехслойных плитах или элементах оболочек два слоя выполняются из тонкого стального или алюминиевого листа. На сжатие такие листы работать не могут, поэтому выполняют только ограждающие функции. Будучи предварительно растянутыми, эти листы в состоянии воспринимать сжимающие усилия. Натяжение листов можно осуществлять приваркой их к изогнутым элементам каркаса с последующим их выпрямлением и соединением по нейтральной оси болтами в плоскости листа, рычагом, стяжным болтом (рис.13.34). Крепление листов к каркасу осуществляется точечной сваркой, самонарезающими винтами со специальными шайбами, обеспечивающими плотность соединения.

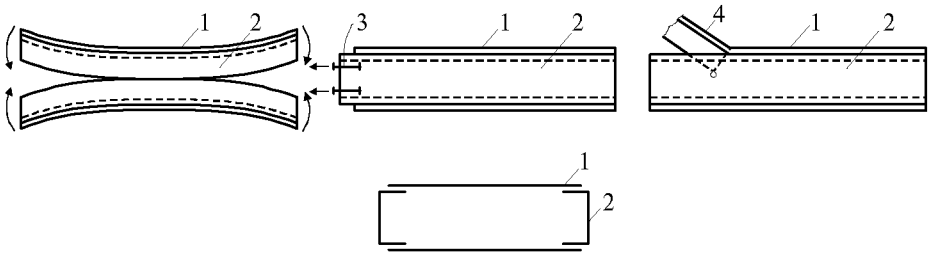


Рис.13.34. Предварительное напряжение в панелях

а – с помощью изгиба; *б* – натяжением болтов, прикрепленных к листам; *в* – рычагом; *г* – разрез панели; *1* – обшивка; *2* – бортовые элементы (каркас) панели; *3* – натяжные болты; *4* – натяжной рычаг

13.4. Использование предварительного напряжения при реконструкции

При реконструкции зданий и инженерных сооружений, связанной с изменением условий эксплуатации или ростом нагрузок от технологического оборудования, возникает необходимость усиления несущих конструкций. В широком смысле любое усиление есть регулирование напряжений в эксплуатируемой конструкции, ибо после усиления в конструкции будет возникать иное напряженное состояние по сравнению с тем, которое возникло бы, если бы усиление не проводилось.

В п.13.1 указаны методы, используя которые можно регулировать напряжения в несущих системах в процессе их реконструкции. На рис.13.35 приведена схема классификации методов регулирования напряжений. Наиболее активными, а иногда и единственно доступными, являются методы предварительного напряжения. Достоинства этих методов состоят в том, что:

- усиление может в большинстве случаев производиться без разгрузки и без остановки технологического процесса;
- по сравнению с методом увеличения сечений не требуется большого количества деталей усиления, а их закрепление производится в узлах;
- возрастает надежность всей конструкции, так как нередко в процессе осуществления предварительного напряжения повышается степень статической неопределимости ее расчетной схемы;
- увеличивается область упругой работы усиленной конструкции.

При реконструкции, так же как и во вновь возводимых конструкциях, предварительное напряжение осуществляется либо введением высокопрочных затяжек или шпренгелей, либо другими методами.



Рис.13.35. Классификация методов регулирования напряжений при реконструкции

Разнообразные способы и схемы предварительного напряжения разрабатываются на основании результатов обследования и проекта усиления конструкций. Созданию предварительного напряжения на усиливаемые конструкции должна предшествовать установка деталей крепления анкерных и натяжных устройств, связей, диафрагм, фиксаторов и других элементов, необходимых для обеспечения устойчивости конструкций при их усилении.

В балках, сплошностенчатых ригелях рам используются затяжки, размещаемые вдоль растянутого пояса. Благодаря натяжению затяжек создается изгибающий момент, противоположный по знаку моментам от постоянных и временных нагрузок. Размещение затяжки в пределах высоты конструкции несколько снижает эффект разгрузки из-за сравнительно малого плеча «*е*» (рис.13.3,*а*), но зато не уменьшается рабочее пространство здания. Затяжки могут иметь и ломаное очертание и выводиться на верхний пояс для удобства их натяжения. В фермах эти затяжки могут размещаться по бокам, либо между двумя фермами в блоке. В рамах и арках вновь введенные затяжки могут разгрузить пролетные зоны (рис.13.5,*б*,*д*).

В зданиях и сооружениях, в которых габариты усиливающих элементов не лимитируются, разгрузку и повышение несущей способности можно осуществить с помощью предварительно напряженного шпренгеля (рис.13.3,*е*,*ж*; 13,4,*в*). Плечо разгружающего момента увеличивается и при сравнительно небольших усилиях предварительного напряжения, создаваемого с помощью фаркопфов, натяжных муфт, домкратов, электроразогрева и др., несущая способность конструкции повышается.

Предварительно напряженные тяжи могут играть роль дополнительных упругих опор, причем они воспринимают сжимающие усилия до тех пор, пока остаются растянутыми (рис.13.36). Например, в системе с двумя консолями для разгрузки пролета и снижения его деформативности консоли загружаются временными грузами X_{ps}. В этом состоянии к ним присоединяются тяги, которые удерживают консоли от возвращения в свое первоначальное положение после удаления груза. В пролете останутся изгибающие моменты, обратные по знаку моментам от полезных нагрузок, а на концах консолей появились упругие опоры.

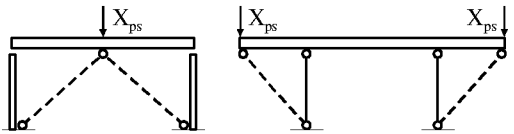
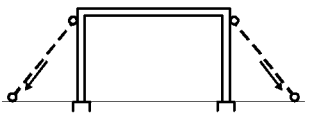


Рис.13.36. Введение дополнительных опор после нагружения балок силами

Применение гибких предварительно напряженных элементов позволяет повысить устойчивость сжатых и сжато-изогнутых элементов способом уменьшения расчетной длины. Устойчивость рамы может быть повышена благодаря постановке предварительно напряженных оттяжек (рис.13.37). Рама получает в уровне ригеля дополнительную упругую опору, в результате ее горизонтальное смещение резко снизится, уменьшится в 1,5–2 раза и расчетная длина. Если обе оттяжки предварительно не растянуть, то они будут работать поочередно, если же они предварительно напряжены, то включаются в работу одновременно и эффективно.


Рис.13.37. Предварительно напряженные оттяжки в усиливаемой раме

При необходимости увеличить несущую способность цилиндрических резервуаров на них может быть навита предварительно напряженная высокопрочная проволока или лента. При полной разгрузке резервуара цилиндрическая оболочка сжимается до определенного уровня напряжений, а далее при нагружении будет работать усиленный резервуар.

В условиях действующих предприятий предпочтительны механические способы создания предварительного напряжения. В этом случае применяют установки с гидравлическими домкратами, динамометрические ключи, винтовые распорки и стяжки, тяжи, полиспасты, тали, а также используют пригруз и различные распорные устройства. Выбор средств натяжения зависит от требуемого усилия натяжения, конструктивных форм затяжек и производственных возможностей. Если для создания больших усилий применяют толкающие гидравлические домкраты, то для создания небольших усилий можно использовать тяжи, стяжки, тали и тянущие домкраты.

Уровень напряжений контролируют по значению усилия в домкратах, фиксируемого показаниями манометра, и по удлинению затяжки, регистрируемому прогибомерами. После натяжения, контроля и фиксации затяжки натяжное устройство демонтируется.

Регулирование напряжений может быть осуществлено и без высокопрочных элементов. В некоторых конструкциях весьма эффективно использование контргруза. Например, для разгрузки балки или фермы на консолях подвешивается контргруз, создающий изгибающий момент на опорах. В рамах к наружным узлам можно подвесить стены, которые также своим весом будут разгружать пролет.

Весьма технологичным приемом разгрузки эксплуатируемых подкрановых балок является использование распорных устройств с контргрузом. К нижним поясам балок прикладывается продольное усилие S_0, выгибающее каждую балку вверх (рис.13.38). Между соседними балками вложены специальные вкладыши, обеспечивающие передачу усилия от балки к балке. В крайних панелях устанавливаются связи, обеспечивающие передачу распора на основание. Описанный способ весьма прост и технологичен: сила распора, обеспечивающая выгиб балок, легко контролируется и может при необходимости изменяться

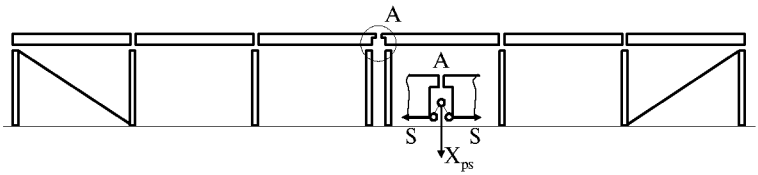


Рис.13.38. Разгрузка подкрановых балок

Предварительный выгиб конструкций используется при подведении под них новых поддерживающих конструкций. Если не распереть их, то поддерживающая система будет работать лишь как страховочная. Приподняв конструкцию с помощью домкратов и закрыв образовавшийся зазор между ними, можно затем, сняв домкраты, сразу же включить в работу поддерживающую конструкцию.

В неразрезных системах предварительное напряжение может осуществляться путем изменения уровня опор. Например, к двухпролетной стропильной балке предстоит подвеска нового технологического оборудования, в результате чего пролетные сечения оказываются перенапряженными. В этом случае удобно с помощью домкратов поднять балку на средней опоре, а в образовавшийся зазор нужной величины установить прокладку. В результате пролетная часть будет разгружена и балка может эксплуатироваться в новых условиях без увеличения сечения.

Для разгрузки колонн или стоек можно использовать способ подведения предварительно сжатого стержня. Этот стержень, например, труба *1*, вставляется в другую трубу *2*, несколько короче первой, и закрепляется на общей опорной плите *3* (рис.13.39,*а*). Наружная труба нагревается, удлиняется и приваривается к общей

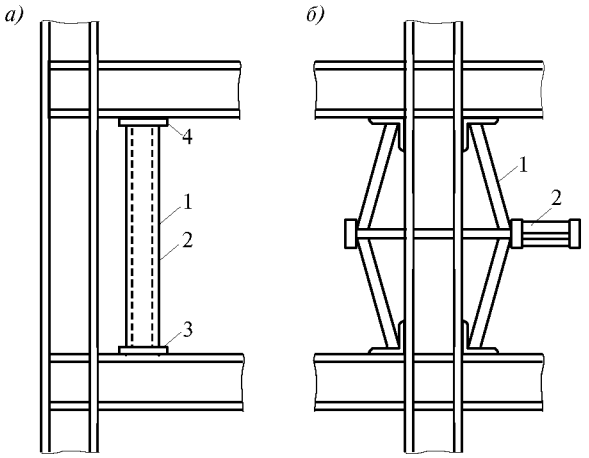


Рис.13.39. Разгрузка сжатых и сжато-изогнутых колонн
а – с помощью предварительно сжатой трубы;
б – с помощью стягиваемых распорок

верхней плите *4*. Остывая, наружная труба сжимает внутреннюю, выполняя функцию своеобразного «теплового» домкрата. Объединенные трубы устанавливаются рядом с перегруженной колонной, подклиниваются до полного соприкосновения с верхней и нижней конструкциями. Далее наружная труба разрезается, а внутренняя, стремясь вернуться в свое первоначальное положение разгрузит колонну. Затем наружную трубу можно вновь заварить с тем, чтобы при последующих нагружениях и она включилась в работу. Разгрузить перегруженную колонну можно стягиванием распорных усиливающих стержней *1* (рис.13.39,*б*). После стягивания домкратом *2* эти стержни с помощью сварки и хомутов крепятся к основному стержню, образуя с ним единое целое.

В статически неопределимую систему можно ввести дополнительный изгибающий момент путем стягивания или расклинивания соседних сечений элемента. Например, в раме из сварных двутавров оказались перегружены опорные зоны колонн и пролетная часть ригеля (рис.13.40). Необходимо уменьшить изгибающие моменты. В лишней связи – в ригеле, желательно в зоне с небольшим моментом, устанавливается гидравлический домкрат для стягивания соседних сечений. Благодаря этому возникнет новая система изгибающих моментов и продольных сил, которая затем, суммируясь с действующими усилиями, видоизменит их.

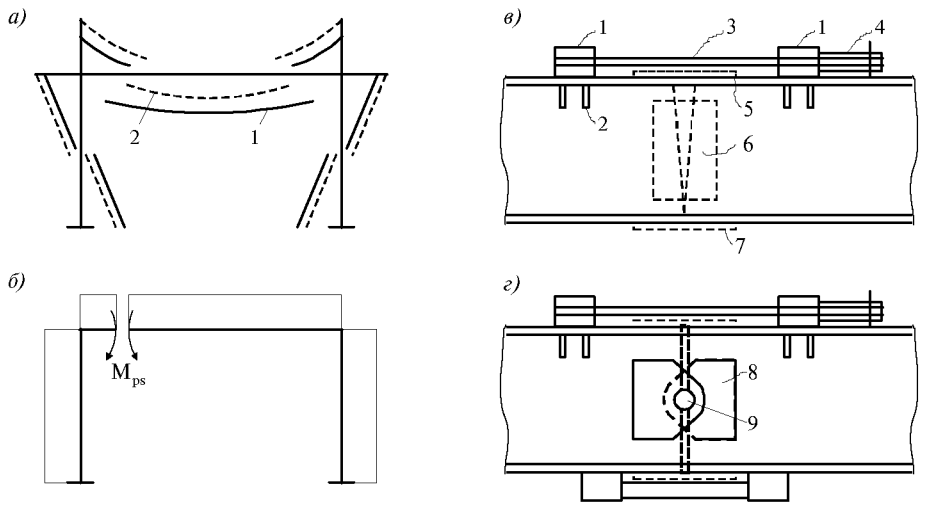


Рис.13.40. Регулирование изгибающих моментов методом стягивания и расклинивания
а – эпюры изгибающих моментов: *1* – до регулирования; *2* – после регулирования;
б – эпюры от введенного момента M_{ps}; *в* – узел стягивания соседних сечений;
г – узел вращения соседних сечений

В выбранном месте устанавливаются на болтах упоры *1* и дополнительная накладка на нижний пояс *7*, затем тяги *3* и домкрат *4* (рис.13.40,*в*). Места под упорами рекомендуется укрепить короткими ребрами жесткости *2*. После включения домкрата в работу сечение балки клинообразно разрезается газом. Поперечная сила в этот момент воспринимается нижним поясом и накладкой, а изгибающий момент домкратной тягой и нижним поясом. Далее концы ригеля стягиваются с определенным усилием, поворачиваясь вокруг нижнего пояса, после чего устанавливаются накладки *5* и *6*, а домкрат и упоры снимаются. Если ввести только изгибающий момент, т.е. не допустить смещения по оси ригеля, то в стенке ригеля делается вырез, устанавливаются накладки *8* и цилиндрический вкладыш *9*. Домкраты устанавливают на двух поясах и также поворачивают сечение после разрезки (рис.13.40,*г*).

13.5. Общие положения по расчету предварительно напряженных конструкций

Расчеты предварительно напряженных конструкций целесообразно проводить, принимая за исходное (по геометрии и усилиям) состояние системы после завершения ее монтажа (сборки), под действием некоторой части (или всей) расчетной постоянной нагрузки. От этого состояния расчеты ведутся в двух направлениях: в сторону рассмотрения всех сочетаний воздействий для стадии эксплуатации объекта и в обратном направлении – до полной разборки системы на ненагруженные монтажные блоки и элементы. Далее, если предварительное напряжение выполнялось и на уровне элементов, то расчеты проводятся до этапа разгрузки напряженного элемента на отдельные детали.

Такой порядок расчета гарантирует исчерпывающий анализ геометрии конструкции и дает полное представление о ее напряженно-деформированном состоянии на любом этапе монтажа и эксплуатации. При этом проще учитывать допуски и погрешности сборки системы, проявление и развитие реологических свойств несущих элементов, историю ремонтов и реконструкции. Применение «обратного» подхода к анализу монтажных состояний позволяет обоснованно проводить коррекцию сборки и регулировку усилий на любом ее промежуточном этапе по данным контрольных измерений усилий, реакций и перемещений с позиций гарантированного входа в коридор нормативных допусков на готовую к эксплуатации конструкцию.

Нормативные проверки прочности и устойчивости должны выполняться для каждого этапа монтажа, поскольку в промежуточных состояниях система обладает меньшей жесткостью, большей изменяемостью, что нередко приводит к потребности в установке дополнительных монтажных элементов, связей и к специальной программе регулирования внутренних усилий.

Особенностью расчета предварительно напряженных конструкций является то, что в состоянии, принятом за исходное, в статически неопределимой системе могут быть заданы все усилия в «лишних» связях. Задание этих усилий может быть предметом решения задачи оптимизации объекта по любому критерию качества или по совокупности таких критериев.

Одна из основных целей расчета – выбор величины предварительного напряжения (регулирования напряжения) либо параметра, его характеризующего (усилия натяжения затяжки, смещение на опоре, величина нагрева элемента и т п.). Эти параметры определяются прежде всего из условия обеспечения наибольшей эффективности конструкции – минимальной металлоемкости, стоимости «в деле» или при-

веденных затрат. Задача относится к классу оптимизационных и решается различными математическими методами, в том числе линейным или нелинейным программированием. В некоторых случаях параметры регулирования определяются из условия удобства конструирования, изготовления или монтажа, например обеспечения постоянства сечения на всей длине и т.д.

Необходимо учитывать возможные потери предварительных напряжений по разным причинам: обмятие поверхностей анкеров, релаксацию в высокопрочных проволоках, возникновение температурных напряжений при остывании и др.

Рекомендуются следующие значения коэффициентов надежности по нагрузке при предварительном напряжении γ_{fps} (табл.13.1). Так как предварительные напряжения могут совпадать по знаку с напряжениями от рабочих нагрузок, а чаще имеют противоположный знак, то одинаково опасно допустить при предварительном напряжении перегрузку и недогрузку. Поэтому устанавливаются два уровня коэффициентов надежности – $\gamma_{fps\max}$ и $\gamma_{fps\min}$.

Таблица 13.1. Рекомендуемые коэффициенты надежности по нагрузке при регулировании напряжений

Коэффициент надежности по нагрузке	Натяжение с помощью домкратов			Смещение в неразрезных конструкциях		Натяжение нагревом
	При образцовых манометрах	Другие гидродомкраты	Другие домкраты	при непросадочных основаниях	при обычных основаниях	
$\gamma_{fps\max}$	1,02	1,05	1,1	1,1	1,2	1,1
$\gamma_{fps\min}$	0,98	0,95	0,9	0,9	0,8	0,9

В металлических конструкциях можно указать следующие причины потерь в усилиях предварительного напряжения:

из-за релаксации напряжений высокопрочной проволоки;

из-за обмятий анкеров и шайб в опорных узлах;

из-за трения затяжек в огибающих приспособлениях;

из-за неравномерной осадки оснований под опорами неразрезных конструкций (учитывается коэффициентом надежности по нагрузке);

из-за возникновения температурных напряжений после сварки;

из-за проявления реологических эффектов в бетоне комбинированных конструкций.

Потери от релаксации в высокопрочной проволоке составляют 5 % напряжений ($\sigma_{\text{п}}=0{,}05$). Потери от обмятий анкеров, шайб, прокладок и др.

$$\sigma_{\text{п}2}=(0{,}42/l_3)\sigma_3,$$

где l_3 – длина элемента из высокопрочных проволок, м.

При l_3 = 12...60 м $\sigma_{\text{п}2}=(0{,}035...0{,}007)\sigma_3$.

Потери из-за трения в огибающих приспособлениях

$$\sigma_{\text{п}3}=(1-1/e^{0{,}25\theta})\sigma_3,$$

где θ – суммарный угол поворота оси затяжки, рад.

В балках с высотой 1/12 пролета

$$\sigma_{\text{п}3}\cong 0{,}04\sigma_3.$$

Суммарные потери напряжений рекомендуется учитывать интегральным коэффициентом потерь напряжений (табл.13.2)

Таблица 13.2. Рекомендуемые результирующие коэффициенты, учитывающие потери в усилиях предварительного напряжения

Коэффициент	При прямолинейных затяжках		При криволинейных затяжках		Из-за влияния сварочных напряжений на нагретую стенку балки при сварке	
	l_3=12 м	l_3=60 м	l_3=12 м	l_3=60 м	полуавтоматической и автоматической	ручной
K_n	0,92	0,94	0,88	0,9	0,85	0,75

Примечание. Для l_3 в пределах 12–60 м – по интерполяции.

$$K_n = 1 - (K_{n1} + K_{n2} + K_{n3}).$$

Коэффициент K_n вводится к величине усилия или напряжений.

13.6. Методики расчета и оптимизации предварительно напряженных конструкций

13.6.1. Группа конструкций, у которых предварительное напряжение осуществляется с помощью натяжения высокопрочных элементов. *Расчет растянутых стержней, предварительно сжатых затяжками.* В качестве примера такого стержня может быть принят нижний пояс ферм (см. рис.13.4,*а*) с площадью A. Проверка на первом этапе работы (предварительное сжатие стержня затяжкой):

устойчивость стержня

$$K_n \gamma_{fps\max} X_{ps} / (\varphi A R_y \gamma_c) \le 1, \qquad (13.1)$$

где X_{ps} - усилие предварительного натяжения затяжки; φ - коэффициент устойчивости сжатого стержня, определяющийся в зависимости от длины участка стержня, удерживаемого от поперечных смещений.

Проверки на втором этапе работы - после приложения всех нагрузок:

прочность стержня

$$[N_{p\max} - K_n(\gamma_{fps\min} X_{ps} + X_p)] / (A R_y \gamma_c) \le 1 \qquad (13.2)$$

и прочность затяжки с площадью A_3

$$K_n(\gamma_{fps\max} X_{ps} + X_p) / (A_3 R_3 \gamma_c) \le 1\ , \qquad (13.3)$$

где $N_{p\max}$ - полное усилие в наиболее нагруженной панели нижнего пояса; X_p - доля усилия от рабочих нагрузок, воспринимаемая затяжкой (сила самонатяжения); R_3 - расчетное сопротивление материала затяжки.

Кроме того должно удовлетворяться условие равенства деформаций стержня и затяжки при действии рабочей нагрузки с учетом возможных потерь

$$\frac{K_n X_n l_3}{E_3 A_3} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(N_{pi} - K_n X_p) l_i}{EA}\ , \qquad (13.4)$$

где l_3 - длина затяжки, l_i - длина i-й панели пояса; N_{pi} - усилие в i-й панели пояса; E_3 - модуль упругости затяжки; n - число панелей пояса.

В условиях (13.1–13.4) четыре неизвестных: X_{ps}; X_p; A; A_3. Решая совместно эти уравнения, можно получить квадратное уравнение относительно A и найти его положительный корень

$$a(b-a)A^2 - \left[(2a-b)A_p + (\varphi - a)\overline{A}_p\right]A - A_p(A_p - \overline{A}_p) = 0\ , \qquad (13.5)$$

где $a = 1 + \varphi\gamma_{fps\min} / \gamma_{fps\max}$; $b = 1/\mu + \varphi$; $\mu = E_3 R_y / E R_3$;

$$A_p = N_{p\max} / R_y \gamma_c\ ;\ \overline{A}_p = \sum_{i=1}^{n} (N_{pi} l_i) / (R_y \gamma_c l_3)\ .$$

Остальные параметры выражаются через A:

$$A_3 = R_y\left[A_p + (\varphi - a)A\right] / R_3\gamma_c ; \tag{13.6}$$

$$X_{ps} = (\varphi R_y\gamma_c A) / K_n\gamma_{fps\max} ; \tag{13.7}$$

$$X_p = \sum_{i=1}^{n} N_{pi}l_i / \left[K_n l_3(1+\alpha)\right], \tag{13.8}$$

где $\alpha = (EA) / (E_3A_3)$.

Найденные площади стержня и затяжки должны быть откорректированы с учетом сортамента. Это единственное решение обеспечивает минимум затрат металла на систему «стержень–затяжка».

13.6.2. Группа конструкций, у которых предварительное напряжение осуществляется без высокопрочных элементов. *Расчет балок с предварительно изогнутыми элементами.* На первом этапе расчета проверка прочности при предварительном изгибе элементов (рис.13.23)

$$\sigma_0 = M_{ps} / 2W_0 \le R_y\gamma_c \tag{13.9}$$

или местной устойчивости стенки, если в этом есть необходимость

$$\sigma_0 \le \sigma_{cr}\gamma_c , \tag{13.10}$$

где σ_0 – начальное сборочное напряжение, σ_{cr} – критическое напряжение для стенки.

Определяется предварительное напряжение

$$\sigma_{ps} = \sigma_0\left(\frac{z_0}{h_0 - z_0} - \frac{2W_0}{W_x}\right); \tag{13.11}$$

на втором этапе производится проверка прочности всей балки

$$\frac{(M_p / W_x - \sigma_{ps})}{R_y\gamma_c} \le 1. \tag{13.12}$$

Отсюда наибольший изгибающий момент от рабочей нагрузки, который может воспринимать балка с предварительно изогнутыми поясами

$$M_p = R_y\gamma_c W_x\left(1 + \sigma_{ps} / R_y\gamma_c\right). \tag{13.13}$$

Очевидно, чем больше σ_{ps}, тем выше несущая способность балки, а σ_{ps} достигает максимального значения, если $\sigma_0 = R_y$.

Проверка на жесткость

$$\frac{f_p - f_{ps}}{l} \le \left[\frac{f}{l}\right], \tag{13.14}$$

где f_{ps} – выгиб балки, оставшийся после снятия предварительной нагрузки с балки, образованной сваркой двух элементов.

Расчет балок с предварительно вытянутыми стенкой или одним из поясов. На первом этапе расчета в балках с предварительно вытянутым нижним поясом (например, с помощью нагрева) проверяется местная устойчивость сжатой части стенки (рис.13.25).

$$\sigma_{psw} = \sigma_{cr} = \gamma_{fps\max}K_n\sigma_0\,(A_{f2}/A + A_{f2}h_2/W_{x2})(h_2 - t_{f2}/h_2) \le \sigma_{crw}\gamma_c , \tag{3.15}$$

где σ_0 – начальное сборочное напряжение, σ_{psw} – предварительное напряжение в сжатой части стенки; σ_{crw} – критическое напряжение местной устойчивости стенки как для внецентренно сжатого стержня; A, W_{x2} – площадь сечения балки и момент сопротивления для точки *2*; $\gamma_{fps\max}$ – коэффициент надежности по нагрузке (табл.13.4); K_n – коэффициент потерь напряжений (табл.13.3), остальные обозначения на рис.13.25.

Таблица 13.3. Оптимальные параметры двухпролетных балок

Конструктивный вид балки	Тип нагрузки	Сталь	$M_{оп}$	$M_{пр}$	M_{ps}	α	$h_{оп}/h_{пр}$	$J_{оп}/J_{пр}$	Масса, %
Разрезная постоянного сечения	Постоянная	1	–	0,1250	–	–	–	–	100/71
		3	–	0,1250	–	–	–	–	83
Неразрезная постоянного сечения	То же	1	0,1250	0,0703	–	–	1	1	100/71
		2	0,1250	0,0703	–	0,90	1	1	68
		3	0,1250	0,0703	–	0,90	1	1	67,5
	Переменная	1	0,1250	0,0957	–	–	1	1	100/71
		2	0,1250	0,0957	–	0,95	1	1	84,5
		3	0,1250	0,0957	–	0,95	1	1	69,5
Неразрезная постоянного сечения с регулированием напряжений	Постоянная	1	0,0905	0,0905	-0,0425	–	1	1	82/58,5
		2	0,1250	0,0705	0	0,90	1	1	68
		3	0,0812	0,0812	-0,0233	0,96	1	1	63
	Переменная	1	0,1070	0,1070	-0,0225	–	1	1	91/65
		2	0,1630	0,0901	+0,0318	0,88	1	1	82
		3	0,1250	0,0957	0	0,94	1	1	69,5
Неразрезная со ступенчатым изменением жесткости и регулированием напряжений	Постоянная	1	0,1560	0,0597	+0,0040	0,84	1	2,61	75/53
		2	0,1788	0,0555	+0,0270	0,78	1	1,84	67,5
		3	0,1650	0,0600	+0,0120	0,81	1	2,1	59,5
	Переменная	1	0,1470	0,0910	+0,0105	0,91	1	1,63	86/61,5
		2	0,1666	0,0860	+0,0326	0,87	1	1,07	81
		3	0,1545	0,0890	+0,0186	0,89	1	1,32	69
Неразрезная, с увеличенной высотой в зоне у средней опоры и регулированием напряжений	Постоянная	1	0,1767	0,0520	+0,0052	0,77	1,85	6,35	64/46
		2	0,1645	0,0569	+0,0058	0,81	1,26	2,02	63
		3	0,1709	0,0548	+0,0082	0,795	1,54	3,65	52
	Переменная	1	0,2560	0,0680	+0,0559	0,69	1,94	7,27	78,5/56
		2	0,2377	0,0720	+0,0644	0,73	1,35	2,45	76,5
		3	0,2460	0,0710	+0,0592	0,71	1,63	4,30	64,5

Примечания. I. Балка загружена равномерно распределенной нагрузкой в пределах двух пролетов (постоянной p и временной q) или только временной в пределах либо двух, либо одного пролета. Все другие схемы нагружения находятся между этими граничными случаями. К значениям изгибающих моментов вводится множитель $(p+q)l^2$. II. Сталь в графе 3 таблицы: 1 – балки из стали С235 или С440 (показатели массы – за чертой); 2 – пролетная часть из стали С235, надопорная вставка из стали С440; 3 – пролетная часть бистальная (пояса из стали С345, стенка из стали С235), надопорная часть также бистальная (пояса из С440, стенка из С345). III. Знак "плюс" при M свидетельствует о смещении балки вверх на средней опоре, знак "минус" – вниз.

Таблица 13.4. Оптимальные параметры сечения балки

R_{y2}/R_{y1}	σ_0'/R_{y1}	h_2/h_1	A_w/A	B	Э, %
1,69	1,45	1,1	0,4	2,347	10,5
1,9	1,6	1,3	0,35	2,313	11,8
2,45	1,68	1,6	0,4	2,167	17,3

Примечания. 1. $\sigma_0' = \gamma_{fps\,\min} K_{\text{п}} \sigma_0$. 2. Экономия металла (Э) дана по сравнению со сварной двутавровой балкой симметричного сечения из стали с R_{y1}.

На втором этапе проверяется прочность обоих поясов и стенки с учетом предварительных напряжений.

В верхнем поясе

$$\left(M_p/W_{x1} - \sigma_{ps1}\right)/\left(R_{y1}\gamma_c\right) \le 1, \tag{13.16}$$

где $\sigma_{ps1} = \gamma_{fps\,\min} K_{\text{п}} \left(-A_{f2}/A + A_{f2}h_2/W_{x1}\right)$.

В нижнем поясе

$$\left(M_p/W_{x2} - \sigma_{ps2}\right)/\left(R_{y2}\gamma_c\right) \le 1, \tag{13.17}$$

где $\sigma_{ps2} = \gamma_{fps\,\max} K_{\text{п}} \left(1 - A_{f2}/A - A_{f2}h_2/W_{x2}\right)$.

В стенке в зоне примыкания к нижнему поясу

$$\frac{M_p\left(h_2 - t_2\right)/\left(W_{x2}h_2\right) - \sigma_{psw}}{R_{y1}\gamma_c} \le 1, \tag{13.18}$$

где $\sigma_{psw} = \gamma_{fps\,\max} K_{\text{п}} \sigma_0 \left(A_{f2}/A - A_{f2}\left(h_2 - t_2\right)/W_{x2}\right)$.

В этих формулах принято R_{y1} для верхней полки и стенки и $R_{y2} > R_{y1}$ для нижнего пояса; M_p - изгибающий момент от нагрузки. Выбор значения σ_0 и, следовательно σ_{ps}, производится по результатам решения оптимизационной задачи по обеспечению минимального расхода металла.

Необходимая площадь сечения балки определяется по формуле

$$A = B\left[M_p^2/(\lambda_w R_{y1})\right]^{1/3}, \tag{13.19}$$

где B - определяется по табл.13.4.

Из этой же таблицы определяются σ_0' и далее σ_0.

При натяжении нижнего пояса термическим способом необходимая температура нагрева с учетом потерь тепла при остывании определяется по формуле

$$t_0^{\circ}\text{C} = 10^b \sigma_0/\alpha E + t_{\text{н}}^{\circ}\text{C}, \tag{13.20}$$

где α - коэффициент линейного удлинения; $t_{\text{н}}^{\circ}\text{C}$ - температура окружающей среды; b - показатель, определяемый по формуле $b = 0{,}4 l_{\text{н}}/(10^5 V_{\text{св}} t_2)$; $l_{\text{н}}$ - расстояние от края нагревателя до оси сварочного агрегата; $V_{\text{св}}$ - скорость сварки.

Проверка на жесткость производится по (13.14), где определяется по формуле

$$f_{ps} = M_{ps} l^2/8EI,$$

где $M_{ps} = \sigma_0 A_{f2} h_2$.

Аналогично рассчитываются балки с предварительно вытянутой стенкой и другие модификации этого метода.

Расчет колонн с предварительно растянутой стенкой. Приближенный расчет центрально сжатой колонны двутаврового или коробчатого симметричного сечения со сравнительно тонкими стенками сводится к проверке общей устойчивости колонн и местной устойчивости стенки с учетом предварительного напряжения (рис.13.41).

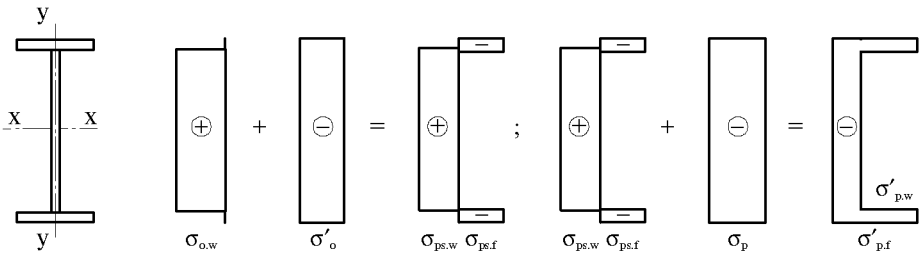


Рис.13.41. Эпюры нормальных напряжений в центрально сжатой тонкостенной колонне *а* – при натяжении стенки (напряжения сборки σ_0); *б* – после соединения стенки с поясами и передачи предварительного усилия на все сечение; *в* – предварительные напряжения; *г* – напряжения от сжатия стержня под внешней нагрузкой на систему; *д* – суммарные напряжения

Устойчивость колонны обеспечена, если

$$(\sigma_{psf} + \sigma_p)/\varphi_{\min} R_{yf} \gamma_c \le 1 . \qquad (13.21)$$

Местная устойчивость стенки обеспечена, если

$$(\sigma_p - \sigma_{psw})/(\sigma_{cr} \gamma_c) \le 1 . \qquad (13.22)$$

В этих формулах:

$\sigma_p = N_p/A$; $\sigma_{psf} = \gamma_{fps\,\max} K_n (A_w/A)$; $R_{yf} = \gamma_{fps\,\min} K_n \sigma_0 (1 - A_w/A)$ – начальное напряжение, оно не должно быть больше R_{yw} ; $\varphi_{\min}$ – коэффициент устойчивости в плоскости с наибольшей гибкостью стержня; R_{yf}, R_{yw} – расчетные сопротивления для металла полки и стенки; σ_{cr} – критическое напряжение для стенки; N_p – продольная сила от нагрузок.

Расчет неразрезных конструкций со смещением уровня опор. Балки. Неразрезные балки с регулированием напряжений смещением уровня опор рассчитываются методами строительной механики как статически неопределимые системы. До закрытия зазора между опорой и конструкцией неразрезная балка имеет степень статической неопределимости меньшую, чем в рабочем состоянии, на число зазоров. Независимо от способа смещения уровня опор (затягивание гаек на анкерных болтах, использование собственного веса конструкции и пригруза, удаление временных прокладок и др.) изгибающие моменты в неразрезной балке определяются как сумма моментов от постоянных и временных нагрузок, установленных по расчетной схеме балки с учетом упругой податливости опор и неравномерной осадки оснований, и моментов, возникших при регулировании напряжений, вызванных действием сосредоточенной силы, закрывающей требуемый зазор (смещение).

В неразрезных двухпролетных балках постоянного сечения (прокатных и составных), величину смещения уровня опор Δ_{ps} рекомендуется определять из условия выравнивания изгибающих моментов в пролетах и на промежуточной опоре. Изгибающий момент при регулировании напряжений M_{ps}

$$M_{ps} = \frac{-(M_{npl} + M_{onl} R_{ynp}/R_{yon})}{\nu \gamma_{fpsnp} + \gamma_{fpson} R_{ynp}/R_{yon}} , \qquad (13.23)$$

где $M_{\text{пр}l}$, $M_{\text{оп}l}$ – наибольшие по абсолютной величине моменты в неразрезной балке в пролете и на опоре от всех нагрузок, определенные с учетом упругой податливости и неравномерной осадки оснований, взятые со своими знаками; $R_{y\text{пр}}$, $R_{y\text{оп}}$ – расчетные сопротивления металла для пролетного и опорного участков; ν – число влияния M_{ps} в сечении с $M_{\text{пр}l}$; $\gamma_{fps\text{пр}}$, $\gamma_{fps\text{оп}}$ – коэффициенты надежности по нагрузке при регулировании напряжений принимаются равными при $\xi = M_{\text{оп}l} R_{y\text{пр}} / (M_{\text{пр}l} R_{y\text{оп}}) > 1$ (смещение на промежуточной опоре вниз) $\gamma_{fps\text{оп}} = \gamma_{fps\min}$; $\gamma_{fps\text{пр}} = \gamma_{fps\max}$; при $\xi < 1$ (смещение вверх) $\gamma_{fps\text{оп}} = \gamma_{fps\max}$; $\gamma_{fps\text{пр}} = \gamma_{fps\min}$ (см.табл.13.1); при $\xi \cong 1$ – регулирование не требуется.

По M_{ps} определяется требуемое смещение Δ_{ps}. В частности, при одинаковых пролетах

$$\Delta_{ps} = M_{ps} l^2 / (3EI).$$

В двухпролетных балках постоянной высоты с усиленным сечением в зоне промежуточной опоры существует единственное оптимальное распределение изгибающих моментов и отвечающих им моментов инерции, которое может быть достигнуто с помощью регулирования напряжений при условии полного использования несущей способности сечений балки на опоре, в пролете и в месте изменения сечения балки в зоне промежуточной опоры.

При постоянной толщине стенки можно использовать следующий алгоритм:

- определяется наибольший момент в разрезной балке того же пролета при той же нагрузке, что и в неразрезной балке $M_{\text{пр}0}$;
- в результате статического расчета, двухпролетной балки постоянного сечения с учетом упругой или нелинейной податливости опор, включая неравномерную осадку оснований, устанавливается $M_{\text{оп}\max}$ и $M'_{\text{оп}}$ (опорный момент при возникновении наибольшего пролетного момента), затем находим $\eta = M_{\text{оп}\max} / M'_{\text{оп}}$;
- точно или приближенно устанавливаются сечение в пролете с наибольшим изгибающим моментом после регулирования напряжений, т.е. коэффициент ν в формуле (13.23), а также наибольший изгибающий момент в этом сечении в разрезной балке, равный $\xi M_{\text{пр}0}$;
- отрицательные моменты, в зоне промежуточной опоры на участке до 0,3 пролета аппроксимируются гиперболой типа $M_y = M_{\text{оп}}(1 + By/l)$, где y – ордината, отсчитываемая от промежуточной опоры, B – коэффициент, равный, в частности, для подкрановых балок пролетом 12 м при четырех колесах 7,5; при восьми колесах B = 8,2; то же для подкрановых балок пролетом 24 м – $B = 2{,}2$ и $B = 2{,}7$ соответственно; для балок с равномерно распределенной нагрузкой $B = 7{,}7$;
- полный оптимальный изгибающий момент на опоре определяется из уравнения $ax^2 + bx + d = 0$, где $x = M_{\text{оп.opt}} / M_{\text{пр}0}$;

$$a = -2\varepsilon\left\{(1+\varepsilon)\left[\varepsilon - 2s(\varepsilon K/3 - \rho r)\right] + B\varepsilon^2\right\};$$

$$b = \xi\left\{\varepsilon\left[4\varepsilon B + (5+4\varepsilon)(1 - 2KS/3)\right] + 2\rho Sr(6+5\varepsilon)\right\};$$

$$d = -\xi^2\left[2\varepsilon B + (3+2\varepsilon)(1 - 2KS/3) + 6\rho Sr\right];$$

$\varepsilon = \nu/\eta$; $S = C_{\text{оп}} / C_{\text{пр}}$; $r = R_{y\text{пр}} / R_{y\text{оп}}$;

$\rho = W/hA$ – коэффициент ядрового расстояния сечения балки в пролете (обычно $\rho = 0{,}35$); $K = A_w/A$ – отношение площади стенки ко всей площади сечения балки в пролете (обычно 0,4–0,45); $C_{\text{оп}}$, $C_{\text{пр}}$ – удельные стоимости «в деле» или приведенные затраты для опорных и пролетных участков балки;

- определяется место изменения сечения балки в пролете или устанавливается длина участка $l_1 = \alpha l$,
  где $\alpha = 1 - \left[(1+\varepsilon)x - \xi\right] / \left[B(\xi - \varepsilon x)\right]$.

  Эта длина несколько увеличивается (на 5–10 %), чтобы стык не попал в сечение с наибольшим отрицательным пролетным моментом;
- устанавливается наибольший пролетный момент предварительно напряженной неразрезной балки

$$M_{\text{пр.opt}} = M_{\text{пр}0}\,(\xi - \varepsilon x)$$

  и определяется соотношение моментов инерции

$$I_{\text{оп}} / I_{\text{пр}} = M_{\text{оп.opt}}\, r / M_{\text{пр.opt}};$$

- при принятых $I_{\text{оп}} / I_{\text{пр}}$ и α производится точный статический расчет и определяется опорный момент, необходимый для регулирования напряжений

$$M_{ps} = M_{\text{оп.opt}} - M_{\text{оп}\,l} / \gamma_{fps\max};$$

- вычисляются остальные моменты и подбираются сечения балки в пролете и на опоре. Полученные соотношения $I_{\text{оп}} / I_{\text{пр}}$ должны совпадать с принятыми при небольших отклонениях (до 5 %);
  определяется смещение вниз на крайней опоре

$$\Delta_{ps} = 2M_{ps}l^2\left[\alpha^3 + (1-\alpha^3)I_{\text{пр}} / I_{\text{оп}}\right] / (3EI_{\text{пр}});$$

- производятся конструктивное оформление балки и проверка общей устойчивости, деформативности и др.

В табл.13.4 приведены оптимальные параметры для различных двухпролетных балок.

Фермы. Основные положения по расчету неразрезных ферм со смещением уровня опор те же, что и у неразрезных балок. В неразрезных фермах на первом этапе работы (регулирование напряжений) необходимо произвести проверку прочности и устойчивости стержней, учитывая, что знаки усилий при предварительном напряжении и в рабочем состоянии могут не совпадать.

В неразрезных фермах с постоянным сечением поясов значение смещения уровня опор рекомендуется определять из условия полного использования несущей способности стержней поясов в пролетах и в зоне промежуточных опор. Оптимизацию неразрезных ферм со смещением уровня опор рекомендуется также осуществлять с помощью линейного программирования. Целевая функция (масса металла, стоимость «в деле», приведенные затраты) выражается формулой (здесь для стоимости «в деле» С)

$$\text{C} = \psi\gamma\sum_{i=1}^{m} C_i A_i l_i, \qquad (13.24)$$

где A_i – площадь сечения и длина для каждой группы стержней с одинаковым сечением; C_i – удельные стоимости «в деле» или приведенные затраты, в последнем случае С в формуле заменяется на $\text{С}_{\text{прив}}$; m – число групп стержней с одинаковым сечением; ψ – строительный коэффициент фермы; γ (для стали) = 7,85 т/м^3.

Для каждой группы стержней с одинаковой площадью сечения в ферме с одним неизвестным (двухпролетные фермы) устанавливаются ограничения (можно без большой погрешности учитывать только стержни поясов).

При растяжении

$$y_i = R_{yi}A_i - (N_{0pi} + N_{1i}X / \eta_i) \geq 0 \qquad (i = 1 \ldots m); \qquad (13.25)$$

при сжатии

$$y_i = \varphi_i R_{yi} A_i + (N_{0pi} + N_{1i} X / \eta_i) \geq 0 . \qquad (13.26)$$

Кроме того вводится условие ограничения площади по предельной гибкости: $A_i \geq [A]$.

Здесь N_{0pi} – усилие в i-м стержне групп стержней с одинаковым сечением основной системы (по методу сил) от нагрузок; N_{1i} – то же, от единичного усилия в лишнем стержне; X – полное усилие в лишнем стержне, включая усилия от нагрузок, неравномерной осадки оснований и смещения уровня опор; η_i – соотношение между усилиями в лишнем стержне неразрезной фермы с поясом постоянного сечения без регулирования напряжений, причем в числителе наибольшее значение этого усилия, а в знаменателе это усилие при такой комбинации нагрузок, при которой в i-м стержне возникает наибольшее усилие; φ_i – осредненный коэффициент устойчивости для i-й группы стержней.

Неизвестными в целевой функции (13.24) и в ограничениях (13.25) и (13.26) принимаются площади групп стержней A_i и полное усилие в лишнем стержне X . После их определения в результате решения задачи на ЭВМ с помощью стандартных программ симплекс-метода линейного программирования производятся выбор размеров сечения из сортамента, расчет неразрезной фермы при принятых размерах сечений по фактической расчетной схеме, определение усилий в лишнем стержне от нагрузок X_e обычными методами строительной механики и вычисление усилия предварительного напряжения в лишнем стержне по формуле

$$X_{ps} = (X - X_e) / \gamma_{fps\max}.$$

По величине предварительного усилия определяется необходимое смещение уровня опор фермы. Также производится расчет неразрезных ферм с двумя и большим количеством неизвестных. В ограничения (13.25) и (13.26) необходимо включить эти неизвестные.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Условные обозначения

f – полка двутавра
w – стенка двутавра
min – наименьшее значение
max – наибольшее значение
opt – оптимальное значение
ps – предварительное напряжение
в – верхний
н – нижний
пр – в пролете балки
оп – на опоре балки
з – затяжка

Индексы

R_3 – расчетное сопротивление материала (стали) высокопрочных элементов
K_n – коэффициент потерь напряжений в высокопрочных элементах.
γ_{fps}; $\gamma_{fps\max}$; $\gamma_{fps\min}$ – коэффициенты надежности при предварительном натяжении

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беленя Е.И.** Предварительно напряженные несущие металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1975.
2. **Беленя Е.И., Астряб С.М., Рамазанов Э.Б.** Предварительно напряженные металлические листовые конструкции. – М.: Стройиздат, 1979.
3. **Бирюлев В.В.** Металлические неразрезные конструкции с регулированием уровня опор. – М.: Стройиздат, 1984.
4. **Воеводин А.А.** Предварительно напряженные системы элементов конструкций. – М.: Стройиздат, 1989.
5. **Гайдаров Ю.В.** Предварительно напряженные металлические конструкции. Новые виды и области применения. – Л.: Ленстройиздат, 1971.
6. **Лащенко М.Н.** Регулирование напряжений в металлических конструкциях. – Л. –М.: Ленстройиздат, 1966.
7. **Сперанский Б.А.** Решетчатые металлические предварительно напряженные конструкции. – М.: Стройиздат, 1970.
8. **Толмачев К.Х.** Регулирование напряжений в металлических пролетных строениях мостов. – М.: Автотрансиздат. 1960.
9. **Ференчик П., Тохачек М.** Предварительно напряженные стальные конструкции. – М.: Стройиздат, 1979.
10. **Трофимович В.В., Пермяков В.А.** Оптимизация металлических конструкций. – К.: Вища школа, 1983.
11. **Вайнштейн Е.И.** Предварительно напряженные бестросовые конструкции – ЧПИ. Челябинск, 1983.
12. **Аменд В.А., Вайнштейн Е.И.** Беззатяжечные предварительно напряженные двутавровые балки с пластической стадией работы стенки. – Промышленное строительство. – 1988. – № 11.
13. **Беккерман М.И., Винклер О.Н., Левитанский И.В.** Предварительное растяжение стенок колонн как эффективный метод снижения металлоемкости конструкций: – Промышленное строительство. – 1976. – № 10.
14. Проектирование металлических конструкций: Спец.курс. – Л.: Стройиздат, 1990.

ГЛАВА 14

СОСТАВ И ОБЩИЕ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РАБОЧИХ ЧЕРТЕЖЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ МАРОК КМ И КМД

14.1. Общие положения

Состав, порядок разработки, согласования и утверждения проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений устанавливает СНиП 11.01–95.

Рабочие чертежи, предназначенные для производства строительных и монтажных работ на строительной площадке, состоят из двух основных комплектов: рабочих чертежей металлических конструкций марки КМ (далее рабочие чертежи КМ) и рабочих деталировочных чертежей металлических конструкций марки КМД (далее рабочие чертежи КМД).

Чертежи КМ выполняются проектными организациями и являются основанием для разработки чертежей КМД, составления сметы и должны содержать все данные, необходимые для выполнения этих работ.

Чертежи КМД разрабатываются конструкторскими отделами заводов-изготовителей металлоконструкций, а также отделами КМД проектных организаций, трестами и управлениями, ведущими монтаж металлоконструкций и должны содержать все необходимые данные для изготовления и монтажа конструкций.

Организация, разрабатывающая чертежи КМД, несет ответственность за соответствие их проекту КМ, за расчетную прочность всех заводских и монтажных соединений конструкций, не предусмотренных чертежами КМ, за правильность размеров элементов конструкций и увязку их между собой, а также за выполнение требований, определяемых технологией монтажных работ.

Отступления от чертежей КМ, как правило, не допускаются. В случае необходимости они должны быть согласованы с проектной организацией – разработчиком чертежей КМ.

Чертежи КМ и КМД выполняют с учетом требований стандартов системы проектной документации для строительства (СПДС), стандартов Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и других стандартов.

Рабочие чертежи, предназначенные для производства строительных и монтажных работ на строительной площадке, объединяют в основные комплекты по маркам.

Основной комплект рабочих чертежей марок КМ или КМД может быть расчленен на несколько основных комплектов этой марки по каким-либо признакам (например по очереди строительства, участкам здания) с присвоением им той же марки и добавлением порядкового номера, обозначаемого арабскими цифрами (например: КМ1, КМ2, КМД1, КМД2).

14.2. Состав основного комплекта рабочих чертежей металлических конструкций марки КМ

В состав основного комплекта рабочих чертежей КМ входят:

- общие данные по рабочим чертежам КМ (далее общие данные);
- сведения о нагрузках и воздействиях на конструкции;
- сведения о нагрузках на фундаменты;
- чертежи общих видов конструкций зданий и сооружений (при необходимости);
- схемы расположения элементов конструкций;
- чертежи элементов конструкций;
- чертежи узлов конструкций;
- спецификация металлопроката.

Общие данные. Общие данные приводят на первом листе основного комплекта рабочих чертежей КМ. Они могут располагаться на одном или нескольких листах в зависимости от объема материала. Если общие данные размещены на нескольких листах, то в основных надписях после наименования листа «Общие данные» записывают: на первом листе – «(начало)», на последующих листах – «(продолжение)», а на последнем листе – «(окончание)».

В состав общих данных входят:

- ведомость рабочих чертежей основного комплекта;
- ведомость ссылочных и прилагаемых документов;
- ведомость основных комплектов рабочих чертежей;
- условные обозначения и изображения, не установленные государственными стандартами и значения которых не указаны на других листах основного комплекта;
- общие указания;
- другие данные, предусмотренные соответствующими стандартами СПДС.

Ведомость рабочих чертежей основного комплекта оформляют по форме 1 (рис.14.1). В ней указывают:

Форма 1

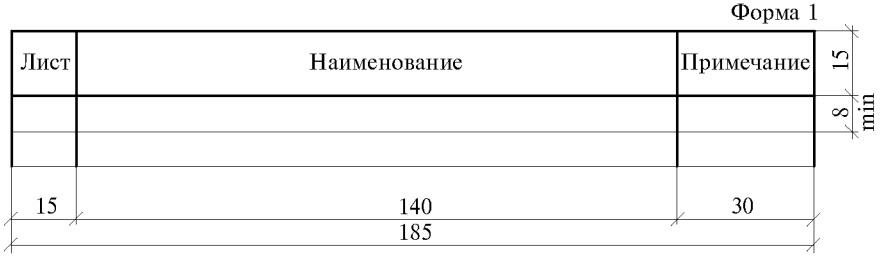


Рис.14.1. Ведомость рабочих чертежей основного комплекта марки КМ

- в графе «Лист» – порядковый номер листа основного комплекта рабочих чертежей;
- в графе «Наименование» – наименование изображений, помещенных на листе, в полном соответствии с наименованиями, приведенными в основной надписи соответствующего листа;
- в графе «Примечание» – дополнительные сведения, например, сведения, об изменениях, вносимых в рабочие чертежи основного комплекта.

Ведомость ссылочных и прилагаемых к основному комплекту рабочих чертежей документов оформляют по форме 2 (рис.14.2). В ней указывают:

- в графе «Обозначение» – обозначение документа и при необходимости наименование или различительный индекс организации, выпустившей документ;

Форма 2

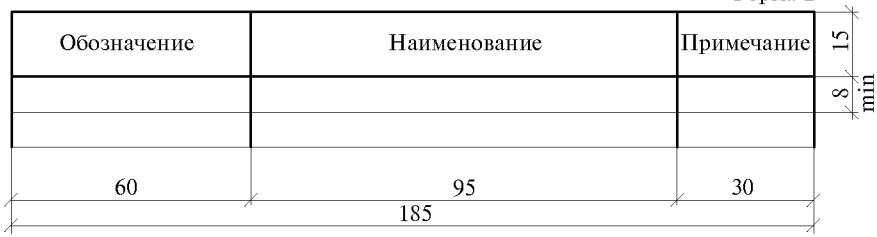


Рис.14.2. Ведомость ссылочных и прилагаемых документов. Ведомость основных комплектов

- в графе «Наименование» – наименование документа в полном соответствии с наименованием, указанным на титульном листе или в основной надписи;
- в графе «Примечание» – дополнительные сведения, в том числе сведения об изменениях, вносимых в примененные документы.

Запись документов производят по разделам: ссылочные документы; прилагаемые документы. Наименование разделов записывают в виде заголовка в графе «Наименование» и подчеркивают.

В каждом разделе документы группируют по видам в такой последовательности:

в разделе «Ссылочные документы»:

- государственные, республиканские и отраслевые (ведомственные) стандарты на изготовление конструкций, изделий и узлов (заказчику не выдаются);
- чертежи типовых конструкций, изделий и узлов, включенных в строительный каталог СК (заказчику не выдаются);

в разделе «Прилагаемые документы»:

- повторно применяемые чертежи конструкций, изделий и узлов;
- чертежи индивидуальных конструкций, изделий и узлов, разработанные для данного объекта;
- чертежи типовых конструкций, не прошедшие государственную регистрацию, и чертежи, разработанные для другого объекта, при условии согласия организации-разработчика на их применение;
- другие документы.

Прилагаемые документы выдаются проектной организацией одновременно с основным комплектом рабочих чертежей.

Ведомость основных комплектов рабочих чертежей приводят на листах общих данных основного комплекта ведущей марки. При наличии нескольких основных комплектов одной марки ведомость основных комплектов приводят в общих данных каждого комплекта этой марки.

Ведомость основных комплектов оформляют по форме 2. В ведомости основных комплектов рабочих чертежей указывают:

- в графе «Обозначение» – обозначение основного комплекта рабочих чертежей и при необходимости наименование и шифр организации, выпустившей документ;
- в графе «Наименование» – наименование основного комплекта рабочих чертежей;
- в графе «Примечание» – дополнительные сведения.

В общих указаниях, входящих в состав общих данных рабочих чертежей КМ, приводят:

- основание для разработки рабочих чертежей, отметку, принятую в рабочих чертежах здания или сооружения за нулевую (как правило, приводят на архитектурно-строительных чертежах);

- ссылку на принятые нормы проектирования, технические задания и технические условия на проектирование;
- сведения об основных конструктивных особенностях здания и сооружения;
- описание принятых монтажных и заводских соединений;
- указания по выполнению сварных соединений;
- указания по выполнению соединений на болтах, винтах и других крепежных деталях;
- требования к изготовлению и монтажу, в том числе требования по контролю сварных швов, а также точности в соответствии с действующими нормативными документами;
- мероприятия по антикоррозионной защите конструкций (при отсутствии основного комплекта рабочих чертежей или необходимых данных на чертежах);
- запись о результатах проверки на патентоспособность и патентную чистоту[1] впервые применяемых или разработанных в проекте конструкций, изделий, а также номера авторских свидетельств и заявок, по которым приняты решения о выдаче авторских свидетельств;
- запись о том, что технические решения, принятые в рабочей документации, соответствуют действующим нормам и правилам, а для зданий и сооружений с взрывоопасным и пожароопасным характером производства, кроме того, обеспечивают безопасную эксплуатацию их при соблюдении предусмотренных проектом мероприятий;
- другие необходимые указания.

Текстовые указания, общие для всего проекта, должны быть приведены на листе общих данных, текстовые указания, общие для группы чертежей, – на первом листе этой группы.

Сведения о нагрузках и воздействиях на конструкции приводят, как правило, на отдельных листах. Допускается приводить сведения о нагрузках и воздействиях на соответствующих схемах расположения элементов конструкций.

Состав и значение нагрузок и воздействий при разработке рабочих чертежей КМ принимают в соответствии с требованиями строительных норм и правил, технических заданий и технических условий на проектирование. При этом необходимо указывать нормативные и расчетные значения нагрузок, принятые коэффициенты надежности по нагрузке и данные по возможным сочетаниям технологических и других нагрузок и воздействий.

Сведения о нагрузках на фундаменты приводят, как правило, на отдельных листах. Допускается приводить сведения о нагрузках на фундаменты на соответствующих схемах расположения элементов конструкций.

Сведения о нагрузках на фундаменты от металлических конструкций включают в себя:

- принятое правило знаков нагрузок на фундаменты;
- схемы расположения фундаментных болтов для каждой марки фундамента;
- значения нагрузок на фундаменты;
- диаметры, высоты выступающих частей, длины нарезок, марки сталей фундаментных болтов;
- требования к деформативности фундаментов.

[1] Проверка на патентную чистоту объектов капитального строительства, сооружаемых на территории России и за рубежом, проводится в соответствии с заданием генпроектировщиков по действующим нормативным документам.

Чертежи общих видов конструкций зданий и сооружений. Чертежи общих видов должны содержать изображения конструкций здания и сооружения и сведения, необходимые для разработки деталировочных чертежей. На чертежах общих видов наносят и указывают:

- основные габаритные размеры металлических конструкций;
- характерные отметки;
- координационные оси;
- примыкающие конструкции, чертежи которых не входят в состав данного комплекта чертежей;
- расположение и основные параметры технологического оборудования (подъемно-транспортного и др.), влияющего на конструкции;
- марку элементов конструкций (при необходимости) по ГОСТ 26047–83;
- размеры сечений и усилия для прикрепления элементов.

Схемы расположения элементов конструкций (далее схема расположения) – чертеж, на котором показаны в виде условных или упрощенных изображений элементы конструкций и связи между ними. Схемы расположения выполняют для каждой группы элементов конструкций, связанных условиями и последовательностью производства строительно-монтажных работ [например: колонны, связи по колоннам, подкрановые балки, фермы (балки) и связи покрытия]. Допускается совмещение изображений нескольких групп конструкций на одном виде или разрезе. Элементы конструкций на схемах расположения изображают в плане, виде и (или) разрезе. При необходимости дополняют фрагментами и узлами.

Схемы расположения сложных пространственных конструкций выполняют по отдельным плоскостям. Схемы расположения элементов конструкций, подлежащих изготовлению на специализированных заводах, выполняют на отдельных листах. На схемах расположения элементов наносят разбивочные оси, отметки уровней и размеры, определяющие положение элементов, линии разрезов, зону действия технологических кранов (при необходимости), обозначение узлов и фрагментов.

Пример оформления схемы расположения колонн, вертикальных связей и подкрановых балок одноэтажных зданий приведен на рис.14.3, колонн и элементов перекрытий многоэтажных зданий – на рис.14.4. На чертежах схем расположения элементов приводят ведомость элементов по формам 3 и 4 (рис.14.5 и 14.6) и дополнительные технические требования, отсутствующие в общих данных.

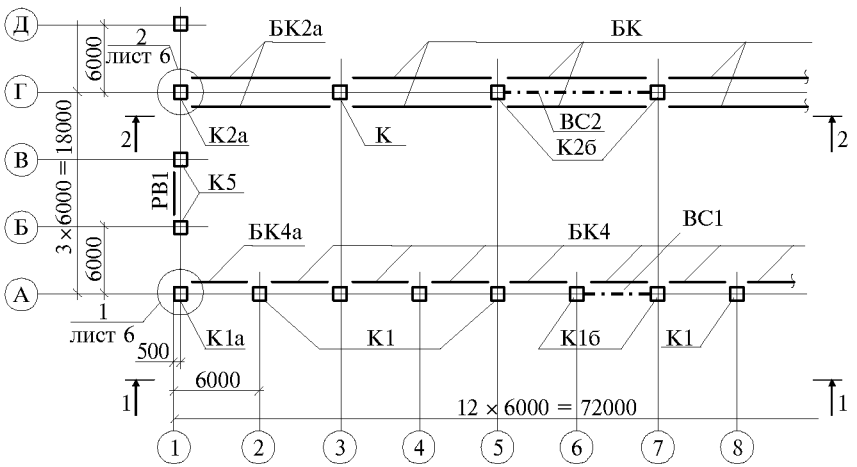


Рис.14.3. Пример оформления схемы расположения колонн, вертикальных связей и подкрановых балок

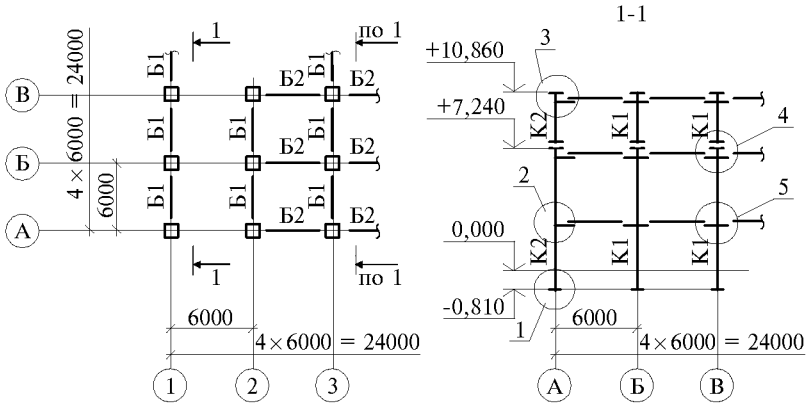


Рис.14.4. Пример оформления схемы расположения колонн и элементов перекрытий многоэтажных зданий

Форма 3

Марка	Сечение			Усилие для прикрепления			Марка или наименование металла	Примечание
	эскиз	поз	состав	A, кН	N, кН	M, кН·м		
20	30	10	30	15	15	15	25	25

15; 8; min; 185

Рис.14.5. Ведомость элементов

Форма 4

Марка	Обозначение	Наименование	Кол.	Масса, кг	
				шт.	общ.
20	60	60	10	15	20

8; 15; 8; min; 185

Рис.14.6. Ведомость элементов

В ведомость по форме 3 записывают индивидуальные и типовые элементы металлических конструкций, для которых приводят информацию о сечении, усилиях для прикрепления, о марке или наименовании металла.

В графах ведомости указывают:

- в графе «Марка» – марку элемента по схеме расположения элементов или общему виду;
- в графе «Сечение, эскиз» – сечение элемента с проставлением позиций частей элемента и необходимых размеров;
- в графе «Сечение, поз.» – порядковые номера частей элемента;
- в графе «Сечение, состав» – обозначение профилей, составляющих сечение (в сокращенных обозначениях);
- в графах «Усилие для прикрепления»:

A, кН – реакция в опорном сечении элемента;

N, кН – продольное усилие в элементе;

M, кН · м – изгибающий момент в опорном сечении элемента;

- в графе «Марка или наименование металла» – марку или наименование металла для всего элемента, если все детали элемента выполнены из одной марки. Если марки (наименования) различны, то указывают наименование металла каждой позиции частей элементов;
- в графе «Примечание» – указывают другие необходимые данные об элементе, например вид обработки, если это не оговорено в текстовых указаниях.

В ведомость по форме 4 записывают типовые элементы металлических конструкций, изготовляемых на специализированных заводах, для которых не приводят информацию о сечении, усилиях для прикрепления и марке (наименовании) стали.

В графах ведомости указывают:

- в графе «Марка» – марку элемента по общему виду или схеме расположения элементов;
- в графе «Обозначение» – обозначение чертежей типовых конструкций, чертежа элемента по рабочим деталировочным чертежам, чертежа индивидуального элемента, прилагаемого к комплекту чертежей марки КМ, или обозначения соответствующих стандартов (технических условий);
- в графе «Наименование» – наименование элемента, указанное в основной надписи соответствующего чертежа. После наименования элемента указывают марку, присвоенную в чертеже этому элементу;
- в графе «Кол.» – количество элементов по общему виду или схеме расположения элементов;
- в графе «Масса, кг, шт.» – массу одного элемента;
- в графе «Масса, кг общ.» – общую массу всех элементов.

В чертежах марки КМ допускается применение других форм ведомости элементов в зависимости от характера конструктивного элемента.

В технических требованиях приводят: значения усилий для расчета прикрепления элементов, не указанные на чертежах и в ведомости элементов; требования по изготовлению и монтажу, отсутствующие в общих данных.

Чертежи элементов конструкций выполняют, если данные, приведенные на чертежах общих видов, схемах расположения элементов конструкций недостаточны для разработки деталировочных чертежей.

Чертежи элементов выполняют в виде схем, на которых указывают:

- геометрические размеры;
- опорные реакции;
- размеры и сечения отдельных деталей, а также усилия;
- монтажные и заводские соединения, включая размеры сварных швов, диаметры, классы прочности, шаги и количество крепежных изделий;
- марки (наименования) стали всех деталей, входящих в состав элемента.

Размеры сварных швов, диаметры, классы прочности, шаги, количество крепежных изделий не указывают, если они могут быть определены при разработке рабочих деталировочных чертежей.

В технических требованиях на чертежах элементов указывают: усилия для расчета прикреплений, не указанные на чертеже, дополнительные требования по изготовлению и монтажу элементов; номера листов соответствующих схем расположения элементов. Пример выполнения чертежа элемента конструкции приведен на рис.14.7.

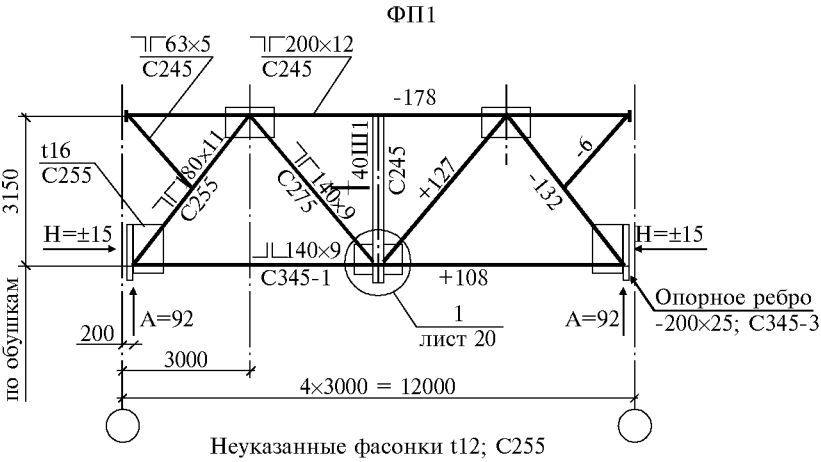


Рис.14.7. Пример оформления чертежа элемента конструкции

Чертежи узлов конструкций выполняют, если данные, приведенные на других чертежах КМ, недостаточны для разработки деталировочных чертежей. На чертежах узлов указывают:

- привязки элементов конструкции к координационным осям;
- необходимые отметки;
- примыкающие элементы конструкций, чертежи которых не входят в состав данного комплекта чертежей, их размеры, привязки и другие данные, необходимые для разработки деталировочных чертежей металлических конструкций;
- толщины фасонок;
- размеры сварных швов;
- количество, шаги, диаметры, типы, классы прочности болтов, заклепок и других крепежных изделий;
- требования к обрабатываемым поверхностям;
- сечения и марки (наименования) стали деталей, не оговоренные на схемах расположения элементов;
- другие данные.

Толщины фасонок, размеры сварных швов, количество, шаги, диаметры, класс прочности крепежных изделий не указывают, если они могут быть определены при разработке рабочих деталировочных чертежей.

Пример оформления чертежа узла приведен на рис.14.8.

Спецификация металлопроката (СМ) предназначается для заказа металлопроката. СМ выполняют по форме 5 (рис.14.9). СМ не распространяется на алюминиевый прокат. СМ составляют на каждый вид элементов конструкции в соответствии с разделом прейскуранта оптовых цен на строительные стальные конструкции. На основе СМ составляют сводную спецификацию металлопроката (СМС) по той же форме.

Для металлических конструкций массой более 500 т и выпуске комплекта чертежей КМ по этапам строительства вместо СМ на объект в целом составляют СМС на каждый этап. Допускается СМ и СМС объединять в отдельный сборник (ССМ).

Каждой СМ, СМС и ССМ присваивают самостоятельное обозначение, состоящее из обозначения рабочих чертежей по ГОСТ 21.101–93, через точку кода документа и порядкового номера СМ.

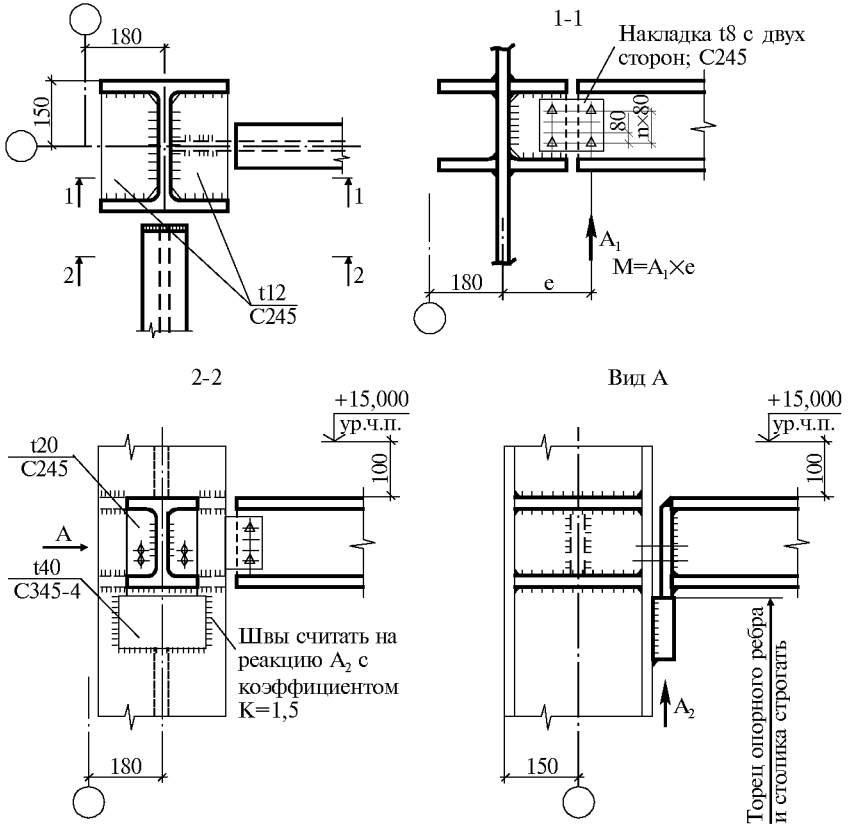


Рис.14.8. Пример оформления чертежа узла

Примеры: хх.ххххх–хх – КМ.СМ 12
хх.ххххх–хх – КМ.СМС
хх.ххххх–хх – КМ.ССМ

СМ, СМС и ССМ записывают в ведомость прилагаемых документов. Допускается СМ выполнять на отдельных листах в составе комплекта чертежей.

Первым листом СМ, СМС и ССМ является титульный лист, выполняемый по ГОСТ 21.110–95. В ССМ кроме того включают оглавление. При небольшом объеме СМ титульный лист допускается не выполнять. В этом случае на первом листе СМ наносят основную надпись по форме 1 ГОСТ 21.101–93.

В графах СМ и СМС указывают:

- в графе «Марка или наименование металла, ГОСТ, ТУ» – марку или наименование металла и номер государственного стандарта или технических условий, по которым производится поставка;
- в графе «Наименование профиля, ГОСТ, ТУ» – наименование подгрупп профиля по «Классификатору продукции черной металлургии. Блок профилей» (ОКП ЧМ) и обозначение соответствующего стандарта или технических условий;
- в графе «Номер строки» – последовательные номера строк, в которых указана масса;
- в графе «Номер или размеры профиля, мм» – номер или размеры профиля в соответствии с условными обозначениями, приведенными в государственных стандартах или технических условиях, и длину профиля, если его поставляют в мерных длинах. Длину профиля указывают под номером профиля. В пределах наименования профили записывают по возрастанию их номеров или размеров;

Форма 5

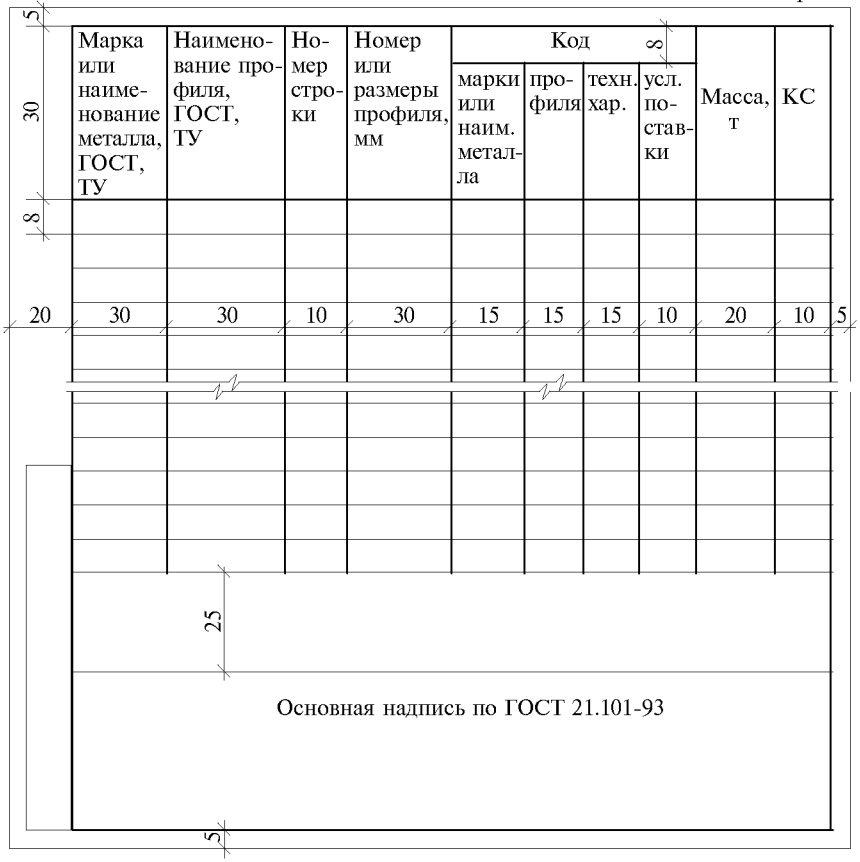


Рис.14.9. Спецификация металлопроката

- в графе «Код марки или наименования металла» – четырехразрядный код марки или наименования металла в соответствии с ОКП ЧМ (блок марок металла и сплавов);
- в графе «Код профиля» – четырехразрядный код профиля в соответствии с ОКП ЧМ (блок профилей);
- в графе «Код техн.хар.» – четырехразрядный код технической характеристики профиля в соответствии с ОКП ЧМ (блок технических требований);
- в графе «Код усл.поставки» – двухразрядные коды условий поставки в соответствии с блоком форм заказа и условий поставки ОКП ЧМ. Графу заполняют при необходимости;
- в графе «Масса, т» – массу по чертежам КМ, определяемую с точностью до одной десятой тонны, без учета припуска размеров элементов на обработку, массы сварных швов, головок заклепок, отходов и уточнения массы по деталировочным чертежам. По каждому наименованию профиля приводят строку «Итого», а для каждой марки или наименования стали – строку «Всего»;
- в графе «КС» – контрольную сумму по горизонтали, представляющую собой шестнадцатиричное представление логической суммы двоичных представлений всех символов граф: «Номер строки», «Номер или размеры профиля, мм», «Код марки или наименования металла», «Код профиля», «Код техн.хар.», «Код усл.поставки», «Масса, т» (без учета пробелов). Графу заполняют при составлении СМ и СМС на ЭВМ.

В конце каждой СМ и СМС приводят строки: «Всего металла», «В том числе по маркам или наименованиям», «В том числе по укрупненным видам сортамента».

14.3. Состав основного комплекта рабочих деталировочных чертежей металлических конструкций марки КМД

В состав рабочих деталировочных чертежей металлических конструкций входят:

- рабочие чертежи, предназначенные только для производства строительно-монтажных работ (основной комплект рабочих чертежей марки КМД);
- рабочие чертежи, предназначенные для изготовления и монтажа металлоконструкций;
- дополнительные чертежи.

Чертежи, предназначенные для производства строительно-монтажных работ (основной комплект рабочих чертежей марки КМД). В состав основного комплекта рабочих чертежей марки КМД входят: общие данные по рабочим чертежам (далее общие данные); схемы расположения элементов конструкций; чертежи узлов сопряжения элементов конструкций.

Общие данные. Чертежи общих данных оформляют в соответствии с ГОСТ 21.101–93 и дополнительными требованиями. На чертеже общих данных располагают ведомость рабочих чертежей основного комплекта и элементов конструкций, которую оформляют по форме 6 (рис.14.10).



Рис.14.10. Ведомость рабочих чертежей основного комплекта марки КМД

В графах ведомости указывают:

- в графе «Номер чертежа» – порядковый номер рабочего чертежа,
- в графе «Наименование» – наименование листа в полном соответствии с его наименованием, приведенным в основной надписи;
- в графе «Масса, кг» – общая масса конструкций или метизов по чертежу;
- в графе «Примечание» – дополнительные сведения.

После записи последнего чертежа в ведомости чертежей пропускается несколько строк и подводится итог массы конструкций. В следующей строке указывается масса метизов, затем – масса конструкций и метизов по объекту.

В общих указаниях на чертеже общих данных, кроме требований по ГОСТ 21.101–93, приводят:

- типы монтажных соединений (болтовые или сварные) с указанием данных по обработке контактных поверхностей, усилий натяжения высокопрочных и обычных болтов каждого типа;
- применяемые сварочные материалы;
- материал конструкций;
- название документа на производство монтажных работ.

Схемы расположения элементов конструкций. Схемы расположения элементов конструкций выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ 21.501–93, ГОСТ 21.112–87. Ситуационная графическая часть схемы расположения элементов конструкций должна соответствовать схеме расположения элементов конструкций чертежей КМ, в соответствии с которыми выполняется данный чертеж. Масштаб на чертеже может быть увеличен или уменьшен.

Каждой схеме расположения элементов конструкций присваивают «индекс» – одну или две заглавные буквы русского алфавита, которые составляют буквенную часть марки всех элементов конструкций, расположенных на данной схеме. Марки всех элементов на схеме имеют буквенный индекс и цифровой порядковый номер (пример: А1, А2 и т.д.).

На схеме расположения элементов над изображениями элементов обозначают только цифровую часть маркировки. Элементы маркируют на чертежах только один раз на основной проекции. В случае, если необходимо замаркировать этот элемент на других изображениях (разрезах, видах, узлах), марку пишут полностью с буквенным индексом. Такую марку при подсчете количества элементов не учитывают.

На чертежах схем расположения элементов конструкций приводят: ведомость отправочных элементов схемы; ведомость монтажных метизов; дополнительные технические требования, отсутствующие в общих данных.

Ведомость отправочных элементов схемы выполняют по форме 7 (рис.14.11) и размещают в правом верхнем углу чертежа. В графах ведомости указывают:

Форма 7

Ведомость отправочных элементов схемы						
Марка элемента	Кол., шт.	Наименование	Масса, кг		Номер чертежа	Примечание
			шт.	общ.		
Итого:						
Масса метизов, кг:						
Всего по схеме:						
35	15	40	15	20	35	25

10, 15, 8 min, 185

Рис.14.11. Ведомость отправочных элементов схемы

- в графе «Марка элемента» – марку отправочного элемента по схеме расположения элементов;
- в графе «Кол., шт.» – количество элементов по чертежу;
- в графе «Наименование» – наименование в полном соответствии с основной надписью чертежа отправочных элементов;

- в графе «Масса, кг» – массу одного элемента и всех элементов по чертежу элементов конструкций;
- в графе «Номер чертежа» – номер чертежа, на котором изображен элемент;
- в графе «Примечание» – дополнительные сведения, относящиеся к записанным в ведомость элементам конструкций.

Ведомость монтажных метизов выполняют по форме 8 (рис.14.12). В графах ведомости указывают:

Форма 8

Ведомость монтажных метизов							
Тип болта	d болта, мм	*l* болта, мм	Толщина пакета, мм	Кол., шт.	Масса, кг		Примечание
					шт.	общ.	
Всего:							
25	20	20	25	20	20	20	35
185							

10, 15, 8 min

Рис.14.12. Ведомость монтажных метизов

- в графе «Тип болта» – точность болта;
- в графе «*d* болта, мм» – наименование резьбы (М16, М20);
- в графе «*l* болта, мм» – длину болта;
- в графе «Толщина пакета, мм» – интервал толщин, которые скрепляются болтом одной длины;
- в графе «Кол., шт.» – количество болтов одинаковой длины;
- в графе «Масса, кг» – массу одного болта и массу всех с гайками и шайбами;
- в графе «Примечание» – класс болта.

На последней строке таблицы подводят общую массу болтов по схеме.

В технических требованиях на схемах расположения элементов приводят: ссылку на чертежи марки КМ, на основании которых разработана схема расположения элементов; указания по применяемым на монтаже крепежным изделиям и сварочным материалам, а также другие указания по монтажу конструкций, относящиеся к данной схеме расположения элементов.

Чертежи узлов сопряжения конструкций. Изображения узлов помещают на отдельных листах или на свободном поле чертежа схем расположения элементов. На чертежах узлов проставляют необходимое количество размеров, отметок уровней, изображают сварные, болтовые и монтажные соединения. На простые сопряжения элементов узлы не разрабатывают. Крепление таких элементов указывают на чертежах элементов конструкций. В технических требованиях к чертежам узлов указывают условные обозначения болтов различного класса прочности.

Рабочие чертежи элементов конструкций, предназначенные для их изготовления и монтажа, чертежи деталей и дополнительные чертежи. Рабочие чертежи элементов конструкций выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ 21.101–93, ГОСТ 2.109–73*, ГОСТ 2.113–75*, ГОСТ 21.501–93, ГОСТ 2.410–68* и с учетом других дополнительных требований. Сборочный чертеж элементов конструкций содержит:

- один или несколько элементов, подобных конструктивно или комплектных в монтаже;
- чертежи деталей элементов конструкций;

- спецификацию на отправочный элемент;
- таблицу отправочных элементов конструкций;
- таблицу сварных швов;
- технические требования к изготовлению деталей и элементов конструкций.

Чертежи деталей выполняют в тех случаях, когда детали не могут быть изготовлены по данным чертежа элементов конструкций.

Спецификацию на отправочный элемент конструкции выполняют по форме 9 (рис.14.13) и располагают в правом верхнем углу чертежа. В спецификации на отправочный элемент конструкции указывают:

Форма 9

Спецификация на отправочный элемент										
Марка	Поз.	Кол., шт.		Сечение	Длина, мм	Масса, кг			Марка или наименование стали	Примечание
		т	н			шт.	общ.	элем.		
15	10	10	10	30	20	15	15	15	25	20

10 15 8 min

185

Рис.14.13. Спецификация на отправочный элемент

- в графе «Марка» – буквенно-цифровое обозначение марки элемента;
- в графе «Поз.» – номера деталей, примененных в чертеже элементов металлоконструкций в порядке их возрастания;
- в графе «Кол., шт.» – количество деталей в прямом (т) и зеркальном (н) изображении;
- в графе «Сечение» – условное обозначение сечения проката, из которого спроектированы детали;
- в графе «Длина, мм» – длину деталей, при этом:
  - длина прямолинейных деталей из профильного проката указывается между наиболее удаленными точками;
  - длина плоских листовых деталей, независимо от конфигурации указывается как длина большей стороны описанного прямоугольника;
  - длина гнутых листовых деталей указывается по линии центра тяжести сечения;
  - длина гнутых уголков и швеллеров указывается по обушку; длина гнутых двутавров (относительно оси наименьшей жесткости) указывается по оси стенки;
- в графе «Масса, кг» – массу одной детали, всех деталей и элемента в целом. При подсчете массы деталей соблюдают следующие правила:
  - плотность стали принимают 7850 кг/м^3;
  - массу одной детали подсчитывают с точностью до 0,1 кг;
  - массу всех одинаковых деталей элемента с точностью до 1 кг;
  - при подсчете массы непрямоугольных листовых деталей, вписывающихся в прямоугольник площадью до 0,2 м^2, массу вычисляют по площади этого прямоугольника, а для всех остальных деталей – по фактической площади;
  - массу деталей из профильного проката вычисляют умножением теоретической массы единицы длины профиля, приведенной в нормативно-технической документации на профильный прокат, на длину, указанную в спецификации;
  - уменьшение массы деталей из-за отверстий под болты не учитывают;

- в графе «Масса, кг элем.» – суммарную массу всех входящих деталей с добавлением массы металла сварных швов, которую записывают отдельной строкой и принимают равной одному проценту от массы всех входящих деталей в данный элемент. При подсчете массы округление чисел до установленной точности производят в соответствии с требованием стандарта СТ СЭВ 543–77;
- в графе «Марка или наименование стали» – марку или наименование стали по СНиП II–23–81*, приложение 1;
- в графе «Примечание» – технологические и другие указания.

Если в спецификацию вносятся несколько элементов металлоконструкций, изображенных на одном групповом чертеже с большинством одинаковых деталей, то спецификация составляется полностью на один сборочный элемент. В спецификацию остальных сборочных элементов вносят полностью те детали, которые отличаются по номерам и количеству от деталей первого сборочного элемента, а одинаковые детали перечисляют в спецификации одной строкой со ссылкой на сборочный элемент, для которого спецификация составлена полностью, с указанием общей массы деталей.

Таблицу отправочных элементов конструкций (подлежащих изготовлению по данному чертежу) выполняют по форме 10 (рис.14.14) и располагают над основной надписью. Таблицу заводских сварных швов выполняют по форме 11 (рис.14.15).

Форма 10



Рис.14.14. Таблица отправочных элементов

Форма 11



Рис.14.15. Таблица заводских сварных швов

14.4. Общие правила оформления рабочих чертежей и текстовых документов

14.4.1. Форматы. Обозначения и размеры сторон форматов должны соответствовать ГОСТ 2.301–68*.

14.4.2. Линии чертежа, их начертание, толщина и назначение должны соответствовать ГОСТ 2.303–68*.

14.4.3. Основные надписи. Формы, размеры и порядок заполнения основных надписей и дополнительных граф к ним, а также размеры рамок на чертежах и в текстовых документах, входящих в состав проектной документации, должны соответствовать ГОСТ 21.101–93 с учетом следующего дополнительного требования: нумерация листов основного комплекта чертежей КМД на заводах-изготовителях должна применяться пообъектной, в которой каждому номеру объекта (заводского заказа) присваивается порядковая нумерация листов, начиная с общих данных, затем схемы расположения конструкций, узлов и рабочих чертежей элементов.

14.4.4. Шрифты. Надписи на чертежах должны соответствовать ГОСТ 2.304–81*. *Рекомендуемые размеры шрифтов*:

- 2,5; 3,5 – для текстовых указаний и поясняющих надписей при изображениях элементов и деталей;
- 3,5; 5 – для названий изображений, заголовков в текстовых указаниях и ведомостях;
- 5 – для обозначения марок в ведомостях и спецификациях;
- 7; 10 – для написания номеров листов и марки над изображением конструкции.

14.4.5 Масштабы изображений и их обозначение должны соответствовать ГОСТ 2.302–68*. Выбор масштабов следует производить с учетом сложности изображений и применять возможно меньший масштаб, обеспечивающий четкость чертежа и копий с него.

Рекомендуемые масштабы для чертежей КМ:

- общий вид, планы, разрезы – 1:50, 1:100, 1:200, 1:400;
- общие схематические чертежи – 1:400, 1:500;
- схемы расположения элементов – 1:100, 1:200, 1:400;
- поперечные разрезы и виды – 1:50, 1:75, 1:100, 1:200;
- элементы конструкций – 1:15, 1:20, 1:50, 1:100;
- узлы – 1:10, 1:15, 1:20, 1:25.

Рекомендуемые масштабы для чертежей КМД:

- монтажные планы, схемы – 1:100, 1:200, 1:400;
- сечения сплошностенчатых и решетчатых элементов конструкций – 1:10, 1:15, 1:20, 1:25 (масштаб 1:10 применяется для мелких профилей).

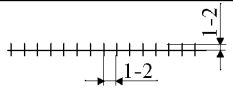
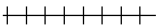
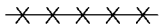
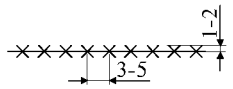
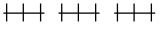
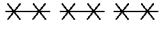
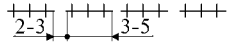
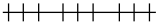
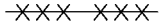
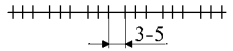
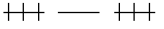
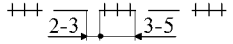
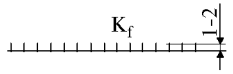
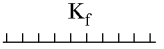
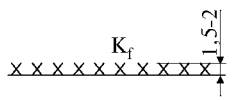
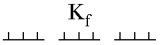
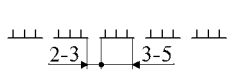
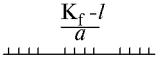
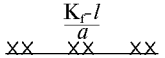
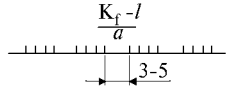
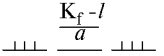
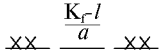
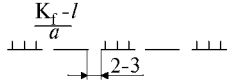
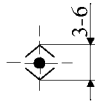
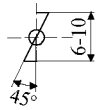
Геометрические схемы пространственных решетчатых конструкций (башни, элементы мостов и т.п.) изображают в одном для всех трех измерений (длина, ширина, высота) масштабе. Длинные сплошностенчатые конструкции (балки, колонны) изображают без соблюдения масштаба по длине, сохраняя при этом взаимное расположение деталей и отверстий. Решетчатые конструкции (фермы, связи и т.п.) изображают, как правило, в двух масштабах, больше сокращая схему осей элементов, чем их поперечные размеры и сохраняя один масштаб изображения в пределах узлов и мелких деталей (фасонок, прокладок и т.п.). Для однотипных конструкций, изображаемых на одном листе, должен применяться один и тот же масштаб.

14.4.6. Условные изображения и обозначения на рабочих чертежах должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.306–68*, ГОСТ 2.308–79*, ГОСТ 2.309–73*, ГОСТ 2.311–68*, ГОСТ 2.312–72*, ГОСТ 2.315–68*, ГОСТ 21.501–93, ГОСТ 21.112–87, ГОСТ 26047–83. Графические обозначения материалов и правила их нанесения на чертежах выполняют по ГОСТ 2.306–68* с учетом следующих дополнительных требований: графическое обозначение стали в сечениях, видах (фасадах) не применяется; графическое изображение древесины применяют, если нет необходимости указывать направление волокон.

Обозначение предельных отклонений форм деталей и расположения поверхностей должно соответствовать требованиям ГОСТ 2.308–79*. Обозначение шероховатости поверхности (при необходимости) должно соответствовать требованиям ГОСТ 2.309–73*. Изображение резьбы должно соответствовать требованиям ГОСТ 2.311–68.

Условные изображения и обозначения швов сварных соединений должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.312–72*. Допускается принимать условные изображения швов сварных соединений, приведенные в табл.14.1.

Таблица 14.1. Условные изображения и обозначения сварных соединений

Наименование	Изображение шва		Размер изображений, мм
	заводского	монтажного	
Шов стыкового сварного соединения, сплошной:			
с видимой стороны			
с невидимой стороны			
То же, прерывистый:			
с видимой стороны			
с невидимой стороны			
Шов сварного соединения углового, таврового или внахлестку – сплошной:			
с видимой стороны			
с невидимой стороны			
То же, прерывистый:			
с видимой стороны			
с невидимой стороны			
Нахлесточное точечное соединение, точки выполнены контактной сваркой		—	
Нахлесточное точечное соединение, точки выполнены электродуговой сваркой		—	

Примечание. K_f – катет углового шва; l – длина привариваемого участка; a – расстояние в свету между участками.

Упрощенные и условные изображения крепежных деталей должны соответствовать ГОСТ 2.315–68* ГОСТ 21.501–93. Условные обозначения отверстий под болты и заклепки должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.307–68*. Условные обозначения проката в тексте и на чертежах приведены в табл.14.2.

Условные буквенные обозначения наименований основных конструкций и изделий (рекомендуемые) приведены в ГОСТ 26047–83. Допускается принимать условные обозначения, приведенные в табл.14.3.

Таблица 14.2. Условные обозначения профилей проката

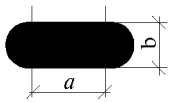
Вид проката, ГОСТ, ТУ	Условные обозначения	Пример условного обозначения
1	2	3
1. Сталь горячекатаная. Балки двутавровые. ГОСТ 8239-89	I (номер балки)	I 20
2. Балки двутавровые и швеллеры стальные специальные. ГОСТ 19425-74*	I (номер профиля)	I 30М
3. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. ГОСТ 26020-83		
Нормальные двутавры – Б	I (номер профиля)	I 40Б1
Широкополочные двутавры – Ш	То же	I 50Ш3
Колонные двутавры – К	То же	I 40К5
4. Сталь горячекатаная. Двутавры тонкостенные с узкими параллельными полками. ТУ 14-2-205-76	I (номер профиля)	I Т22
5. Сталь горячекатаная. Швеллеры. ГОСТ 8240-89		
Швеллеры с уклоном внутренних граней полок.	[(номер швеллера)	[20
Швеллеры с параллельными гранями полок.	[(номер швеллера) П	[20 П
6. Сталь горячекатаная. Швеллеры тонкостенные с узкими параллельными полками. ТУ 14-2-204-76	[(номер профиля)	[20 Т
7. Тавры с параллельными гранями полки. ТУ 14-2-685-86		
Нормальные тавры – БТ	T (номер профиля)	T 15БТ1
Широкополочные тавры – ШТ	То же	T 20ШТ1
Колонные тавры – КТ	То же	T 20КТ5
8. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. ГОСТ 8509-93	∟ (ширина полки, мм) × толщину полки, мм	∟ 200×12
9. Уголки стальные горячекатаные неравнополочные. ГОСТ 8510-86*	⌊ (ширина большей полки, мм) × (ширину меньшей полки, мм) × (толщину полки, мм)	⌊ 200×125×12
10. Прокат стальной горячекатаный квадратный. ГОСТ 2591-88	□ (сторона квадрата, мм)	□ 100
11. Прокат стальной горячекатаный круглый. ГОСТ 2590-88	○ (диаметр, мм)	○ 120
12. Полоса стальная горячекатаная. ГОСТ 103-76*	— (ширина полосы, мм)× ×(толщину полосы, мм)	— 100×10
13. Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный ГОСТ 82-70*	— (ширина полосы, мм)× ×(толщину полосы, мм)	— 400×12

Продолжение табл. 14.2

1	2	3
14. Прокат листовой горячекатаный. ГОСТ 19903-74*	толщина, мм или – (толщина листа, мм) × × (ширину листа, мм) × × (длину листа, мм)	t8 – 8×800×6000
15. Прокат листовой горячекатаный. ГОСТ 19904-90	То же	То же
16. Трубы стальные электросварные прямошовные. ГОСТ 10704-91	ТЭ (диаметр, мм) × × (толщину стенки, мм) или ∅ (наружный диаметр, мм) × (толщину стенки, мм)	ТЭ 152×5 ∅ 152×5
17. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. ГОСТ 8732-78*	ТБ (диаметр, мм) × × (толщину, мм) или ∅ (наружный диаметр, мм) × (толщину стенки, мм)	ТБ 203×6 ∅ 203×6
18. Листы стальные с ромбическим и чечевичным рифлением. ГОСТ 8568-77*		
Ромбическая	– Риф. (толщина, мм) или – Риф. (ширина листа, мм) × (толщину основания листа, мм)	– Риф. 5 – Риф. 800×6
Чечевичная	– ЧРиф. (толщина, мм) или – ЧРиф. (ширина листа, мм) × (толщину основания листа, мм)	– ЧРиф. 6 – ЧРиф. 800×6
19. Сталь просечно-вытяжная. ТУ 36.26.11-5-89	– ПВ (марка листа)	– ПВ 608
20. Сетки стальные плетеные одинарные. ГОСТ 5336-80*		
С ромбической ячейкой	※ Р-(номер сетки)- - (диаметр проволоки, мм)	※ Р-8-1,2
С квадратной ячейкой	# Р-(номер сетки)- - (диаметр проволоки, мм)	# Р-20-2,0
21. Рельсы крановые. ГОСТ 4121-76*	Тип рельса	КР 120
22. Швеллеры стальные гнутые равнополочные. ГОСТ 8278-83*	Гн. ⊏ (высота стенки, мм) × (ширину полки, мм) × (толщину полки, мм)	Гн. ⊏ 80×40×4
23. Швеллеры стальные гнутые равнополочные. ГОСТ 8278-83*	Гн. ⊏ (высота стенки, мм) × (ширину полки, мм) × (толщину швеллера, мм)	Гн. ⊏ 180×50×4
24. Швеллеры стальные гнутые неравнополочные. ГОСТ 8281-80*	Гн. ⌊ (высота стенки, мм) × (ширину большей полки, мм) × (ширину меньшей полки, мм) × × (толщину швеллера, мм)	Гн. ⌊ 50×40×12×2,5

1	2	3
25. Уголки стальные гнутые равнополочные. ГОСТ 19771-93	Гн. ∟ (ширина полки, мм) × (толщину полки, мм)	Гн. ∟ 120×6
26. Уголки стальные гнутые неравнополочные. ГОСТ 19772-93	Гн. ∟ (ширина большей полки, мм) × (ширину меньшей полки, мм) × × (толщину полки, мм)	Гн. ∟ 100×65×4
27. Профили стальные гнутые С-образные равнополочные. ГОСТ 8282-83*	Гн. ▯ (высота профиля, мм) × (ширину профиля, мм) × (ширину полки, мм) × (толщину профиля, мм)	Гн. ▯ 400×160×60×4
28. Профили стальные гнутые корытные равнополочные. ГОСТ 8283-93	Гн. ⸗ (высота стенки профиля, мм) × (ширину профиля, мм) × (высоту полки, мм) × (толщину профиля, мм)	Гн. ⸗ 80×60×54×4
29. Профили стальные гнутые специальные. ТУ 14-2-341-78 Корытный профиль	Гн. ⸤ (наименование спецпрофиля)	Гн. ⸤ 90×30×25×3
30. Профили стальные гнутые зетовые. ГОСТ 13229-78*		
Зетовый профиль равнополочный	Гн. ⸢ (высота профиля, мм) × (ширину полки, мм) × (толщину профиля, мм)	Гн. ⸢ 40×55×4
Зетовый профиль неравнополочный	Гн. ⸢ (высота профиля, мм) × (ширину большей полки, мм) × (ширину меньшей полки, мм) (толщину профиля, мм)	Гн. ⸢ 65×45×40×3
31. Профили гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные. ТУ 36-2287-80		
Профиль квадратный	Гн. (ширина профиля, мм) × (толщину профиля, мм)	Гн. 140 × 4
Профиль прямоугольный	Гн. ▯ (высота профиля, мм) ×(ширину профиля, мм) ×(толщину стенки, мм)	Гн. ▯ 140×100×5
32. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. ГОСТ 24045-94		
–Профилированный лист типа Н	Обозначение профилированного листа	Н57-750-0,8
Профилированный лист типа НС	То же	НС44-1000-0,7
Профилированный лист типа С	То же	С18-1000-0,8

Таблица 14.3. Условные обозначения наименований конструкций и изделий

Наименование	Условное обозначение
Отверстие круглое	
Отверстие овальное: *а* - расстояние между центрами; *в* - диаметр	
Линия (ось) симметрии	
Элементы из круглой стали (тяжи и т.п.) на схематических чертежах	– – –

Условные обозначения, не вошедшие в государственные стандарты и технические условия, должны быть приведены на листе «Общие данные».

14.4.7. Сокращения слов в тексте и на чертежах допускаются общепринятые, приведенные в ГОСТ 7.12–93, ГОСТ 2.316–68* и табл.14.4.

Таблица 14.4. Сокращения слов

Полное наименование	Сокращение
1	2
Асбестовый	Асб.
Асбестоцемент	Асб.-цем.
Асбестоцементные волнистые листы	Асб.-цем.в.л.
Бетон, бетонный	Бет.
Ближняя сторона	Б.с.
Вальцевать	Вальц.
Вальцевать маркой внутрь	ВМВ
Вальцевать маркой наружу	ВМН
Ведущий специалист	Вед.спец.*
Вентиляционная камера	Венткамера
Вентиляционный	Вент.
Ветровой	Ветр.
Воронка	Вор.
Временная нагрузка	Врем.нагр.
Гнуть	Гн.
Гнуть маркой внутрь	ГМВ
Гнуть маркой наружу	ГМН
Гнуть фаской внутрь	ГФВ
Гнуть фаской наружу	ГФН
Грузоподъемность	Груз.
Группа	Гр.*
Давление	Давл.
Дальняя сторона	Д.с.
Допускаемый	Допуск.
Заведующий	Зав.*
Институт	Ин-т*
Крановый	Кран.
Линия гиба	Л.Г.
Лист	Л.**

Продолжение табл. 14.4

1	2
Механическая обработка	Мех.обр.
Наоборот (зеркальная позиция)	Н.
Нормативная нагрузка	Норм.нагр.
Обратная (зеркальная) чертежу	Обр.черт.
Овальное отверстие	Ов.отв.
Постоянная нагрузка	Пост.нагр.
Равные расстояния	Р.р.
Размалковать	Размалк.
Расчетная нагрузка	Расч.нагр.
Смалковать	Смалк.
Смотри	См.
Снеговой	Снег.
Снять обушок	Сн.обуш.
Снять фаску	Сн.фаску
Срез углов	Ср.углов
Срез полки	Ср.полки
Стальной	Ст.
Строгать фаску	Стр.фаску
Строгать кромку	Стр.кр.
Строгать 2 продола	Стр. 2 пр.
Строгать по периметру	Стр.перим.
Такая (позиция)	Т.
Техник	Техн.*
Технический	Техн.
Труба	Тр.
Фасонный лист (мелкий)	Фл.
Фрезеровать 1 торец	Фр.1 т.
Фрезеровать плоскость	Фр.1 пл.
Часть	Ч.**
Элемент	Элем.

* - применяют только в основной надписи.

** - применяют только с цифрами.

14.4.8. Изображения. Виды (фасады), планы, разрезы, сечения, выносные элементы (узлы, фрагменты) изображают по ГОСТ 2.305–68* с учетом следующих дополнительных требований:

- контуры элементов конструкций в разрезе изображают сплошной толстой основной линией, видимые контуры элементов, находящихся за плоскостью сечения, – сплошной тонкой линией;
- фрагменты изображений, как правило, отмечают фигурной скобкой в соответствии с рис.14.16. Под фигурной скобкой, а также над соответствующим фрагментом наносят наименование фрагмента, например: «Фрагмент 2». Если фрагмент помещен на другом листе, то под фигурной скобкой дают

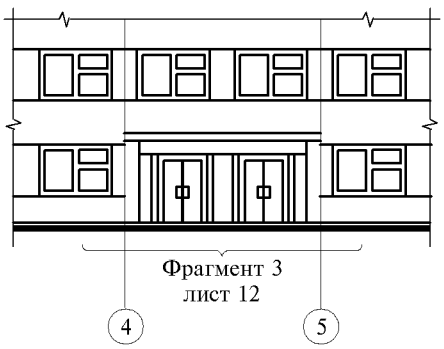


Рис.14.16. Пример обозначения фрагмента

ссылку на этот лист, например: «Фрагмент 2. Лист 8». Допускается ссылку на фрагмент помещать на линии-выноски;

- при изображении узлов соответствующее место отмечают на виде (фасаде), плане или разрезе замкнутой сплошной тонкой линией (окружностью или овалом) с обозначением на полке линии-выноски порядкового номера узла арабской или римской цифрой в соответствии с рис.14.17,*а*. Если узел помещен на другом листе, то под полкой линии-выноски указывают номер листа, на котором помещен узел, в соответствии с рис.14.17,*б*. При необходимости ссылки на узел, помещенный в другом комплекте чертежей, или на типовой узел, указывают обозначение соответствующего комплекта чертежей в соответствии с рис.14.17,*в* и 14.17,*г*. Допускается ссылку на узел производить в соответствии с рис.14.17,*д*;

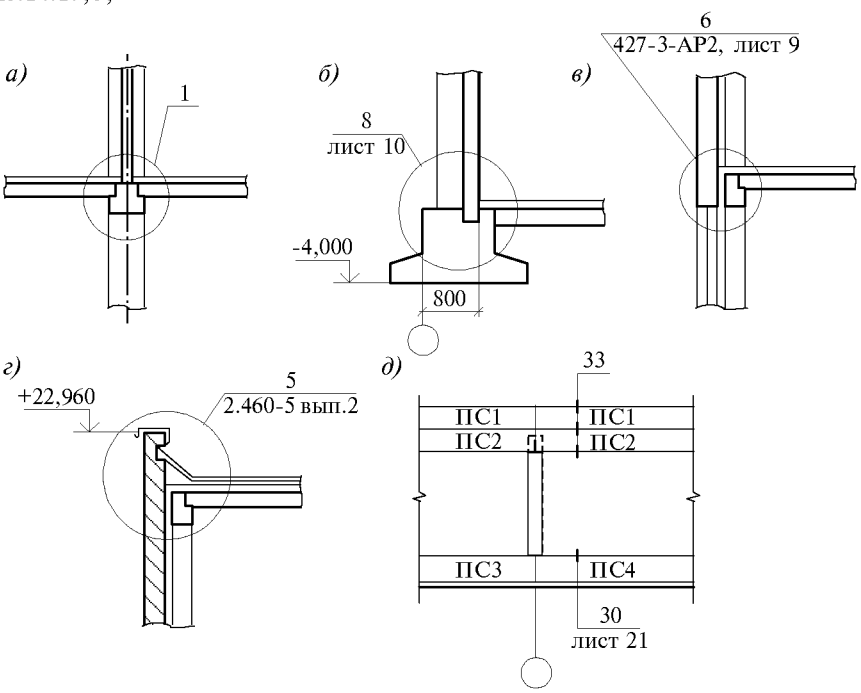


Рис.14.17. Примеры маркировки узлов

- над изображением узла в кружке указывают его порядковый номер в соответствии с рис.14.18,*а*. Допускается обозначение узла в соответствии с рис.14.18,*б*;

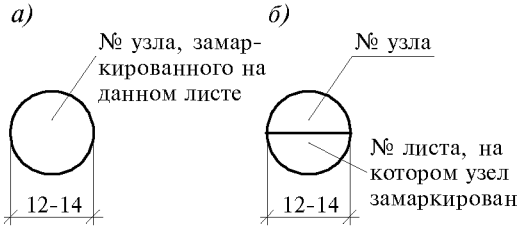


Рис.14.18. Примеры обозначения узлов

- узлу, являющемуся полным зеркальным отражением другого (основного) исполнения, присваивают тот же порядковый номер (буквенное обозначение) что и основному исполнению, с добавлением индекса «н», например, 14н;
- изображение до оси симметрии симметричных планов и фасадов зданий и сооружений, схем расположения элементов конструкций не допускается;

- изображение линий разреза и обозначение должно соответствовать рис.14.19,*а* и 14.19,*б*;
- масштаб на чертежах не проставляют, за исключением случаев, оговоренных в соответствующих стандартах СПДС.

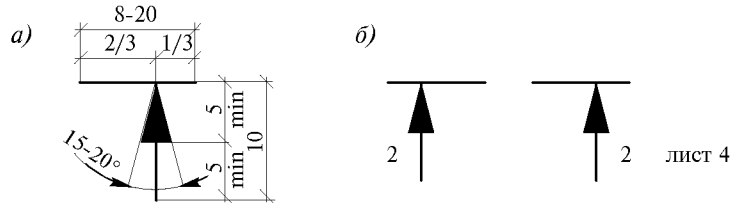


Рис.14.19. Изображение линии разреза и пример ее нанесения на чертежах

14.4.9. Нанесение на чертежах размеров, надписей, технических требований и таблиц. Нанесение на чертежах размеров производят по ГОСТ 2.307–68* с учетом следующих дополнительных требований:

- размерную линию на ее пересечении с выносными линиями или линиями контура ограничивают засечками в виде толстых основных линий длиной 2–4 мм, проводимыми с наклоном вправо под углом 45° к размерной линии, при этом размерные линии должны выступать за крайние выносные линии на 1–3 мм;
- при нанесении размера диаметра или радиуса окружности, а также углового размера размерную линию ограничивают стрелками. Стрелки применяют также при нанесении размеров радиусов наружных и внутренних округлений, а также размеров от общей базы, располагаемых на общей размерной линии, в соответствии с рис.14.20;

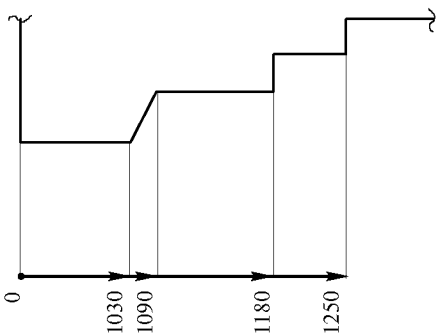


Рис.14.20. Пример нанесения размеров от общей базы

- отметки уровней (высоты, глубины) элементов конструкций от уровня отсчета (условной «нулевой» отметки) указывают в метрах с тремя десятичными знаками, отделенными от целого числа запятой и обозначают в соответствии с рис.14.21,*а*. «Нулевую» отметку, принимаемую, как правило, для поверхности какого-либо элемента конструкции здания или сооружения, расположенного вблизи планировочной поверхности земли, и отметки, выше нулевой, указывают со знаком плюс (например: «+0,000», «+3,600»), отметки, ниже нулевой, – со знаком минус (например: «-0,150»);
- на видах (фасадах), разрезах и сечениях отметки помещают на выносных линиях или линиях контура в соответствии с рис.14.21,*б*. На планах отметки наносят в прямоугольнике в соответствии с рис.14.21,*в*;
- на планах направление уклона плоскостей указывают стрелкой, над которой при необходимости проставляют величину уклона в соответствии с рис.14.22. Размеры делятся на следующие категории:
  - размеры, определяющие положение конструкций в сооружении (монтажные размеры);
  - размеры, необходимые для перехода от монтажных размеров к размерам для изготовления (увязочные размеры);

– размеры, необходимые для изготовления деталей;
– размеры, определяющие взаимное расположение деталей на элементе (сборочные размеры);
– контрольные размеры – для элементов, имеющих сложную геометрию.

Указанные категории размеров приведены на рис.14.23.

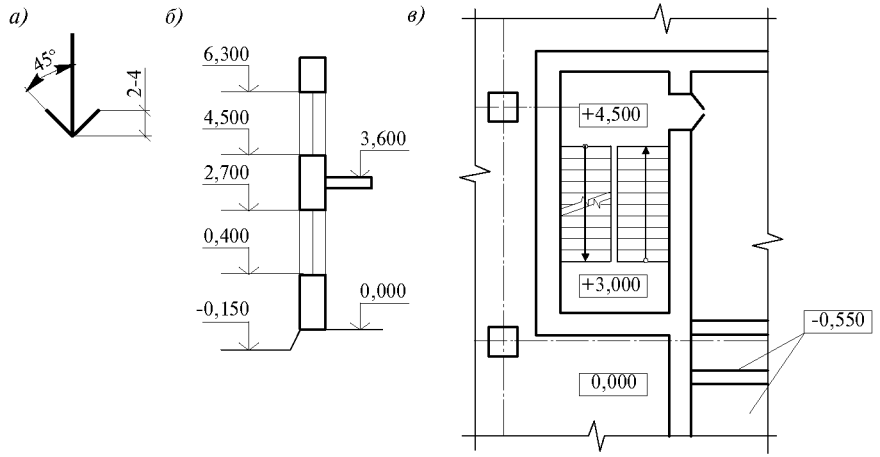


Рис.14.21. Изображение отметки уровня и примеры нанесения их на разрезе и плане

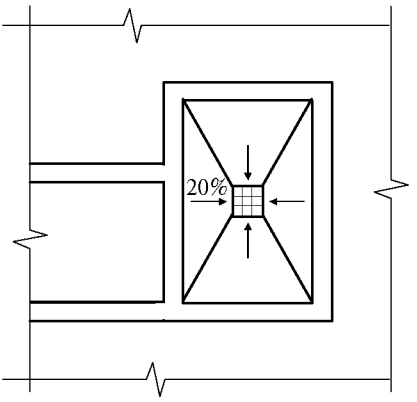


Рис.14.22. Обозначение уклона на плане

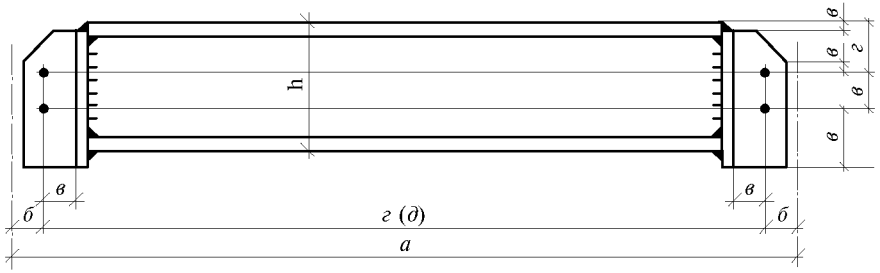


Рис.14.23. Категории размеров

Размеры элемента следует привязывать к осям и рядам сооружения или к осям примыкающих элементов. При простановке размеров по высоте или ширине сечения прокатных профилей (уголков, швеллеров, двутавров) размерная цепочка не замыкается. При этом размеры привязываются к той плоскости или грани, отметка

или привязка которой должна быть соблюдена в сооружении. Риски прокатных и гнутых уголков привязываются к обушку. Ряд одинаковых размеров рекомендуется указывать как произведение количества размеров «*n*», на величину размера «*A*» (рис.14.24).

Преобладающие для большинства элементов на чертеже расстояния от торца или кромки деталей до первого отверстия или ряда отверстий (обрезы), а также диаметры отверстий оговаривают в технических требованиях на чертеже и на изображенных элементах не проставляют. Остальные обрезы и диаметры отверстий должны быть проставлены.

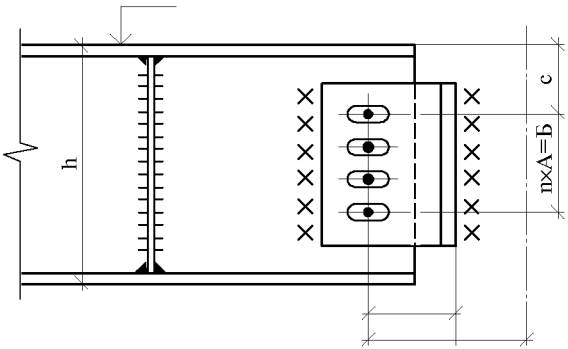


Рис.14.24. Пример простановки размеров по высоте сечения

В сварных балках указывают полную высоту опорной части, т.е. тот размер, который должен быть строго выдержан. Такие размеры (в чертежах КМД) помещают в рамку и указывают размер допуска. Указывают также толщину полок и высоту стенки, но не дают размер между нижней поверхностью нижнего пояса и низом опорного ребра, за счет которых компенсируют неточности при сборе балки (рис.14.25).

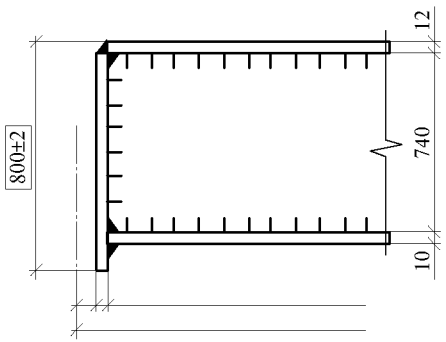


Рис.14.25. Пример простановки размеров на сварной балке

При изображении элемента, в котором имеются детали из неравнобоких уголков, следует указывать ширину одной из полок.

Размеры, необходимые для разметки и изготовления одинаковых деталей, проставляют один раз, независимо от количества деталей на чертеже. Для остальных одинаковых деталей указывают только привязочные размеры, необходимые для сборки. Габаритные размеры деталей конструируют по возможности кратными 5 или 10 мм. Размеры контура криволинейного профиля и дуги большого радиуса (более 5000 м) указывают координатами. При этом количество координат и степень точности размеров устанавливают в зависимости от конкретных условий (рис.14.26).

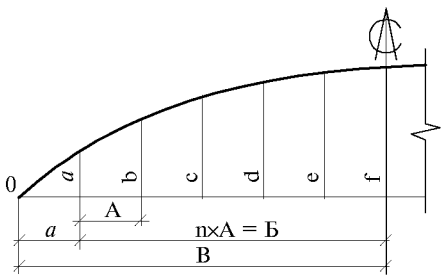


Рис.14.26. Пример простановки размеров криволинейного профиля

Направление наклонных линий в элементах связей и т.п., кроме простановки размерных линий, обозначают треугольником, стороны которого параллельны соответствующим лини-

ям геометрической схемы. На выносном треугольнике указывают действительные длины катетов (рис.14.27,*а*). Размеры срезов углов ребер указывают на катетах выносного треугольника (рис.14.27,*б*). Угол гиба гнутых деталей указывают треугольником. Размеры деталей проставляют от линии гиба. Для деталей, размечаемых до гнутья, необходимо выносить развертки. На развертке указывают, в какую сторону гнуть, а также радиус гиба (рис.14.28)

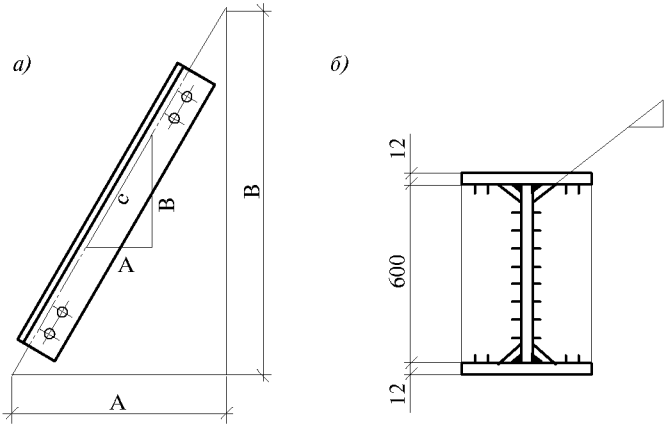


Рис.14.27. Пример простановки размеров на выносных треугольниках

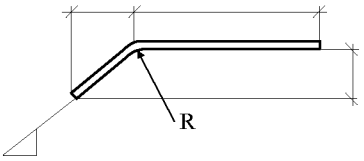


Рис.14.28. Пример простановки размеров на развертках

Нанесение надписей, технических требований и таблиц на чертежах производят по ГОСТ 2.316–68* с учетом следующих дополнительных требований:

- название изображений располагают над изображениями. Названия изображений рекомендуется подчеркивать сплошной тонкой линией. Заголовки таблиц располагают над таблицами и не подчеркивают;
- выносные надписи к многослойным конструкциям следует наносить в соответствии с рис.14.29;

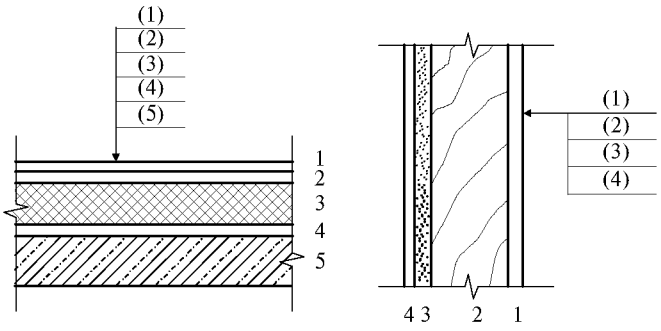


Рис.14.29. Пример нанесения выносных надписей к многослойным конструкциям (цифрами условно обозначена последовательность расположения слоев конструкции и надписей на линиях-выносках)

- марки элементов наносят на полках линий-выносок, проводимых от изображений составных частей предмета, или рядом с изображениями без линии-

выноски или в пределах контуров изображенных частей предмета в соответствии с рис.14.30;

- при мелкомасштабном изображении линии-выноски, пересекающие контур изображения, заканчивают без стрелки и точки.

14.4.10. Текстовые документы выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105–95.

14.4.11. Внесение изменений в рабочие чертежи марок КМ и КМД. Внесение изменений в рабочие чертежи марки КМ должно соответствовать требованиям ГОСТ 21.101–93. Внесение изменений в рабочие чертежи марки КМД должно соответствовать ГОСТ 2.503–90 с учетом следующих дополнительных требований:

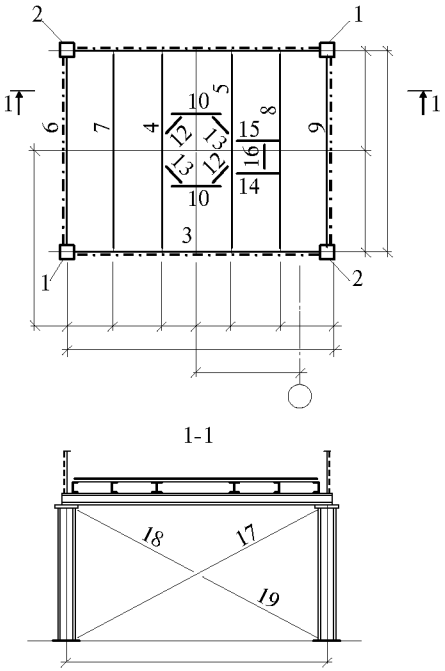


Рис.14.30. Пример нанесения марок элементов на схемах расположения (чертежи КМД)

- каждое изменение должно сопровождаться карточкой изменений. Измененные места изображения, таблиц, текста должны быть обведены замкнутой волнистой линией, около которой ставится знак изменения. В качестве знака изменения рекомендуется ромб. Первое изменение отмечают цифрой один, второе – два и т.д.,
- изменения, внесенные в рабочий чертеж, отмечают в основной надписи знаком изменения, датой и подписью руководителя;
- при значительном объеме изменений чертеж может быть аннулирован и заменен новым, выпускаемым за тем же номером с добавлением индекса «и» и порядкового номера изменения, например, 21и1, 24и2 и т.д. Около основной надписи помещается дополнительная: «Данный чертеж выпускается взамен КМД–24, дата ...». На аннулированных чертежах делают надпись: «Аннулирован, дата ... Заменен чертежом КМД–24и1»;
- измененные чертежи заносят в ведомость чертежей с соответствующим индексом изменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектно-сметной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений. СНиП 1.02.01–85. – М.: ЦИТП, 1986.
2. ГОСТ 2.105–95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.
3. ГОСТ 2.301–68*. ЕСКД. Форматы.
4. ГОСТ 2.302–68*. ЕСКД. Масштабы.
5. ГОСТ 2.303–68*. ЕСКД. Линии.
6. ГОСТ 2.304–81*. ЕСКД. Шрифты чертежные.
7. ГОСТ 2.305–68*. ЕСКД. Изображения – виды, разрезы, сечения.
8. ГОСТ 2.306–68*. ЕСКД. Обозначения графические материалов и правила их нанесения на чертежах.
9. ГОСТ 2.308–79*. ЕСКД. Указание на чертежах допусков формы и расположения поверхностей.

10. ГОСТ 2.309–73*. ЕСКД. Обозначения шероховатости поверхностей.
11. ГОСТ 2.311–68*. ЕСКД. Изображение резьбы.
12. ГОСТ 2.312–72*. ЕСКД. Условные изображения швов сварных соединений.
13. ГОСТ 2.315–68*. ЕСКД. Изображения упрощенные и условные крепежных деталей.
14. ГОСТ 2.316–68*. ЕСКД. Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц.
15. ГОСТ 2.503–90. ЕСКД. Правила внесения изменений в конструкторские документы по журналу изменений.
16. ГОСТ 7.12–93. Система информационно-библиографической документации. Сокращения русских слов и словосочетаний в библиографическом описании произведений печати.
17. ГОСТ 21.101–93. СПДС. Основные требования к рабочей документации.
18. ГОСТ 21.112–87. СПДС. Подъемно-транспортное оборудование. Условные изображения.
19. ГОСТ 21.501–93. СПДС. Правила выполнения архитектурно-строительных рабочих чертежей.
20. Проект ГОСТ СПДС. Конструкции металлические, правила выполнения рабочих деталировочных чертежей.
21. Проект ГОСТ СПДС. Основные требования к рабочей документации.
22. Временная инструкция о составе и оформлении строительных рабочих чертежей зданий и сооружений. Раздел 5. Конструкции металлические. Чертежи КМ. СН460–74. – М.: Стройиздат, 1975.
23. Временная инструкция о составе и оформлении строительных рабочих чертежей зданий и сооружений. Конструкции металлические. Чертежи КМД. Союзметаллостройниипроект. – М.: 1979.
24. **Васильченко В.Т., Рутман А.Н., Лукьяненко Е.П.** Конструирование и изготовление рабочих чертежей строительных металлических конструкций. – Киев: Будивельник, 1977.
25. **Сахновский М.М.** Справочник конструктора строительных сварных конструкций. – Днепропетровск: Проминь, 1975.

ГЛАВА 15

ОСНОВЫ СИСТЕМЫ КОДИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Стальными строительными конструкциями называются изделия из проката черных металлов и труб, изготовление которых обеспечивается материальными ресурсами, выделяемыми для капитального строительства. Стальные конструкции от оборудования отличает включение их стоимости в объем строительно-монтажных работ. Номенклатура стальных конструкций включает в себя:

- отдельные элементы зданий (колонны, балки, фермы, прогоны, связи, фонари, переплеты, лестницы, площадки, ограждения, каркасы ворот и дверей, покрытия ограждающих, в том числе полов, и несущих конструкций, подвесные потолки);
- доменные цехи (без литья и механизмов);
- разные промышленные сооружения без механизмов (каркасы промышленных печей и кожухи ванн[1], сварные трубопроводы и компенсаторы для них, галереи и эстакады, бункеры, этажерки открытого типа, опоры под оборудование);
- радио- и телевизионные мачты и башни (без механических деталей и поковок);
- мокрые газгольдеры с вертикальными направляющими, резервуары объемом 75 м^3 и более, включая их отдельные элементы (понтоны, подогреватели, патрубки и т.д.) без арматуры и механизмов, силосы;

[1] Не входящие в комплектную поставку оборудования.

- градирни и водонапорные башни (без механизмов);
- трубы вытяжные вентиляционные и дымовые;
- шахтное строительство и канатные дороги;
- опоры мачты ЛЭП (без механических деталей) и открытые подстанции;
- пролетные строения и опорные части мостов;
- опоры контактной сети железных дорог;
- гидротехнические сооружения (балки забральные, закладные части, пути затворов и др.);
- шпунтовые ограждения;
- некоторые элементы коксохимических заводов.

Не относятся к стальным строительным конструкциям:

- изделия, не требующие монтажа, изготовляемые по стандартам и техническим условиям машиностроения;
- трубопроводы, не входящие в состав проектов КМ;
- инвентарные конструкции и изделия (кроме каркасов временных зданий);
- конструкции и изделия, входящие в состав оборудования.

Номенклатура стальных строительных конструкций в основном соответствует изделиям, приведенным в ранее действовавших прейскуранте 01–22 «Оптовые цены на строительные стальные конструкции» и сборнике СНиП 1V–4–82 средних районных сметных цен на материалы, изделия и конструкции, часть II, разд.2 «Стальные конструкции».

Стальные конструкции доукомплектовывающие или входящие в состав технологического оборудования (главным образом вспомогательные или поддерживающие) иногда называются технологическими металлоконструкциями. В настоящее время термин «технологические металлоконструкции» не применяется, и эту категорию изделий относят либо к стальным строительным, либо (при поставках в комплекте с оборудованием) к технологическому оборудованию. Для информационного обеспечения решения задач на основе применения экономико-математических методов и ЭВМ по планированию, учету и анализу деятельности предприятий, занятых проектированием, изготовлением и монтажом, строительные металлоконструкции входят составной частью в единую систему классификации и десятизначного цифрового кодирования Общесоюзного классификатора промышленной и сельскохозяйственной продукции А–ОКП по классу 52 «Оборудование для регулирования дорожного движения, обслуживания сельскохозяйственной техники и вспомогательных средств связи. Конструкции строительные металлические».

Формула структуры кодового обозначения конкретной продукции имеет вид:

$$XXX + X + X + X + XX + XX + КЧ,$$

где – первые три признака (знака) характеризуют подклассы:

52 6 – «Конструкции строительные стальные».

52 7 – «Конструкции и изделия строительные из алюминия и алюминиевых сплавов».

52 8 – «Конструкции строительные стальные легкие и комбинированные».

– 4-й знак, группа, характеризует признак назначения или типа сооружения (конструкции);

– 5-й знак, подгруппа, характеризует особенность конструкции или сооружения;

– 6-й знак, вид, конкретный вид конструкции. Схема групп и подгрупп Высших классификационных группировок (ВКГ – первые шесть знаков) подклассов 52 6, 52 7 и 52 8 К–ОКП дана в табл.15.1–15.3.

– 7 и 8-й знаки определяют кодовое обозначение нормативно-технической документации, по которой изготовляются конструкции. При этом цифры 01–69 занимают серии типовых проектов, ГОСТы и ТУ на конкретные исполнения продукции. Цифры 70–99 касаются индивидуальных конструкций;

– 9 и 10-й знаки указывают конкретный типоразмер конструкции (чертеж). Последние 8–10-й знаки называются ассортиментной частью отраслевого классификатора.

– КЧ – двухзначное контрольное число, необходимое для обнаружения ошибок в десяти разрядных кодах при их записи на документах, при передаче по техническим каналам связи или вводе в ЭВМ. Конкретное число КЧ представляет собой остаток от деления на число 11 суммы парных произведений отдельных цифр, находящихся на каждом разряде кода на порядковые номера этих разрядов в коде. Например, для кода 52 6123 0205 конкретное число (КЧ) определяется следующим образом:

Порядковый номер разряда в коде	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Цифра кода	5	2	6	1	2	3	0	2	0	5	
Произведение порядкового номера на цифру кода	5	4	18	4	10	18	0	16	0	50	
Сумма произведений											125

125:11=11 (остаток 4). Таким образом конкретное число (КЧ) составляет 04.

Некоторые видовые группировки подклассов не раскрыты в полной (ассортиментной) номенклатуре и являются перспективными. Они оставлены для заполнения в целях дальнейшего совершенствования и ведения Классификатора.

Ниже приводится пример обозначения изделия по подклассу 52 6 ОКП:

52 6 – конструкции строительные стальные;

52 61 – конструкции каркасов зданий (кроме решаемых в легких конструкциях);

52 611 – колонны и фахверк одноэтажных каркасов;

52 6111 – колонны одноэтажных каркасов;

52 6111 09 – типовой проект серии 1.424–3, вып.1 «Колонны зданий и объектов черной металлургии с легкой кровлей, оборудованных кранами специального назначения»;

52 6111 0901 – марка конструкции НК–420–IV серии 1.424–3, вып.1 (надкрановая часть крайних рядов колонн при шаге 12 м из сварных двутавров, высота 4200 мм).

В состав Классификатора промышленной и сельскохозяйственной продукции входят три класса, используемых в проектировании и производстве стальных строительных конструкций:

- класс 09 «Прокат (черных металлов) готовый (включая заготовку на экспорт)»;
- класс 11 «Изделия дальнейшего передела из проката»;
- класс 13 «Трубы стальные (без вторых сортов сверхустановленных норм продукции не по заказам)».

В класс 09 прокат для стальных конструкций помещен в группировках 09 0100 «Прокат сортовой» и 09 0200 «Прокат листовой», в классе 11 в группировке 11 2000 «Профили гнутые стальные», в классе 13 в группировках 13 03000 «Трубы электросварные» и 13 1900 «Трубы катаные (общего назначения)». При составлении спецификаций металлопроката на каждый вид элементов конструкций (СМ) и сводных спецификаций (СМС) на объект или этап строительства коды на металлопродукцию выбираются в соответствии с классификатором черной металлургии (ОКП ЧМ) из блоков: марок сталей; профилей; технических характеристик (требований); форм заказа металла и условий поставки.

Блоки марок стали, форм заказа и условий поставок являются общими для всех видов металлопродукции классов 09, 11 и 13 К–ОКП. Блок марок сталей представляет собой систему, соответствующую основным свойствам, назначению и химическому составу по действующей нормативно-технической документации (ГОСТ, ТУ на марки стали). При этом указывается четырехзначный код на каждое наименование в буквенно-цифровом выражении, принятое в стандартах или технических условиях.

Блок профилей проката представляет собой систему цифровых обозначений требований, предъявляемых к продукции по сложности конфигурации, точности изготовления, размерному сортаменту действующим ГОСТам, ОСТам и ТУ.

Блок технических требований представляет систему цифровых кодовых обозначений важнейших качественных характеристик металлопродукции, достигаемых применением специальных технологических режимов в соответствии с требованиями СНиП на проектирование стальных конструкций. Этот блок состоит из трех частей: четырехзначного кодового обозначения; важнейших качественных характеристик исполнения проката и сокращенного условного их обозначения; номера (шифра) ГОСТа и ТУ.

В спецификацию металлопроката входит только четырехзначный код технических характеристик (качественных требований). Группа прочности дифференцированной стали определяется в блоке технических требований. Категория углеродистой стали определена в блоке марок сталей, а категория низколегированных – в блоке технических требований.

Блок формы заказа и условий поставки представляет собой систему двухзначных цифровых кодовых обозначений требований к поставляемой партии проката черных металлов в части ограничения по размерам (нормальной, мерной, кратной или ограниченной длины), условий поставок (в мотках, на катушках, в рулонах и т.п.) и других требований, оговариваемых в зависимости от формы заказа металлопродукции.

ОКП постоянно изменяется, так как все время изменяется ассортимент выпускаемой продукции в связи с производством новой продукции и со снятием с производства устаревшей.

Создание ОКП, – надежной информационно-статистической базы для современного учета, анализа и планирования деятельности предприятий, выпускающих все разнообразие видов продукции страны, – в период перестройки экономики оказалось приостановленным из-за общего развала народного хозяйства и отсутствия финансирования. И тем не менее, у специалистов не вызывает сомнения, что с возрождением в России производства, как основы экономической мощи и процветания любого государства, изложенные в настоящей главе результаты выполненных работ по классификации и кодированию строительных металлоконструкций обретут достойную этому труду оценку и будут успешно продолжены.

Функции сбора информации и присвоения кодов новым объектам и классификационным группировкам по подклассу 52 60 КП осуществлял институт ЦНИИ Проектстальконструкция (группировки 52 6460 – Гидромонтаж, 52 6470 – Энергосетьпроект), подклассов 52 7 и 52 80 КП – ЦНИИПроектлегконструкция.

Таблица 15.1. Высшие классификационные группировки подкласса 52 6000 Конструкции строительные стальные

52 6100	Конструкции каркасов зданий (кроме решаемых в легких конструкциях)
52 6110	Колонны и фахверки одноэтажных каркасов
52 6111	Колонны одноэтажных каркасов
52 6112	Фахверки одноэтажных каркасов
52 6120	Балки и фермы подкрановые, конструкции тормозные для подкрановых балок
52 6121	Балки подкрановые
52 6122	Фермы подкрановые
52 6123	Фермы подкрановоподстропильные
52 6124	Конструкции тормозные для подкрановых балок
52 6130	Фермы покрытий
52 6131	Фермы стропильные
52 6132	Фермы подстропильные
52 6133	Опорные стойки ферм
52 6140	Фонари /
52 6141	- светоаэрационные
52 6142	- аэрационные
52 6143	- зенитные
52 6150	Конструкции каркасов зданий / рамные и балки покрытий
52 6151	- рамные сплошностенчатые
52 6152	- рамные решетчатые
52 6153	- балки покрытий
52 6160	Связи / по каркасам промышленных зданий
52 6161	- по колоннам одноэтажных каркасов
52 6162	- фахверка
52 6163	- рамных каркасов
52 6164	- покрытий и фонарей
52 6170	Прогоны /
52 6171	- сплошностенчатые
52 6172	- решетчатые
52 6180	Конструкции многоэтажных каркасов зданий этажерочного типа (кроме конструкций покрытий и подкрановых балок)
52 6181	Колонны многоэтажных каркасов
52 6182	Перекрытия многоэтажных каркасов
52 6183	Связи по колоннам
52 6184	Фахверки многоэтажных каркасов
52 6200	Ограждающие и встраиваемые конструкции зданий
52 6210	Конструкции ограждающие (кроме переплетов, импостов, витражей)
52 6211	Щиты и панели покрытий, стен
52 6212	Потолки подвесные
52 6213	Каркасы и панели перегородок
52 6214	Каркасы стеновых аэрационных щитов
52 6215	Каркасы и панели ворот и дверей
52 6216	Решетки оконные и балконные
52 6217	Двери
52 6218	Экраны защитные
52 6220	Переплеты, панели, импосты, витражи
52 6221	Переплеты и панели оконные
52 6222	Переплеты фонарные
52 6223	Импосты
52 6224	Витражи
52 6230	Конструкции встраиваемые промышленных зданий (кроме лестниц и площадок)
52 6231	Бункеры внутрицеховые
52 6232	Этажерки внутрицеховые
52 6233	Рабочие площадки в зданиях
52 6234	Рельсы крановые
52 6235	Монорельсовые пути и балки для поддержания монорельсов
52 6236	Стеллажи
52 6240	Лестницы и площадки зданий
52 6241	Лестницы с площадками зданий
52 6242	Лестницы зданий
52 6243	Площадки зданий
52 6244	Ограждения лестниц и площадок зданий
52 6245	Косоуры лестничных маршей зданий

52 6246	Площадки для осмотра подкрановых путей
52 6244	Ограждения кровли
52 6250	Покрытия полов /
52 6251	- из стальных штампованных плит
52 6300	Конструкции промышленных сооружений
52 6310	Трубопроводы диаметром 0,6 м и более из листовой стали сварные при рабочем давлении до $60{,}7 \cdot 10^4$ Па с опорами и части к ним
52 6311	Прямые звенья трубопроводов
52 6312	Фасонные части трубопроводов
52 6313	Опорные части, седла, подвески, кронштейны трубопроводов и прочие
52 6314	Компенсаторы трубопроводов, не требующие механической обработки
52 6315	Опоры (колонны) под трубопроводы
52 6320	Эстакады и галереи
52 6321	Эстакады / транспортные
52 6322	- крановые
52 6323	- бетоноукладочные
52 6324	- сливные
52 6325	- материалопроводов
52 6326	Эстакады и галереи под транспортеры
52 6327	Галереи надбункерные
52 6330	Конструкции доменных цехов
52 6331	Собственно доменные печи
52 6332	Блок воздухонагревателей
52 6333	Пылеуловители
52 6334	Конструкции скиповой и транспортерной подачи материалов на колошник
52 6335	Литейный двор
52 6336	Шахты лифтов доменных цехов
52 6337	Газовоздухопроводы
52 6338	Эстакады доменных цехов бункерные
52 6340	Силосы промышленных сооружений, декомпозеры, сгустители
52 6341	Силосы промышленных сооружений
52 6342	Декомпозеры
52 6343	Сгустители
52 6350	Трубы вытяжные вентиляционные и дымовые
52 6351	Каркасы труб вытяжных вентиляционных
52 6352	Каркасы труб дымовых
52 6353	Трубы вытяжные вентиляционные
52 6354	Трубы дымовые
52 6390	Конструкции промышленных сооружений разные
52 6391	Площадки с ограждениями для обслуживания и осмотра технологического оборудования
52 6392	Лестницы с ограждениями для обслуживания и осмотра технологического оборудования
52 6393	Течки, воронки, желоба
52 6394	Бункеры габаритные
52 6395	Опоры (колонны) под технологические трубопроводы
52 6396	Опоры (постаменты, рамы) под технологическое оборудование
52 6397	Защитные ограждения частей машин
52 6400	Конструкции инженерных сооружений
52 6410	Конструкции антенных устройств
52 6411	Телевизионные опоры
52 6412	Опоры радиорелейных линий
52 6413	Радиомачты отдельно стоящие
52 6414	Радиобашни отдельно стоящие
52 6415	Системы антенных устройств
52 6416	Антенные устройства / стационарные, с отражающей поверхностью
52 6417	- подвижные
52 6418	- перевозимые
52 6420	Пролетные строения с опорными частями и опорами мостовых переходов
52 6421	Пролетные строения и опоры железнодорожные и совмещенные
52 6422	Пролетные строения и опоры автодорожные и городские
52 6423	Пролетные строения и опоры пешеходные
52 6424	Пролетные строения и опоры разборные, наплавные и специальные
52 6425	Пролетные строения и опоры трубопроводные

52 6428	Опорные части пролетных строений
52 6430	Конструкции контактной сети железных дорог и тяговых подстанций
52 6431	Опоры (мачты) контактной сети железных дорог
52 6432	Поперечины жесткие сварные контактной сети железных дорог
52 6433	Консоли контактной сети железных дорог
52 6434	Конструкции тяговых подстанций контактной сети железных дорог
52 6440	Конструкции / для шахтного строительства
52 6441	- надшахтных зданий
52 6442	- надшахтных копров
52 6443	- шахтных погрузчиков и разгрузочных станций
52 6444	- расстрелов для армирования стволов, проводники коробчатого сечения
52 6450	Конструкции / канатных дорог
52 6451	- опор канатных дорог
52 6452	- каркасов погрузочных, разгрузочных и промежуточных станций канатных дорог
52 6453	- поворотных и передвижных промежуточных станций канатных дорог
52 6454	- конечных передвижных станций канатных дорог
52 6455	- конечных станций мачтового типа канатных дорог
52 6456	- линейных натяжных станций канатных дорог
52 6457	Балки надрельсовые со сварными башмаками канатных дорог
52 6458	Мосты предохранительные при пересечениях
52 6460	Конструкции гидротехнических сооружений
52 6461	Трубопроводы и уравнительные резервуары гидротехнических сооружений
52 6462	Эстакады и мосты под механизмы и краны, эстакады бетоновозные гидротехнических сооружений
52 6463	Подкрановые пути гидротехнических сооружений
52 6464	Экраны и металлические облицовки гидротехнических сооружений
52 6465	Конструкции причальных устройств гидротехнических сооружений
52 6466	Закладные части гидротехнических затворов и конструкций разборчатых плотин
52 6467	Защитные заграждения гидротехнических сооружений
52 6469	Металлоконструкции гидротехнических сооружений прочие
52 6470	Конструкции / линий электропередач и открытых подстанций
52 6471	- опор линий электропередач
52 6472	- стальные железобетонных опор линий электропередач
52 6473	- стальные фундаментов опор линий электропередач
52 6474	- порталов стальных открытых распределительных устройств подстанций
52 6475	- стальные железобетонных порталов открытых распределительных устройств подстанций
52 6476	- отдельно стоящих молниеотводов и прожекторных мачт
52 6477	- опор под оборудование открытых распределительных устройств
52 6478	- для перекатки трансформаторов и прокладки воздухопроводов и кабелей по территории распределительных устройств
52 6500	Конструкции специальных сооружений
52 6510	Резервуары и газгольдеры рулонированные
52 6511	Резервуары рулонированные вертикальные цилиндрические для нефти и нефтепродуктов
52 6512	Резервуары рулонированные вертикальные цилиндрические для жидкостей, кроме нефти и нефтепродуктов
52 6513	Газгольдеры рулонированные вертикальные цилиндрические
52 6515	Резервуары и газгольдеры рулонированные горизонтальные

52 6516	Резервуары и газгольдеры рулонированные сферические и каплевидные
52 6517	Резервуары рулонированные казематные и траншейные
52 6520	Резервуары и газгольдеры полистовой сборки
52 6521	Резервуары полистовой сборки вертикальные цилиндрические для нефти и нефтепродуктов
52 6522	Резервуары полистовой сборки вертикальные цилиндрические для жидкостей, кроме нефти и нефтепродуктов
52 6523	Газгольдеры полистовой сборки вертикальные цилиндрические
52 6525	Резервуары и газгольдеры полистовой сборки горизонтальные
52 6526	Резервуары и газгольдеры полистовой сборки сферические и каплевидные
52 6527	Резервуары полистовой сборки казематные и траншейные
52 6530	Резервуары и газгольдеры, возводимые комбинированным способом
52 6531	Резервуары, возводимые комбинированным способом, вертикальные цилиндрические для нефти и нефтепродуктов
52 6532	Резервуары, возводимые комбинированным способом, вертикальные цилиндрические для жидкостей, кроме нефти и нефтепродуктов
52 6533	Газгольдеры, возводимые комбинированным способом, вертикальные цилиндрические
52 6535	Резервуары и газгольдеры, возводимые комбинированным способом, горизонтальные
52 6536	Резервуары и газгольдеры, возводимые комбинированным способом, сферические и каплевидные
52 6537	Резервуары возводимые, комбинированным способом, казематные и траншейные
52 6540	Отдельные конструктивные элементы резервуаров и газгольдеров
52 6541	Понтоны для резервуаров
52 6542	Направляющие для резервуаров
52 6543	Направляющие для газгольдеров
52 6550	Конструкции каркасов / промышленных печей
52 6551	- мартеновских печей
52 6552	- термических и нагревательных печей
52 6553	- стеклоплавильных печей
52 6554	- сушил
52 6555	- кожухов ванн для электролиза
52 6560	Конструкции / специальных башен и вышек
52 6561	- водонапорных башен
52 6562	- каркасов грануляционных башен
52 6563	- пожарно-наблюдательных вышек
52 6590	Конструкции специальных сооружений разные
52 6591	Градирни
52 6592	Этажерки
52 6593	Бункеры негабаритные
52 6594	Очистные сооружения
52 6595	Скрубберы коксохимических заводов
52 6596	Конструкции коксохимических сооружений (анкераж, затворы, экраны и пр.)
52 6600	Конструкции для сельскохозяйственного строительства
52 6610	Каркасы животноводческих комплексов /
52 6611	- с защитным покрытием методом горячего цинкования
52 6612	- с защитным покрытием органосиликатными красителями
52 6620	Конструкции каркасов / теплиц
52 6621	- пленочных теплиц ангарного типа для выращивания овощных и цветочных культур
52 6622	- пленочных теплиц блочные для выращивания рассады и овощей
52 6630	Каркасы / оранжерей и парников
52 6631	- оранжерей
52 6632	- парников
52 6640	Башни сенажные
52 6641	Каркасы сенажных башен

Таблица 15.2. Высшие классификационные группировки подкласса 52 7000 Конструкции и изделия (элементы) строительные из алюминия и алюминиевых сплавов

52 7100	Конструкции ограждающие зданий
52 7110	Окна /
52 7111	- с одинарным остеклением в одинарном переплете
52 7112	- с двойным остеклением (стеклопакет) в одинарном переплете
52 7113	- с двойным остеклением (стеклопакет) в одинарном переплете из комбинированных профилей
52 7114	- с двойным остеклением в спаренном переплете
52 7115	- с тройным остеклением в раздельном переплете
52 7116	- с тройным остеклением в спаренном переплете
52 7117	- с остеклением стеклом и стеклопакетом в одинарном переплете
52 7120	Двери /
52 7121	- распашные
52 7122	- качающиеся
52 7123	- раздвижные
52 7124	- складчатые
52 7125	- вращающиеся
52 7126	- комбинированные
52 7130	Витражи, витрины / (включая тамбурные блоки)
52 7131	- с одинарным остеклением в одинарном переплете
52 7132	- с двойным остеклением в раздельном переплете
52 7133	- с двойным остеклением (стеклопакет) в одинарном переплете
52 7140	Конструкции стеновые
52 7141	Каркасные стеновые панели
52 7142	Бескаркасные стеновые панели
52 7150	Перегородки /
52 7151	- каркасные
52 7152	- бескаркасные
52 7153	- раздвижные
52 7160	Потолки подвесные /
52 7161	- реечные
52 7162	- панельные
52 7163	- панельные реечного типа
52 7170	Ограждения / балконов, лоджий, лестничных маршей и площадок
52 7171	- балконов
52 7172	- лоджий
52 7173	- лестничных маршей и площадок
52 7180	Каркасы и панели ворот и дверей
52 7200	Конструкции зданий, совмещающие несущие и ограждающие функции
52 7300	Несущие конструкции зданий и сооружений
52 7400	Конструкции инженерных сооружений
52 7500	Изделия декоративно-облицовочные, погонажные и защитно-декоративные
52 7510	Изделия декоративно-облицовочные /
52 7511	- листовые
52 7512	- профильные
52 7520	Изделия погонажные /
52 7521	- листовые
52 7522	- профильные
52 7530	Изделия защитно-декоративные /
52 7531	- листовые
52 7532	- профильные
52 7533	- решетчатые
52 7600	Конструкции сборно-разборные и объемно-блочные
52 7610	Конструкции сборно-разборные зданий и сооружений
52 7620	Конструкции сборно-разборные вспомогательного назначения
52 7630	Конструкции объемно-блочные

Таблица 15.3. Высшие классификационные группировки подкласса 52 8000 Конструкции строительные стальные легкие и комбинированные

52 8100	Комплекты на здания сборные (модули)
52 8110	Комплекты на здания сборные (модули) с покрытием пространственным /
52 8111	- типа «Кисловодск»
52 8140	Комплекты на здания сборные (модули) с конструкциями рамными /
52 8141	- коробчатого сечения типа «Орск»
52 8200	Комплекты конструкций на здания
52 8210	Комплекты конструкций на здания бескрановые /
52 8211	- с покрытием пространственным
52 8212	- с покрытием плоскостным
52 8213	- с покрытием арочным
52 8214	- с конструкциями рамными
52 8220	Комплекты конструкций на здания крановые /
52 8221	- с покрытием пространственным
52 8222	- с покрытием плоскостным
52 8223	- с покрытием арочным
52 8224	- с конструкциями рамными
52 8260	Комплекты конструкций на помещения встроенные и сборно-разборные/
52 8261	- каркасные
52 8262	- бескаркасные
52 8300	Конструкции несущие каркаса зданий
52 8310	Конструкции покрытий /
52 8311	- пространственные
52 8312	- плоскостные
52 8313	- арочные
52 8320	Конструкции рамные /
52 8321	- бескрановые рядовые
52 8322	- бескрановые связевые
52 8323	- крановые рядовые
52 8324	- крановые связевые
52 8330	Стойки / и ригели конструкций рамных
52 8331	- бескрановые рядовые
52 8332	- бескрановые связевые
52 8333	- крановые рядовые
52 8334	- крановые связевые
52 8335	Ригели рядовые
52 8336	Ригели связевые
52 8340	Колонны /
52 8341	- бескрановые крайние
52 8342	- бескрановые средние
52 8343	- крановые крайние
52 8344	- крановые средние
52 8350	Связи /
52 8351	- по покрытию
52 8352	- по конструкциям рамным
52 8353	- по колоннам бескрановым
52 8354	- по колоннам крановым
52 8360	Фахверк
52 8361	Стойки фахверка / торцевого
52 8362	- продольного бескранового
52 8363	- продольного кранового
52 8364	Ригели фахверка
52 8365	Консоли опорные фахверка, насадки фахверка
52 8370	Прогоны /
52 8371	- решетчатые
52 8372	- сплошностенчатые
52 8380	Конструкции подкрановые
52 8381	Балки подкрановые
52 8382	Пути подкрановые подвесные
52 8383	Монорельсы
52 8384	Конструкции тормозные
52 8400	Конструкции ограждающие
52 8410	Панели стеновые каркасные /
52 8411	- двухслойные с утеплителем несгораемым
52 8412	- двухслойные с утеплителем сгораемым
52 8413	- трехслойные с утеплителем несгораемым
52 8414	- трехслойные с утеплителем сгораемым

52 8420	Панели стеновые бескаркасные /
52 8421	- двухслойные с утеплителем несгораемым
52 8422	- двухслойные с утеплителем сгораемым
52 8423	- трехслойные с утеплителем несгораемым
52 8424	- трехслойные с утеплителем сгораемым
52 8430	Панели кровельные каркасные /
52 8431	- двухслойные с утеплителем несгораемым
52 8432	- двухслойные с утеплителем сгораемым
52 8433	- трехслойные с утеплителем несгораемым
52 8434	- трехслойные с утеплителем сгораемым
52 8440	Панели кровельные бескаркасные /
52 8441	- двухслойные с утеплителем несгораемым
52 8442	- двухслойные с утеплителем сгораемым
52 8443	- трехслойные с утеплителем несгораемым
52 8444	- трехслойные с утеплителем сгораемым
52 8450	Перегородки
52 8451	- каркасные
52 8452	- бескаркасные
52 8460	Потолки подвесные
52 8470	Переплеты оконные /, каркасы витражей, фонарей
52 8471	- глухие одинарные
52 8472	- глухие двойные
52 8473	- створные одинарные
52 8474	- створные двойные
52 8475	Каркасы витражей
52 8476	Каркасы фонарей
52 8480	Ворота /
52 8481	- распашные
52 8482	- подъемные
52 8483	- раздвижные
52 8484	- складчатые
52 8485	- телескопические
52 8486	- шторные
52 8487	- комбинированные
52 8490	Двери /
52 8491	- распашные
52 8492	- качающиеся
52 8493	- раздвижные
52 8494	- складчатые
52 8495	- вращающиеся
52 8496	- комбинированные
52 8500	Элементы конструктивные
52 8510	Элементы комплексов /
52 8511	- зданий бескрановых
52 8512	- зданий крановых
52 8513	- зданий инвентарных и помещений встроенных
52 8520	Элементы / каркаса зданий
52 8521	- покрытий
52 8522	- конструкций рамных
52 8523	- стоек и ригелей конструкций рамных
52 8524	- колонн
52 8525	- связей
52 8526	- фахверка
52 8527	- прогонов
52 8528	- конструкций подкрановых
52 8530	Элементы конструкций ограждающих /
52 8531	- стеновых каркасных
52 8532	- стеновых бескаркасных
52 8533	- кровельных каркасных
52 8534	- кровельных бескаркасных
52 8535	- перегородок
52 8536	- потолков подвесных
52 8537	- переплетов оконных, витражей, фонарей
52 8538	- ворот, дверей
52 8590	Элементы / обустройства зданий, элементы доборные, элементы крепления
52 8591	- обустройства зданий
52 8592	- доборные
52 8599	- крепления

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

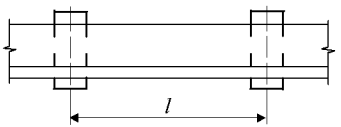
1. Высшие классификационные группировки ОКП. – М.: Стройиздат, 1986.
2. Методика разработки классификации и кодирования строительных стальных конструкций подкласса 52 6000, ЦНИИпроектстальконструкция. – М.: 1973.

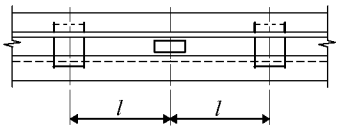
ГЛАВА 16

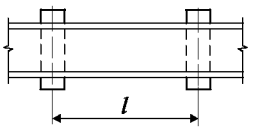
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ К РАСЧЕТУ И ПОДБОРУ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

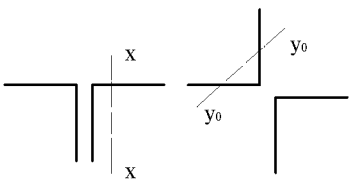
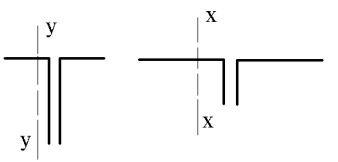
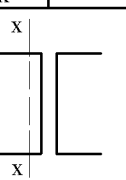
16.1. Расстояния между прокладками элементов составных сечений

Таблица 16.1.







Уголки равнополочные (ГОСТ 8509-93)					Уголки неравнополочные (ГОСТ 8510-86*)					Швеллеры (ГОСТ 8240-89)				
Ширина полки, мм					Ширина полки, мм					№ профиля	с уклоном внутренних граней полок		с параллельными гранями полок	
														
	l, мм					l, мм					l, мм			
	сжатие 40 r_x	растяжение 80 r_x	сжатие 40 r_{y_o}	растяжение 80 r_{y_o}		сжатие 40 r_y	растяжение 80 r_y	сжатие 40 r_x	растяжение 80 r_x		сжатие 40 r_x	растяжение 80 r_x	сжатие 40 r_x	растяжение 80 r_x
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20	230	460	150	300	25×16	175	350	310	620	5	380	760	395	790
25	295	590	190	380	32×20	215	430	400	800	6,5	435	870	450	900
28	340	680	220	440	40×25	275	550	500	1000	8	475	950	495	990

Продолжение табл. 16.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
32	380	760	245	490	45×28	310	620	565	1130	10	550	1100	575	1150
36	435	870	280	560	50×32	360	720	635	1270	12	615	1230	650	1300
40	485	970	310	620	56×36	405	810	705	1410	14	680	1360	725	1450
45	545	1090	350	700	63×40	435	870	785	1570	14a	735	1470	785	1570
50	610	1220	390	780	70×45	505	1010	890	1780	16	750	1500	800	1600
56	685	1370	440	880	75×50	560	1120	940	1880	16a	805	1610	860	1720
63	770	1540	495	990	80×50	560	1120	1020	2040	18	815	1630	880	1760
70	850	1700	545	1090	90×56	625	1250	1140	2280	18a	870	1740	940	1880
75	905	1810	595	1190	100×63	700	1400	1260	2520	20	880	1760	955	1910
80	975	1950	625	1250	110×70	790	1580	1400	2800	20a	940	1880	1015	2030
90	1100	2200	705	1410	125×80	895	1790	1580	3160	22	950	1900	1030	2060
100	1190	2380	775	1550	140×90	1025	2050	1790	3580	22a	1020	2040	1110	2220
110	1355	2710	870	1740	160×100	1120	2240	2030	4060	24	1040	2080	1140	2280
125	1510	3020	975	1950	180×110	1240	2480	2300	4600	24a	1110	2220	1210	2420
140	1720	3440	1100	2200	200×125	1410	2820	2550	5100	27	1090	2180	1195	2390
160	1940	3880	1245	2490	250×160	1810	3620	3180	6360	30	1135	2270	1250	2500
180	2235	4470	1430	2860	–	–	–	–	–	33	1190	2380	1300	2600
200	2400	4800	1555	3110	–	–	–	–	–	36	1240	2480	1350	2700
220	2720	5440	1745	3490	–	–	–	–	–	40	1290	2580	1405	2810
250	3035	6070	1955	3910	–	–	–	–	–					

Примечание. В пределах сжатого элемента следует ставить не менее двух прокладок.

16.2. Коэффициенты φ и φ_e для проверки на устойчивость центрально и внецентренно-сжатых стержней

16.2.1. Пояснения к таблицам 16.2-16.4

В табл.16.2 приведены коэффициенты φ, вычисленные по формулам 8-10 п.5.3. СНиП II-23-81*. Диапазон изменения гибкостей принят $10 \le \lambda \le 220$.

Коэффициенты φ вычислены для сталей, рекомендуемых к применению табл.50 и 51 СНиП II-23-81*.

В табл.16.3 приведены коэффициенты φ_e для сплошностенчатых стержней, определяемые в зависимости от условной гибкости λ и приведенного относительного эксцентриситета m_{ef}.

В табл.16.4 приведены коэффициенты φ_e для сквозных стержней с решетками или планками, расположенными в плоскости изгиба, определяемые в зависимости от условной приведенной гибкости λ_{ef} и относительного эксцентриситета m.

Значения коэффициента φ_e следует принимать не выше значений коэффициента φ продольного изгиба центрально сжатых элементов.

Приведенные в таблицах значения коэффициентов φ и φ_e увеличены в 1000 раз.

16.2.2. Коэффициенты φ для проверки на устойчивость центрально-сжатых стержней

Таблица 16.2

λ	Коэффициенты φ для элементов с расчетным сопротивлением R_y, МПа														
	210	220	230	240	250	260	270	280	300	315	325	335	345	365	380
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10	988	987	987	987	986	986	986	985	985	984	984	984	983	983	982
12	984	984	983	983	982	982	981	981	980	979	979	978	978	977	977
14	980	979	979	978	977	977	976	976	975	974	973	973	972	971	971
16	975	975	974	973	972	972	971	970	969	968	967	967	966	965	964
18	971	970	969	968	967	966	965	965	963	962	961	960	960	958	957
20	966	965	963	962	961	960	959	959	957	955	954	954	953	951	950
22	960	959	958	957	956	954	953	952	950	948	947	947	946	944	942
24	955	953	952	951	949	948	947	945	943	941	940	939	938	936	934
26	949	947	946	944	943	941	940	939	936	934	933	931	930	928	926
28	943	941	940	938	936	934	933	931	928	926	925	923	922	919	917
30	937	935	933	931	929	927	926	924	920	918	916	915	913	910	908
32	930	928	926	924	922	920	918	916	912	910	908	906	904	901	899
34	924	921	919	917	915	912	910	908	904	901	899	897	895	892	889
36	917	914	912	909	907	905	902	900	895	892	890	888	886	882	879
38	910	907	904	902	899	896	894	891	887	883	881	879	876	872	869
40	903	900	897	894	891	888	885	883	878	874	871	869	867	862	859
42	895	892	889	886	883	880	877	874	868	864	862	859	856	851	848
44	888	884	881	878	874	871	868	865	859	854	851	849	846	841	837
46	880	876	873	869	866	862	859	855	849	844	841	838	835	830	826
48	872	868	864	860	857	853	849	846	839	834	831	828	825	818	814

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
50	864	860	856	852	848	844	840	836	829	824	820	817	813	807	802
52	856	851	847	843	838	834	830	826	818	813	809	806	802	795	790
54	847	843	838	833	829	825	820	816	808	802	798	794	791	783	778
56	839	834	829	824	819	815	810	806	797	791	787	783	779	771	766
58	830	825	820	815	810	805	800	795	786	780	775	771	767	759	753
60	821	816	810	805	800	795	789	785	775	768	764	759	755	745	735
62	812	806	801	795	790	784	779	774	764	756	752	748	740	726	715
64	803	797	791	785	779	774	768	763	752	745	737	729	721	706	695
66	794	787	781	775	769	763	757	751	740	727	719	711	703	687	676
68	785	778	771	765	758	752	746	741	722	709	701	692	684	669	657
70	775	768	761	754	748	741	734	724	705	692	683	674	666	650	638
72	765	758	751	744	738	727	717	707	688	674	665	657	648	632	620
74	755	748	740	732	721	711	700	690	671	657	648	639	630	614	602
76	745	737	728	717	705	695	684	674	654	640	631	622	613	596	584
78	735	725	713	701	690	679	668	657	637	623	614	605	596	579	566
80	723	710	698	686	674	663	652	641	621	606	597	588	579	561	549
82	708	695	683	670	659	647	636	626	605	590	581	571	562	544	531
84	694	680	668	655	644	632	621	610	589	574	564	555	546	528	514
86	679	666	653	641	629	617	606	595	573	558	548	539	529	511	498
88	665	652	639	626	614	602	591	579	558	543	533	523	513	495	481
90	651	637	624	612	599	587	576	564	543	527	517	507	498	479	465
92	637	624	610	597	585	573	561	550	528	512	502	492	482	463	449
94	624	610	596	583	571	559	547	535	513	497	487	477	467	448	433
96	610	596	583	569	557	444	533	521	499	482	472	462	452	432	418
98	597	583	569	556	543	531	519	507	484	468	457	447	437	417	403
100	584	570	556	542	529	517	505	493	470	454	443	433	423	403	388
102	571	557	543	529	516	504	491	479	456	440	429	419	408	388	373
104	558	544	530	516	503	490	478	466	443	426	415	405	394	374	359
106	546	531	517	503	490	477	465	453	429	413	402	391	380	360	345
108	533	519	504	491	477	464	452	440	416	399	388	377	367	346	333
110	521	506	492	478	465	452	439	427	403	386	375	364	352	334	321
112	509	494	480	466	452	439	427	414	391	373	362	350	340	323	311
114	497	482	468	454	440	427	414	402	378	361	348	339	329	312	300
116	486	471	456	442	428	415	402	390	366	347	337	328	319	302	291
118	474	459	444	430	417	403	391	378	352	336	326	317	308	292	281
120	463	448	433	419	405	392	379	366	341	326	316	307	299	283	273
122	452	436	422	408	394	380	367	355	330	316	306	298	289	274	264
124	441	425	411	396	383	369	356	342	320	306	297	289	281	266	256
126	430	415	400	386	372	358	344	332	311	297	288	280	272	258	249
128	419	404	389	375	361	346	333	322	302	288	280	272	264	251	241

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
130	409	394	379	364	348	336	324	313	293	280	272	264	257	244	234
132	399	383	368	352	338	326	315	304	285	272	264	257	250	237	228
134	389	373	358	342	329	317	306	295	277	264	257	249	243	230	222
136	379	363	346	332	320	308	297	287	269	257	250	243	236	224	215
138	369	351	337	323	311	300	289	279	262	250	243	236	230	218	210
140	360	342	328	315	303	292	281	272	255	243	236	230	223	212	204
142	348	333	319	306	295	284	274	265	248	237	230	224	218	206	199
144	338	324	310	298	287	276	267	258	242	231	224	218	212	201	194
146	330	315	302	291	280	269	260	251	235	225	218	212	207	196	189
148	321	307	295	283	272	263	253	245	229	219	213	207	201	191	184
150	313	300	287	276	266	256	247	239	224	214	208	202	196	186	180
152	305	292	280	269	259	250	241	233	218	209	203	197	192	182	175
154	298	285	273	263	253	244	235	227	213	204	198	192	187	177	171
156	291	278	267	256	247	238	230	222	208	199	193	188	183	173	167
158	284	272	261	250	241	232	224	217	203	194	188	183	178	169	163
160	277	265	254	244	235	227	219	212	198	190	184	179	174	165	159
162	271	259	249	239	230	222	214	207	194	185	180	175	170	162	156
164	265	253	243	233	225	217	209	202	189	181	176	171	166	158	152
166	259	248	237	228	220	212	204	198	185	177	172	167	163	154	149
168	253	242	232	223	215	207	200	193	181	173	168	164	159	151	146
170	247	237	227	218	210	202	195	189	177	169	165	160	156	148	143
172	242	232	222	213	205	198	191	185	173	166	161	157	152	145	139
174	237	227	217	209	201	194	187	181	170	162	158	153	149	142	137
176	232	222	213	204	197	190	183	177	166	159	154	150	146	139	134
178	227	217	208	200	193	186	179	173	163	156	151	147	143	136	131
180	222	213	204	196	189	182	176	170	159	152	148	144	140	133	128
182	218	208	200	192	185	178	172	166	156	149	145	141	137	131	126
184	213	204	196	188	181	175	169	163	153	146	142	138	135	128	123
186	209	200	192	184	178	171	165	160	150	144	139	136	132	125	121
188	205	196	188	181	174	168	162	157	147	141	137	133	130	123	119
190	201	192	184	177	171	165	159	154	144	138	134	130	127	121	116
192	197	189	181	174	167	162	156	151	142	135	132	128	125	118	114
194	193	185	177	171	164	158	153	148	139	133	129	126	122	116	112
196	189	181	174	167	161	155	150	145	136	130	127	123	120	114	110
198	186	178	171	164	158	153	147	143	134	128	124	121	118	112	108
200	182	175	168	161	155	150	145	140	131	126	122	119	116	110	106
202	179	172	165	158	153	147	142	137	129	123	120	117	114	108	104
204	176	168	162	155	150	144	140	135	127	121	118	115	112	106	102
206	173	165	159	153	147	142	137	133	125	119	116	113	110	104	101
208	170	163	156	150	145	139	135	130	122	117	114	111	108	103	99
210	167	160	153	147	142	137	132	128	120	115	112	109	106	101	97
212	164	157	151	145	140	135	130	126	118	113	110	107	104	99	96
214	161	154	148	142	137	132	128	124	116	111	108	105	102	97	94
216	158	152	146	140	135	130	126	122	114	109	106	103	101	96	92
218	156	149	143	138	133	128	124	120	112	108	105	102	99	94	91
220	153	147	141	135	130	126	122	118	111	106	103	100	98	93	89

16.2.3. Коэффициенты φ_e для проверки на устойчивость внецентренно-сжатых сплошностенчатых стержней

Таблица 16.3.

$\bar{\lambda}$	Коэффициенты φ_e при приведенном относительном эксцентриситете m_{ef}																										$\bar{\lambda}$
	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10	12	14	17	20	
0,5	967	922	850	782	722	669	620	577	538	469	417	370	337	307	280	260	237	222	210	183	164	150	125	106	90	77	0,5
0,6	959	908	836	768	708	655	609	566	527	461	410	364	331	302	276	256	235	219	207	181	163	148	124	105	89	76	0,6
0,7	950	895	821	754	694	641	597	554	516	452	403	358	325	297	272	252	232	217	204	180	161	147	123	105	88	76	0,7
0,8	942	881	807	739	681	628	586	543	506	444	396	353	319	293	267	248	230	214	202	178	160	145	123	104	88	75	0,8
0,9	933	868	792	725	667	614	574	531	495	435	389	347	313	288	263	244	227	212	199	177	158	144	122	104	87	75	0,9
1,0	925	854	778	711	653	600	563	520	484	427	382	341	307	283	259	240	225	209	196	175	157	142	121	103	86	74	1,0
1,1	915	844	766	698	641	590	552	510	475	419	375	335	302	279	255	237	221	206	193	173	155	140	120	102	85	73	1,1
1,2	905	834	753	685	629	579	541	500	466	411	368	329	297	275	251	233	218	203	190	170	153	139	118	101	84	72	1,2
1,3	895	824	741	673	617	569	529	490	457	404	361	324	293	270	248	230	214	201	188	168	152	137	117	101	84	72	1,3
1,4	885	814	728	660	605	558	518	480	448	396	354	318	288	266	244	226	211	198	185	165	150	136	115	100	83	71	1,4
1,5	875	804	716	647	593	548	507	470	439	388	347	312	283	262	240	223	207	195	182	163	148	134	114	99	82	70	1,5
1,6	863	792	703	635	582	538	497	461	431	381	341	307	278	258	236	220	204	192	180	162	146	132	113	98	81	69	1,6
1,7	850	779	691	623	570	527	487	452	422	374	334	302	274	253	233	216	201	190	177	161	144	130	111	97	81	69	1,7
1,8	838	767	678	611	559	517	477	443	414	366	328	296	269	249	229	213	199	187	175	160	142	129	110	96	80	68	1,8
1,9	825	754	666	599	547	506	467	434	405	359	321	291	265	244	226	209	196	185	172	159	140	127	108	95	80	68	1,9
2,0	813	742	653	587	536	496	457	425	397	352	315	286	260	240	222	206	193	182	170	158	138	125	107	94	79	67	2,0
2,1	799	728	640	575	525	485	448	417	389	345	309	281	256	236	218	203	190	179	168	155	136	124	106	93	78	67	2,1
2,2	785	714	627	563	514	474	438	408	381	338	304	276	251	232	215	200	187	176	165	152	135	122	105	92	78	66	2,2
2,3	770	700	613	550	502	464	429	400	373	331	298	272	247	228	211	196	184	174	163	150	133	121	103	92	77	66	2,3
2,4	756	686	600	538	491	453	419	391	365	324	293	267	242	224	208	193	181	171	160	147	132	119	102	91	77	65	2,4
2,5	742	672	587	526	480	442	410	383	357	317	287	262	238	220	204	190	178	168	158	144	130	118	101	90	76	65	2,5
2,6	727	657	574	514	469	433	401	375	350	311	282	257	234	216	201	187	176	166	156	142	129	117	100	89	75	65	2,6
2,7	712	642	560	502	458	423	392	367	342	305	276	252	230	213	197	184	173	163	154	140	127	116	99	88	75	64	2,7
2,8	697	627	547	489	447	414	383	358	335	299	271	248	225	209	194	181	171	161	151	139	126	114	99	88	74	64	2,8
2,9	682	612	533	477	436	404	374	350	327	293	265	243	221	206	190	178	168	158	149	137	124	113	98	87	74	63	2,9
3,0	667	597	520	465	425	395	365	342	320	287	260	238	217	202	187	175	166	156	147	135	123	112	97	86	73	63	3,0

Продолжение табл. 16.3

$\bar{\lambda}$	Коэффициенты φ_e при приведенном относительном эксцентриситете m_{ef}																										$\bar{\lambda}$
	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10	12	14	17	20	
3,1	651	582	507	454	415	386	357	334	313	281	255	234	213	198	184	172	163	154	145	133	121	111	96	85	72	62	3,1
3,2	635	567	494	442	405	377	349	326	307	275	249	229	209	194	181	170	161	152	143	131	120	110	95	84	71	62	3,2
3,3	619	552	481	431	395	368	341	319	300	270	244	225	206	191	178	167	158	149	141	129	118	108	94	84	71	61	3,3
3,4	603	537	468	419	385	359	333	311	294	264	238	220	202	187	175	165	156	147	139	127	117	107	93	83	70	61	3,4
3,5	587	522	455	408	375	350	325	303	287	258	233	216	198	183	172	162	153	145	137	125	115	106	92	82	69	60	3,5
3,6	571	507	443	398	366	342	318	296	281	253	229	212	195	180	169	159	150	143	135	124	114	104	91	81	68	59	3,6
3,7	554	492	431	387	357	334	311	290	275	248	225	208	191	177	166	157	148	141	133	122	112	103	90	80	68	59	3,7
3,8	538	477	418	377	348	325	303	283	268	242	220	205	188	174	164	154	145	139	131	121	111	101	90	80	67	58	3,8
3,9	521	462	406	366	399	317	296	277	262	237	216	201	184	171	161	152	143	137	129	119	109	100	89	79	67	58	3,9
4,0	505	447	394	356	330	309	289	270	256	232	212	197	181	168	158	149	140	135	127	118	108	98	88	78	66	57	4,0
4,1	488	434	384	347	322	302	283	264	251	227	208	193	178	165	156	147	138	133	125	116	107	97	87	77	66	57	4,1
4,2	470	421	373	338	313	294	276	259	245	222	204	189	175	163	153	144	136	131	123	115	105	96	86	77	65	56	4,2
4,3	453	408	363	328	305	287	270	253	240	218	200	186	171	160	151	142	134	129	122	113	104	95	85	76	65	56	4,3
4,4	435	395	352	319	296	279	263	248	234	213	196	182	168	158	148	139	132	127	120	112	102	94	84	76	64	55	4,4
4,5	418	382	342	310	288	272	257	242	229	208	192	178	165	155	146	137	130	125	118	110	101	93	83	75	64	55	4,5
4,6	405	371	333	303	281	265	251	237	224	204	189	175	162	153	144	135	128	123	117	109	100	92	82	74	64	55	4,6
4,7	392	360	323	295	274	259	244	231	219	200	185	172	159	150	142	133	126	122	115	107	99	91	81	74	63	54	4,7
4,8	380	348	314	288	267	252	238	226	215	196	182	168	156	148	139	130	124	120	114	106	97	90	81	73	63	54	4,8
4,9	367	337	304	280	260	246	231	220	210	192	178	165	153	145	137	128	122	119	112	104	96	89	80	73	62	53	4,9
5,0	354	326	295	273	253	239	225	215	205	188	175	162	150	143	135	126	120	117	111	103	95	88	79	72	62	53	5,0

Примечания: 1. Значения φ_e в таблице увеличены в 1000 раз. 2. Значение φ_e принимать не выше значений φ.

3. $\bar{\lambda} = \lambda\sqrt{R_y / E}$ – условная гибкость.

16.2.4. Коэффициенты φ_e для проверки на устойчивость внецентренно-сжатых сквозных стержней

Таблица 16.4

$\bar{\lambda}_{ef}$	Коэффициенты φ_e при относительном эксцентриситете m																										$\bar{\lambda}_{ef}$
	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10	12	14	17	20	
0,5	908	800	666	571	500	444	400	364	333	286	250	222	200	182	167	154	143	133	125	111	100	91	77	67	56	48	0,5
0,6	901	792	661	567	497	441	397	361	332	285	249	221	199	182	167	153	143	133	124	111	100	91	77	67	56	48	0,6
0,7	894	785	656	564	493	439	395	359	331	284	247	220	199	181	166	153	143	132	123	110	99	91	77	67	56	47	0,7
0,8	886	777	650	560	490	436	392	356	330	282	246	220	198	181	166	152	142	132	123	110	99	90	77	66	55	47	0,8
0,9	879	770	645	557	486	434	390	354	329	281	244	219	198	180	165	152	142	131	122	109	98	90	77	66	55	46	0,9
1,0	872	762	640	553	483	431	387	351	328	280	243	218	197	180	165	151	142	131	121	109	98	90	77	66	55	46	1,0
1,1	864	755	632	546	477	426	383	348	325	278	242	217	196	180	165	151	141	130	121	109	97	90	77	66	55	46	1,1
1,2	855	748	624	539	471	421	379	345	321	276	242	215	194	179	164	150	140	130	120	109	97	89	77	66	54	46	1,2
1,3	847	741	616	531	466	417	375	342	318	275	241	214	193	179	164	150	139	129	120	108	97	89	77	65	54	45	1,3
1,4	838	734	608	524	460	412	371	339	314	273	241	212	191	178	163	149	138	129	119	108	96	88	77	65	53	45	1,4
1,5	830	727	600	517	454	407	367	336	311	271	240	211	190	178	163	149	137	128	119	108	96	88	77	65	53	45	1,5
1,6	819	716	591	509	448	402	363	332	307	268	238	209	189	176	162	148	136	127	119	108	96	88	77	65	53	45	1,6
1,7	808	705	582	502	442	397	359	329	304	265	235	207	187	175	160	147	135	127	118	107	96	87	77	65	53	45	1,7
1,8	796	695	574	494	435	391	354	325	300	261	233	206	186	173	159	145	134	126	118	107	95	87	76	64	52	45	1,8
1,9	785	684	565	487	429	386	350	322	297	258	230	204	184	172	157	144	133	126	117	106	95	86	76	64	52	45	1,9
2,0	774	673	556	479	423	381	346	318	293	255	228	202	183	170	156	143	132	125	117	106	95	86	76	64	52	45	2,0
2,1	761	660	546	471	417	376	341	314	289	252	225	200	181	168	154	142	131	124	116	105	95	85	76	64	52	45	2,1
2,2	748	647	536	463	410	370	336	310	285	248	223	198	180	167	153	140	130	123	115	105	94	85	75	63	52	45	2,2
2,3	734	634	527	455	404	365	332	305	282	245	220	196	178	165	151	139	129	122	115	104	94	84	75	63	51	44	2,3
2,4	721	621	517	447	397	359	327	301	278	241	218	194	177	164	150	137	128	121	114	104	93	84	74	62	51	44	2,4
2,5	708	608	507	439	391	354	322	297	274	238	215	192	175	162	148	136	127	120	113	103	93	83	74	62	51	44	2,5
2,6	694	595	497	431	384	348	317	293	270	235	212	190	173	161	146	135	126	119	112	102	93	83	73	62	51	44	2,6
2,7	680	583	486	423	377	342	312	288	266	232	209	188	171	160	144	134	125	118	112	102	92	82	73	62	51	44	2,7
2,8	665	570	476	415	370	336	306	284	263	228	207	186	169	160	142	132	123	118	111	101	92	82	72	61	51	43	2,8
2,9	651	558	465	407	363	330	301	279	259	225	204	184	167	159	140	131	122	117	111	101	91	81	72	61	51	43	2,9
3,0	637	545	455	399	356	324	296	275	255	222	201	182	165	153	138	130	121	116	110	100	91	81	71	61	51	43	3,0

Продолжение табл. 16.4

$\bar{\lambda}_{ef}$	Коэффициенты φ_e при относительном эксцентриситете m																										$\bar{\lambda}_{ef}$
	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10	12	14	17	20	
3,1	622	532	444	390	349	318	291	270	251	219	198	180	163	155	136	129	120	115	109	99	90	80	71	61	51	43	3,1
3,2	607	519	434	381	342	312	286	265	247	216	195	177	161	152	135	127	119	114	108	98	90	80	70	60	51	43	3,2
3,3	592	506	423	373	334	306	280	261	243	212	193	175	159	149	133	126	117	112	108	98	89	79	70	60	50	42	3,3
3,4	577	493	413	364	327	300	275	256	239	209	190	172	157	146	132	124	116	111	107	97	89	79	69	59	50	42	3,4
3,5	562	480	402	355	320	294	270	251	235	206	187	170	155	143	130	123	115	110	106	96	88	78	69	59	50	42	3,5
3,6	546	468	393	347	314	288	265	246	231	203	184	168	153	141	129	122	114	109	105	95	87	78	69	59	50	42	3,6
3,7	531	457	384	340	307	282	260	242	227	200	181	166	151	139	128	121	113	108	104	95	86	77	68	58	50	42	3,7
3,8	515	445	375	332	301	276	256	237	223	197	179	164	149	137	126	120	112	107	102	94	86	77	68	58	49	41	3,8
3,9	500	434	366	325	294	270	251	233	219	194	176	162	147	135	125	119	111	106	101	94	85	76	67	57	49	41	3,9
4,0	484	422	357	317	288	264	246	228	215	191	173	160	145	133	124	118	110	105	100	93	84	76	67	57	49	41	4,0
4,1	470	411	349	310	282	259	241	224	211	188	170	158	143	131	122	116	109	104	99	92	83	75	67	57	49	41	4,1
4,2	456	399	340	303	276	253	237	220	207	185	168	156	141	129	121	115	108	103	98	91	82	75	66	56	49	41	4,2
4,3	443	388	332	295	270	248	232	215	204	182	165	153	140	128	119	113	107	102	98	91	81	74	66	56	48	40	4,3
4,4	429	376	323	288	264	242	228	211	200	179	163	151	138	126	118	112	106	101	97	90	80	74	65	55	48	40	4,4
4,5	415	365	315	281	258	237	223	207	196	176	160	149	136	124	116	110	105	100	96	89	79	73	65	55	48	40	4,5
4,6	402	355	307	275	252	232	219	203	192	173	158	147	134	123	114	109	104	99	95	88	78	73	64	55	48	40	4,6
4,7	389	345	300	269	247	227	214	199	189	170	156	145	132	121	113	108	103	98	94	88	78	72	64	55	48	40	4,7
4,8	376	335	292	262	241	222	210	194	185	167	153	142	131	120	111	106	102	97	94	87	77	72	63	54	47	39	4,8
4,9	363	325	285	256	236	217	205	190	182	164	151	140	129	118	110	105	101	96	93	87	77	71	63	54	47	39	4,9
5,0	350	315	277	250	230	212	201	186	178	161	149	138	127	117	108	104	100	95	92	86	76	71	62	54	47	39	5,0

Примечания: 1. Значения φ_e в таблице увеличены в 1000 раз. 2. Значение φ_e принимать не выше значений φ.

3. $\bar{\lambda}_{ef} = \lambda_{ef}\sqrt{R_y / E}$ – условная приведенная гибкость стержня.

16.3. Коэффициенты φ_b для проверки общей устойчивости изгибаемых элементов

16.3.1. Указания по определению коэффициентов φ_b с помощью таблиц 16.5-16.10.

В разделе приведены таблицы вспомогательных коэффициентов φ_1' для балок из следующих профилей в зависимости от величины пролета или расстояний между точками закрепления сжатого пояса:

Профили балок	Номера таблиц
Нормальные двутавры по ГОСТ 26020-83	16.5
Широкополочные двутавры по ГОСТ 26020-83	16.6
Колонные двутавры по ГОСТ 26020-83	16.7
Двутавры по ГОСТ 8239-89	16.8
Двутавры по ГОСТ 19425-74*	16.9
Швеллеры по ГОСТ 8240-89 с уклоном полок	16.10

Вычисление вспомогательных коэффициентов φ_1' производилось по формуле (174) СНиП II-23-81* без деления результата на R_y

$$\varphi_1' = \psi \frac{I_y}{I_x}\left(\frac{h}{l_{ef}}\right)^2 \cdot E .$$

Для определения значений φ_b следует предварительно вычислить величину коэффициента φ_1', поделив φ_1' на R_y в МПа.

Величина коэффициента φ_b принимается равной:

$$\varphi_b = \varphi_1 \quad \text{при} \quad \varphi_1 \le 0{,}85 ;$$

$$\varphi_b = 0{,}68 + 0{,}21 \cdot \varphi_1 \quad \text{при} \quad \varphi_1 > 0{,}85 \text{, но не более единицы.}$$

При одном закреплении в середине пролета вспомогательные коэффициенты φ_1' можно определить умножением на коэффициенты, приведенные в табл.77 СНиП II-23-81*.

Примеры:

1. Определить коэффициент φ_b для балки из двутавра нормального по ГОСТ 26020-83 № 60Б1 пролетом 6 м из стали С285 с расчетным сопротивлением $R_y = 270$ МПа. Сосредоточенная нагрузка приложена к нижнему поясу.

По табл.16.5 находим значение $\varphi_1' = 444$.

$$\varphi_1 = \frac{444}{270} = 1{,}64 .$$

Поскольку $\varphi_1 > 0{,}85$, φ_b определяется по формуле

$$\varphi_b = 0{,}68 + 0{,}21 \cdot 1{,}64 = 1{,}02 > 1$$

Принимаем $\varphi_b = 1$.

2. Определить φ_b для балки из двутавра нормального по ГОСТ 26020-83 № 30Б1 пролетом 8 м из стали С245 с расчетным сопротивлением $R_y = 240$ МПа. Сосредоточенная нагрузка приложена к верхнему поясу в середине пролета. Балка имеет одно горизонтальное закрепление в середине пролета.

По табл.16.5 находим значение $\varphi_1' = 191$ для $l = 4$ м, согласно п.5.15 СНиП II-23-81*. В этом случае

$$\varphi_1' = 1{,}75 \cdot 191 = 334$$

и

$$\varphi_1 = \frac{334}{240} = 1{,}39 .$$

Поскольку $\varphi_1 > 0{,}85$, φ_b определяется по формуле

$$\varphi_b = 0{,}68 + 0{,}21 \cdot 1{,}39 = 0{,}972 .$$

3. Определить φ_b для балки из швеллера № 30 по ГОСТ 8240-89 пролетом 6 м из стали С245 с расчетным сопротивлением $R_y = 240$ МПа.

Равномерно распределенная нагрузка приложена к нижнему поясу.

По табл.16.10 находим значение $\varphi_1' = 116$.

Коэффициент

$$\varphi_b = \frac{116}{240} = 0{,}483 .$$

4. Все данные по примеру 3.

Равномерно распределенная нагрузка приложена к верхнему поясу.

По табл.16.10 находим значение $\varphi_1' = 72$.

Коэффициент

$$\varphi_b = \frac{72}{240} = 0{,}3 .$$

16.3.2. Вспомогательные коэффициенты φ_1' для балок из нормальных двутавров по ГОСТ 26020-83

Таблица 16.5.

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете, м									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Балка без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу										
10Б1	174	135	112	92	68	52	41	33	27	23
12Б1	153	112	91	78	68	60	53	43	36	30
14Б1	156	120	94	79	69	62	56	51	46	39
16Б1	155	121	96	79	68	61	55	50	46	43
18Б1	170	128	107	87	74	65	59	54	49	46
23Б1	223	161	133	113	95	82	74	67	62	57
26Б1	222	151	118	100	90	77	67	60	55	51
30Б1	261	166	122	98	84	75	68	62	55	50
35Б1	285	175	124	96	79	69	61	56	52	49
35Б2	306	191	138	109	91	80	72	67	61	55
40Б1	312	190	133	102	84	72	63	57	53	50
40Б2	337	209	150	117	98	85	77	70	66	59
45Б1	372	224	156	118	96	81	71	64	59	55
45Б2	396	242	171	133	109	94	84	76	71	67
50Б1	453	269	184	138	111	93	80	71	65	60
50Б2	478	288	199	152	123	104	91	82	75	70
55Б1	544	321	218	161	128	106	91	80	72	66
55Б2	569	339	232	174	139	117	101	90	82	75

Продолжение табл. 16.5

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете, м									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
60Б1	601	354	240	178	141	116	100	88	79	72
60Б2	625	372	254	190	152	127	110	98	89	82
70Б1	722	419	279	203	157	128	107	93	82	73
70Б2	764	447	300	220	172	141	119	104	93	84
80Б1	813	470	311	225	173	139	116	99	87	78
90Б1	905	521	343	247	188	151	125	106	92	82
100Б1	1041	598	392	281	213	170	140	118	103	91
100Б2	1094	631	416	300	230	184	153	130	114	101
100Б3	1141	662	439	319	246	199	166	143	126	113
100Б4	1173	684	457	334	290	212	179	155	138	125
Двутавры дополнительной серии (Д)										
35ДБ1	199	126	92	74	63	55	50	46	41	38
40ДБ1	225	139	99	77	64	56	50	46	43	39
45ДБ1	273	168	119	93	77	67	59	54	51	47
45ДБ2	409	249	176	135	111	96	85	77	71	67
Балка без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу										
10Б1	244	175	137	110	81	62	47	40	33	27
12Б1	244	163	124	101	85	73	63	51	42	36
14Б1	276	187	137	109	91	79	69	61	55	47
16Б1	303	204	149	116	96	82	72	64	57	52
18Б1	352	230	173	132	107	91	79	70	63	57
23Б1	490	311	229	180	144	120	103	91	82	74
26Б1	529	324	229	177	146	120	101	88	78	70
30Б1	668	395	269	200	159	132	114	98	86	76
35Б1	761	443	295	215	167	135	114	99	87	78
35Б2	802	470	316	233	182	150	127	111	98	86
40Б1	839	486	323	234	180	146	122	105	92	83
40Б2	890	520	348	255	199	163	138	120	107	94
45Б1	1010	583	385	278	213	171	142	122	106	95
45Б2	1060	616	410	298	231	187	157	136	120	108
50Б1	1243	714	469	336	256	204	168	142	124	109
50Б2	1299	749	495	357	273	219	182	156	136	121
55Б1	1506	862	564	402	304	241	197	166	143	126
55Б2	1563	898	590	422	322	256	211	179	156	137
60Б1	1665	953	623	444	336	266	218	184	158	139
60Б2	1719	987	648	464	353	281	231	196	170	150
70Б1	2027	1154	749	529	397	311	252	210	179	155
70Б2	2131	1216	792	562	423	333	271	227	194	170
80Б1	2292	1302	843	594	444	347	280	232	197	170
90Б1	2530	1452	939	660	492	383	309	255	216	185
100Б1	2953	1673	1080	759	565	439	352	291	245	210
100Б2	3092	1754	1135	799	597	465	375	310	262	226
100Б3	3210	1825	1184	836	626	490	396	329	280	242
100Б4	3281	1870	1216	861	647	508	413	345	295	256
Двутавры дополнительной серии (Д)										
35ДБ1	512	302	205	152	120	100	85	75	65	57
40ДБ1	598	349	233	170	133	108	91	79	70	62
45ДБ1	726	423	282	206	160	130	110	95	84	75
45ДБ2	1096	636	423	307	238	192	161	139	123	110

Продолжение табл. 16.5

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете, м									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Балка без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу										
10Б1	147	113	93	79	58	45	35	28	24	20
12Б1	134	95	76	65	57	51	45	37	30	26
14Б1	140	104	80	67	58	52	47	43	39	34
16Б1	140	109	84	68	58	51	40	42	39	36
18Б1	154	115	94	75	63	55	49	45	41	38
23Б1	202	145	119	99	82	70	62	56	52	48
26Б1	202	137	107	90	80	67	58	51	47	43
30Б1	237	151	111	89	76	67	61	54	48	43
35Б1	260	159	112	87	72	62	55	50	47	43
35Б2	279	173	125	98	82	72	65	60	54	48
40Б1	284	172	121	93	76	65	57	52	48	45
40Б2	307	190	136	106	88	77	69	63	59	52
45Б1	339	204	141	107	87	73	64	58	53	49
45Б2	361	221	155	120	99	85	75	69	64	60
50Б1	413	245	168	126	100	84	72	64	58	54
50Б2	436	262	181	137	111	94	82	74	68	63
55Б1	496	292	198	147	116	86	82	72	65	59
55Б2	519	309	211	158	126	105	91	81	74	68
60Б1	549	323	219	162	128	106	90	79	71	65
60Б2	571	339	231	173	138	115	99	88	80	73
70Б1	660	383	255	185	143	116	97	84	74	66
70Б2	697	407	273	200	156	128	108	94	84	76
80Б1	743	429	284	205	157	126	105	90	79	70
90Б1	827	476	313	225	172	137	113	96	84	74
100Б1	951	546	358	256	194	155	127	108	93	82
100Б2	1000	576	380	273	209	167	139	118	103	92
100Б3	1042	604	401	290	224	181	151	130	114	102
100Б4	1071	624	417	304	236	192	162	141	125	113
Двутавры дополнительной серии (Д)										
35ДБ1	181	114	83	66	56	50	45	41	36	32
40ДБ1	205	126	90	70	58	50	45	41	38	34
45ДБ1	249	153	108	84	69	60	54	49	45	41
45ДБ2	373	227	159	123	101	86	76	69	64	60
Балка без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу										
10Б1	194	139	110	91	67	51	40	33	27	23
12Б1	195	129	98	80	64	59	52	42	35	29
14Б1	220	149	109	87	72	63	56	50	45	39
16Б1	238	164	119	92	76	65	57	51	46	42
18Б1	275	183	138	105	85	72	63	56	50	46
23Б1	380	245	183	143	114	95	82	72	65	59
26Б1	406	252	180	141	118	96	81	70	62	56
30Б1	509	303	208	157	126	105	92	79	68	60
35Б1	577	338	227	166	130	106	90	79	70	62
35Б2	610	360	244	181	143	118	102	90	78	69
40Б1	636	370	247	180	140	114	96	83	74	67
40Б2	676	397	268	198	156	129	110	96	86	75
45Б1	765	443	294	214	165	133	112	96	85	76
45Б2	804	469	315	231	180	147	125	108	96	87
50Б1	940	542	357	257	197	158	131	112	98	87

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете, м									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
50Б2	983	570	378	274	212	171	143	123	108	97
55Б1	1138	653	429	307	234	186	153	130	112	99
55Б2	1182	681	450	324	248	199	165	141	123	109
60Б1	1258	722	474	339	258	205	169	143	124	110
60Б2	1300	749	494	355	272	217	180	154	134	119
70Б1	1530	872	568	403	303	238	194	162	139	121
70Б2	1609	920	601	428	324	256	209	176	152	133
80Б1	1729	984	639	451	338	265	215	179	152	132
90Б1	1930	1096	710	501	374	292	236	196	166	143
100Б1	2226	1263	817	575	429	334	269	222	188	162
100Б2	2331	1325	859	606	454	355	287	238	202	175
100Б3	2421	1379	897	635	477	374	304	254	217	188
100Б4	2477	1414	923	656	495	390	318	267	229	200
Двутавры дополнительной серии (Д)										
35ДБ1	390	232	159	119	95	79	69	60	52	
40ДБ1	454	266	179	132	104	85	72	63	57	50
45ДБ1	551	323	217	160	125	103	87	76	68	60
45ДБ2	831	485	325	237	185	151	127	111	98	89
Балки при наличии не менее двух закреплений верхнего пояса, делящих пролет на равные части, независимо от вида и места приложения нагрузок										
10Б1	155	115	92	75	55	42	33	27	22	19
12Б1	146	101	79	66	57	49	43	35	29	24
14Б1	154	113	85	70	60	52	46	42	37	32
16Б1	160	117	91	72	61	53	47	42	39	35
18Б1	181	127	103	81	67	58	51	46	42	30
23Б1	246	166	129	108	88	75	65	59	53	49
26Б1	256	164	122	99	85	72	62	55	49	45
30Б1	312	191	135	104	85	74	65	59	52	46
35Б1	350	208	142	107	85	71	62	55	50	47
35Б2	372	224	155	118	96	81	71	64	59	52
40Б1	384	227	154	115	91	76	65	57	52	48
40Б2	411	246	170	128	103	87	76	68	62	56
45Б1	461	271	183	135	106	87	75	65	59	53
45Б2	487	289	198	148	118	98	85	75	68	63
50Б1	565	329	220	161	125	102	86	75	66	60
50Б2	593	348	235	173	136	112	95	84	75	68
55Б1	682	395	262	190	147	119	99	85	75	67
55Б2	710	414	277	202	157	128	108	94	83	75
60Б1	754	437	290	210	162	131	109	94	83	74
60Б2	781	455	304	222	172	140	118	102	91	82
70Б1	913	524	344	246	187	149	122	104	90	79
70Б2	962	555	366	263	201	161	134	114	100	88
80Б1	1031	590	385	274	207	164	134	113	97	85
90Б1	1150	656	427	303	228	180	147	123	105	92
100Б1	1325	754	490	347	261	204	166	138	118	103
100Б2	1389	793	518	368	277	219	179	150	129	112
100Б3	1445	828	542	387	294	233	191	162	140	123
100Б4	1480	851	560	402	307	245	202	172	150	132
Двутавры дополнительной серии (Д)										
35ДБ1	239	145	102	78	64	55	49	45	39	35
40ДБ1	276	165	113	85	68	57	50	45	41	37
45ДБ1	334	199	137	103	82	69	60	53	48	45
45ДБ2	503	298	203	152	121	100	87	77	69	64

16.3.3. Вспомогательные коэффициенты φ_1' для балок из широкополочных двутавров по ГОСТ 26020-83

Таблица 16.6.

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу												
20Ш1	404	279	222	190	166	142	125	113	104	96	90	84
23Ш1	405	274	214	181	161	139	122	109	100	92	86	81
26Ш1	482	309	229	186	160	143	131	116	104	95	88	82
26Ш2	529	350	267	222	195	177	153	136	123	113	105	99
30Ш1	559	349	252	200	168	147	133	123	112	101	93	86
30Ш2	602	385	285	230	197	176	161	144	129	117	108	101
30Ш3	647	424	320	264	230	208	184	163	147	135	125	117
35Ш1	832	502	349	266	216	184	162	146	134	125	118	109
35Ш2	865	528	372	287	236	203	180	164	152	143	131	120
35Ш3	910	564	404	317	264	230	207	190	178	160	146	135
40Ш1	1176	692	468	347	273	226	193	170	153	139	129	121
40Ш2	1211	723	496	373	299	251	218	194	177	164	153	145
40Ш3	1256	757	526	401	325	276	243	219	201	187	177	165
50Ш1	1095	639	428	314	245	200	169	147	131	119	109	101
50Ш2	1120	665	454	339	270	225	194	172	156	144	134	126
50Ш3	1180	708	489	370	299	253	221	198	181	168	158	150
50Ш4	1235	750	526	404	330	282	250	226	209	196	183	167
60Ш1	1215	704	467	339	262	211	177	152	134	120	109	101
60Ш2	1249	734	496	367	289	238	203	179	160	146	135	127
60Ш3	1313	782	536	403	322	270	234	209	190	175	164	155
60Ш4	1376	831	579	442	359	305	269	242	223	208	196	182
70Ш1	1173	679	450	325	251	202	169	145	127	114	103	95
70Ш2	1232	719	482	353	275	225	190	165	147	133	122	114
70Ш3	1283	759	516	385	305	254	218	193	175	160	149	140
70Ш4	1330	797	550	416	335	283	247	221	202	187	176	167
70Ш5	1396	849	596	458	375	322	285	258	239	224	208	191
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу												
20Ш1	940	581	415	324	265	218	185	161	143	130	118	109
23Ш1	968	591	417	322	265	218	184	160	141	127	116	106
26Ш1	1226	728	497	372	297	247	214	183	160	141	127	116
26Ш2	1302	785	545	415	337	285	239	206	181	162	156	134
30Ш1	1463	858	578	426	334	274	233	204	180	158	141	127
30Ш2	1538	911	621	464	369	307	265	228	199	176	158	144
30Ш3	1611	966	667	505	407	344	291	250	219	195	176	161
35Ш1	2253	1302	862	622	478	384	320	274	240	214	194	175
35Ш2	2317	1345	895	650	503	407	341	295	260	233	208	187
35Ш3	2403	1404	941	690	538	440	372	324	289	254	226	203
40Ш1	3261	1865	1219	868	656	519	425	358	308	271	240	217
40Ш2	3322	1909	1256	901	687	548	452	384	334	295	266	242
40Ш3	3404	1966	1300	938	720	579	482	412	361	322	291	263
50Ш1	3060	1744	1136	805	606	476	387	324	277	241	213	191
50Ш2	3085	1770	1161	830	631	501	413	349	302	267	239	217
50Ш3	3214	1852	1222	879	673	539	447	381	332	295	267	244
50Ш4	3326	1926	1278	926	714	576	482	414	364	326	295	263
60Ш1	3416	1942	1260	889	666	521	421	350	298	258	227	202
60Ш2	3467	1982	1295	921	696	550	450	378	325	285	254	229
60Ш3	3600	2069	1360	975	742	592	488	414	360	318	280	260

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
60Ш4	3726	2153	1425	1029	791	636	530	454	398	355	322	290
70Ш1	3303	1877	1217	858	642	501	405	336	285	247	217	193
70Ш2	3442	1962	1277	905	681	536	436	364	312	271	240	215
70Ш3	3540	2029	1329	949	720	571	469	396	342	301	269	244
70Ш4	3628	2090	1377	990	757	606	502	428	373	331	299	273
70Ш5	3754	2175	1445	1048	808	653	547	471	414	371	354	299
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу												
20Ш1	366	252	200	171	145	123	107	96	87	71	75	70
23Ш1	368	248	193	163	145	121	105	93	84	77	72	67
26Ш1	439	281	208	168	144	128	118	102	90	81	75	69
26Ш2	481	317	241	200	175	155	133	117	105	91	89	63
30Ш1	509	317	229	180	151	133	120	110	99	88	80	73
30Ш2	548	349	257	208	177	158	145	126	112	101	92	85
30Ш3	588	384	289	238	207	187	161	141	126	115	106	98
35Ш1	759	457	317	242	196	166	146	131	120	112	106	96
35Ш2	788	480	338	260	213	183	162	147	136	128	115	104
35Ш3	829	513	366	286	238	207	186	171	159	146	127	116
40Ш1	1073	631	426	315	248	205	175	154	138	126	116	109
40Ш2	1105	659	451	339	271	227	197	175	159	147	138	130
40Ш3	1145	689	478	364	295	250	219	197	181	168	159	144
50Ш1	1000	583	390	286	222	181	153	133	118	107	98	91
50Ш2	1022	606	413	308	245	204	176	156	141	129	120	113
50Ш3	1076	644	445	336	271	228	199	178	163	151	142	135
50Ш4	1126	683	477	366	299	255	225	204	188	176	161	146
60Ш1	1119	642	426	309	238	192	160	138	121	109	99	91
60Ш2	1140	670	452	334	262	216	184	161	145	132	122	114
60Ш3	1198	712	488	366	292	244	212	188	171	158	147	139
60Ш4	1255	757	526	400	325	276	242	218	200	187	176	159
70Ш1	1070	619	410	296	228	183	153	131	115	103	93	56
70Ш2	1125	656	439	321	250	204	172	150	133	120	110	103
70Ш3	1171	692	470	350	277	230	198	174	157	144	134	126
70Ш4	1213	726	500	377	304	256	223	199	182	169	158	150
70Ш5	1273	773	541	415	340	290	257	233	215	201	183	166
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу												
20Ш1	724	453	328	260	211	173	147	128	114	103	94	87
23Ш1	743	459	328	257	214	174	147	127	112	101	92	84
26Ш1	935	560	386	292	235	198	173	146	127	112	101	92
26Ш2	996	607	427	329	270	228	191	164	144	120	116	106
30Ш1	1112	656	446	331	262	217	187	165	143	126	112	101
30Ш2	1172	700	482	364	292	246	214	182	158	140	125	114
30Ш3	1231	745	521	399	325	277	232	199	174	155	140	128
35Ш1	1707	991	659	479	370	300	251	217	191	172	156	139
35Ш2	1757	1025	686	502	391	319	270	235	208	189	166	149
35Ш3	1825	1073	724	535	421	347	296	260	233	208	180	162
40Ш1	2463	1413	927	663	504	400	329	279	241	213	190	173
40Ш2	2512	1450	958	690	529	425	353	302	264	235	213	195
40Ш3	2577	1495	994	722	558	451	378	326	287	258	235	210
50Ш1	2310	1320	862	613	463	366	299	251	216	189	168	151
50Ш2	2332	1342	884	635	485	388	321	273	238	211	190	174
50Ш3	2432	1407	933	675	520	419	350	300	264	236	214	197
50Ш4	2520	1467	979	714	555	451	380	329	291	263	235	210

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
60Ш1	2577	1468	954	676	507	398	324	270	230	201	197	158
60Ш2	26	1501	984	703	534	424	348	295	255	224	201	182
60Ш3	2723	1570	1037	747	572	459	381	325	284	253	229	209
60Ш4	2822	1638	1090	792	613	496	416	359	317	285	260	231
70Ш1	2492	1418	921	652	489	383	311	259	221	192	169	151
70Ш2	2598	1485	969	690	521	411	336	282	243	212	189	170
70Ш3	2676	1538	1012	726	553	442	365	310	269	238	214	195
70Ш4	2745	1588	1052	760	585	471	393	337	296	264	240	220
70Ш5	2844	1657	1107	808	628	511	431	374	332	299	286	238
Балки при наличии не менее двух закреплений верхнего пояса, делящих пролет на равные части, независимо от вида и места приложения нагрузок												
20Ш1	458	298	224	184	158	133	115	101	91	84	77	72
23Ш1	467	299	221	179	153	132	113	99	89	81	75	69
26Ш1	575	353	251	195	161	139	124	110	97	87	79	73
26Ш2	620	389	283	225	190	170	144	126	112	102	93	86
30Ш1	678	409	284	216	175	149	130	117	107	95	86	79
30Ш2	720	441	312	242	200	172	153	137	121	108	98	90
30Ш3	763	476	343	270	227	198	175	152	135	122	111	103
35Ш1	1030	606	410	303	239	197	168	148	133	121	112	105
35Ш2	1064	631	430	321	255	213	184	163	147	135	125	113
35Ш3	1110	665	459	347	279	235	205	184	168	152	157	125
40Ш1	1476	854	567	410	316	255	213	183	160	144	130	120
40Ш2	1511	882	591	432	337	275	233	202	180	163	149	139
40Ш3	1555	914	618	457	359	296	253	222	199	182	168	157
50Ш1	1381	795	524	376	288	230	190	162	141	125	113	103
50Ш2	1401	815	543	396	307	249	210	182	161	145	152	123
50Ш3	1465	859	578	425	333	273	233	203	182	165	152	142
50Ш4	1524	900	612	455	360	299	257	227	204	187	176	159
60Ш1	1538	881	577	412	312	248	203	172	148	131	117	106
60Ш2	1569	907	601	435	334	269	225	193	169	151	137	126
60Ш3	1637	955	539	467	364	297	251	218	193	175	160	149
60Ш4	1703	1002	678	502	395	326	279	245	220	201	186	173
70Ш1	1486	851	556	397	300	238	195	164	141	124	111	100
70Ш2	1553	894	589	423	323	259	214	182	159	141	127	116
70Ш3	1606	932	621	451	349	283	238	205	181	163	148	137
70Ш4	1654	968	651	478	374	307	261	228	203	184	170	158
70Ш5	1721	1018	692	515	409	339	292	258	233	214	199	180

16.3.4. Вспомогательные коэффициенты φ_1' для балок из колонных двутавров по ГОСТ 26020-83

Таблица 16.7

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу														
20К1		443	336	278	243	220	193	171	155	142	131	123	116	110
20К2		493	383	323	287	250	218	195	178	164	153	144	135	128
23К1		545	391	307	257	224	202	186	173	156	142	131	122	115
23К2		587	430	345	294	261	238	218	194	174	162	150	141	133

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
26К1		623	443	345	286	247	221	202	188	176	198	146	135	126
26К2		660	477	378	319	280	253	234	213	192	176	163	152	143
26К3		715	529	428	367	327	300	268	240	210	201	187	176	166
30К1		776	538	409	330	280	245	220	202	188	177	187	153	142
30К2		824	580	448	369	317	281	256	237	223	204	187	173	162
30К3		873	626	492	412	359	323	297	278	250	228	210	195	183
35К1		1004	680	505	398	330	282	249	224	205	190	178	169	161
35К2		1060	728	548	440	369	321	286	261	241	226	214	202	187
40К1		1265	844	616	478	388	327	283	251	226	207	192	179	169
40К2		1338	906	672	530	439	376	331	297	272	292	237	224	214
40К3		1436	992	752	607	512	448	402	367	341	321	305	281	260
40К4		1557	1100	853	703	606	540	492	457	430	390	358	331	310
40К5		1714	1244	989	835	735	667	618	557	503	481	426	390	375
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу														
20К1		1006	696	528	426	360	304	261	229	204	185	169	156	145
20К2		1069	751	519	475	394	332	288	254	220	208	191	176	164
23К1		1350	906	665	520	426	361	315	280	245	218	197	179	165
23К2		1407	955	710	562	466	400	349	302	267	259	217	199	184
26К1		1568	1048	735	594	484	408	354	313	279	248	223	202	185
26К2		1615	1089	803	630	519	442	387	339	290	286	241	220	202
26К3		1691	1153	861	685	571	493	424	369	327	293	267	245	227
30К1		2025	1337	964	738	592	492	420	367	327	295	269	242	220
30К2		2098	1396	1015	785	636	533	460	406	365	325	291	254	241
30К3		2167	1454	1067	834	682	578	504	449	393	350	315	287	264
35К1		2701	1766	1258	952	754	618	520	448	393	350	317	289	267
35К2		2795	1839	1320	1006	803	664	564	490	434	391	356	326	296
40К1		3469	2255	1595	1198	939	762	636	542	471	415	372	336	307
40К2		3600	2354	1677	1269	1004	822	692	596	523	466	421	385	355
40К3		3757	2478	1783	1365	1093	906	773	674	599	541	495	446	405
40К4		3946	2630	1914	1483	1204	1012	874	773	696	616	553	501	459
40К5		4176	2820	2083	1639	1351	1153	1012	882	777	694	627	573	529
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу														
20К1		402	304	250	218	197	168	148	132	120	111	103	97	91
20К2		446	345	290	257	218	188	167	151	138	128	120	113	107
23К1		495	354	278	232	202	182	167	153	136	123	113	104	97
23К2		533	390	312	265	235	214	191	169	152	138	128	119	112
26К1		567	402	312	258	223	199	182	169	153	138	126	116	108
26К2		599	433	342	287	252	228	210	187	167	152	139	129	121
26К3		649	479	386	330	294	269	234	208	187	171	159	148	139
30К1		707	489	371	299	253	221	198	182	169	159	147	134	123
30К2		749	527	406	333	286	254	230	213	200	179	163	150	139
30К3		794	568	445	371	323	291	267	244	218	197	180	167	156
35К1		916	619	459	362	299	256	225	202	184	171	160	152	144

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
35К2		965	662	498	398	334	290	258	235	217	203	192	178	163
35К3		1015	708	541	440	374	330	298	274	256	242	215	197	182
40К1		1154	769	560	434	353	297	256	227	204	187	173	161	152
40К2		1220	825	611	481	397	340	299	268	245	227	213	201	192
40К3		1307	902	682	549	463	404	362	331	307	288	274	246	226
40К4		1416	999	772	636	547	486	443	410	386	340	310	285	265
40К5		1557	1127	894	753	662	599	554	487	436	396	364	338	317
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу														
20К1		777	544	417	340	291	243	208	182	162	146	134	124	115
20К2		830	591	461	383	314	264	228	202	181	165	151	140	131
23К1		1032	698	517	407	336	228	253	224	196	174	157	142	131
23К2		1079	739	555	443	371	322	278	241	212	190	172	158	146
26К1		1197	805	592	464	381	324	283	252	223	197	177	161	147
26К2		1236	840	625	495	411	353	312	271	238	212	191	174	161
26К3		1299	895	675	543	457	398	338	294	260	233	212	194	180
30К1		1539	1022	741	571	461	386	332	292	261	238	215	193	175
30К2		1599	1071	784	611	498	421	366	326	295	259	232	210	192
30К3		1656	1120	829	653	539	451	405	358	314	279	251	228	210
35К1		2046	1343	961	731	581	479	406	351	310	278	253	232	215
35К2		2122	1403	1012	776	623	518	443	388	346	313	287	260	236
35К3		2189	1459	1062	823	668	562	485	429	386	353	311	281	256
40К1		2624	1710	1213	914	720	587	492	421	367	326	293	266	244
40К2		2728	1790	1281	974	774	638	540	468	413	370	336	309	286
40К3		2855	1893	1370	1055	850	710	610	535	479	435	400	356	323
40К4		3009	2018	1480	1156	945	801	698	621	563	491	440	399	365
40К5		3198	2178	1623	1289	1072	923	817	704	618	552	498	455	419
Балки при наличии не менее двух закреплений верхнего пояса, делящих пролет на равные части, независимо от вида и места приложения нагрузок														
20К1		496	358	283	238	209	183	159	142	128	117	108	101	94
20К2		538	397	320	274	237	203	178	160	145	133	124	116	109
23К1		641	443	336	271	229	200	179	167	148	133	121	111	103
23К2		677	476	367	301	258	229	208	183	163	148	136	126	117
26К1		739	507	381	305	256	222	198	180	167	150	136	124	115
26К2		770	536	409	332	282	248	223	203	181	163	149	137	128
26К3		819	580	450	371	320	285	255	224	201	183	168	156	145
30К1		940	634	467	367	302	257	225	201	183	169	160	146	134
30К2		984	671	501	399	332	287	254	230	212	195	176	161	149
30К3		1028	710	538	434	366	320	287	267	237	213	194	178	165
35К1		1238	822	596	459	371	310	267	234	210	191	176	164	154
35К2		1292	866	634	495	404	342	298	265	240	220	205	194	176
35К3		1342	910	675	533	441	378	333	300	274	255	234	213	196
40К1		1578	1037	743	565	450	372	315	274	242	217	197	182	169
40К2		1650	1095	793	611	493	412	355	312	279	254	234	218	204
40К3		1742	1172	863	676	555	472	412	368	335	309	288	267	245
40К4		1854	1268	949	757	632	547	486	441	406	370	335	307	284
40К5		1996	1392	1064	866	708	650	587	530	471	426	389	359	334

16.3.5. Вспомогательные коэффициенты φ_1' для балок из двутавров по ГОСТ 8239-89

Таблица 16.8

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу											
16	389	203	148	119	101	89	79	71	61	51	43
18	300	196	152	119	100	87	78	70	64	58	51
20	322	197	153	123	101	87	77	70	64	59	54
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу											
16	581	333	221	166	134	113	98	85	73	60	51
18	652	352	240	175	139	116	100	88	78	70	61
20	747	386	260	191	148	122	104	91	81	73	66
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу											
16	261	183	127	100	85	74	66	60	52	43	36
18	271	176	133	101	84	73	65	59	54	49	44
20	292	178	138	106	86	73	65	58	53	49	46
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу											
16	456	269	175	131	106	90	78	69	60	50	42
18	506	281	191	139	110	92	79	70	63	57	51
20	575	304	209	152	117	96	82	72	65	59	53
Балки при наличии не менее двух закреплений верхнего пояса, делящих пролет на равные части, независимо от вида и места приложения нагрузок											
16	304	193	136	105	87	75	66	58	50	41	34
18	328	194	144	108	88	75	66	59	53	47	42
20	365	204	148	115	92	77	67	60	54	49	45

16.3.6. Вспомогательные коэффициенты φ_1' для двутавров по ГОСТ 19425-74*

Таблица 16.9

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу											
24М	501	329	254	199	167	146	131	118	107	97	85
30М	550	322	242	203	164	140	123	111	102	94	87
36М	503	284	207	172	144	121	106	95	86	80	74
45М	597	313	214	168	143	128	109	96	86	78	73
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу											
24М	1083	588	400	292	232	194	167	147	131	116	101
30М	1323	666	436	327	250	203	172	149	133	119	109
36М	1247	614	393	291	227	182	152	132	116	104	95
45М	1559	741	455	322	250	206	169	143	124	110	99

№ двутавра	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу											
24М	453	296	222	170	141	122	109	99	90	83	73
30М	499	291	218	178	142	119	104	93	85	78	73
36М	457	257	187	154	126	104	90	80	72	66	62
45М	543	284	193	151	129	112	94	82	73	66	61
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу											
24М	841	469	319	232	184	154	133	118	106	96	83
30М	1014	520	347	261	199	161	136	118	105	95	87
36М	953	477	311	234	181	145	121	104	92	83	75
45М	1185	569	354	254	200	165	135	114	99	87	79
Балки при наличии не менее двух закреплений верхнего пояса, делящих пролет на равные части, независимо от вида и места приложения нагрузок											
24М	546	326	241	181	148	126	111	98	88	79	69
30М	636	343	241	195	153	127	109	97	89	79	73
36М	592	310	211	166	136	112	95	84	75	68	63
45М	723	359	231	172	140	123	102	88	78	70	64

16.3.7. Вспомогательные коэффициенты φ_1' для швеллеров по ГОСТ 8240-89 с уклоном внутренних граней полок

Таблица 16.10

№ швеллера	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу											
8	280	198	143	91	63	47	36	28	23	19	16
10	255	171	134	109	81	60	46	36	29	24	20
12	243	161	123	102	87	74	58	46	37	30	26
14	230	161	118	96	82	72	63	56	45	37	31
16	231	154	117	93	78	69	61	55	50	45	38
18	239	150	118	92	76	66	59	53	49	45	41
20	255	150	114	95	77	65	58	52	48	44	41
22	279	158	116	96	80	67	59	53	48	44	41
24	317	172	121	98	85	72	62	55	50	46	43
27	339	178	122	95	81	73	62	54	49	45	41
30	364	186	124	95	79	70	63	54	49	44	41
40	463	226	144	105	84	72	64	58	53	47	43
Балки без закреплений в пролете при сосредоточенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу											
8	389	247	170	109	76	56	43	34	27	22	19
10	395	233	169	131	97	71	54	43	35	29	24
12	419	239	167	130	106	88	69	54	44	36	30
14	446	257	171	130	106	89	77	66	54	44	37
16	489	269	182	134	107	90	77	68	60	53	45
18	543	285	194	141	110	91	78	68	61	55	50

Продолжение табл. 16.10

№ швеллера	Значение φ_1' при пролете или расстояниях между точками закрепления, м										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	608	308	202	151	116	94	80	70	62	56	51
22	691	341	219	162	126	101	85	73	65	58	53
24	808	391	244	177	140	112	93	79	69	62	56
27	885	421	258	183	142	117	96	81	71	63	56
30	966	454	275	192	146	119	100	84	73	64	57
40	1266	583	344	234	174	137	114	98	85	74	65
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу											
8	236	165	122	78	54	40	31	24	20	16	14
10	221	143	112	92	70	51	39	31	25	21	17
12	218	138	103	85	72	63	49	39	32	26	22
14	207	141	100	80	68	60	53	48	39	32	27
16	208	139	102	79	66	57	51	46	42	38	32
18	217	135	106	80	65	56	49	45	41	38	35
20	231	136	102	83	66	56	49	44	40	37	34
22	254	143	104	86	70	58	50	44	40	37	34
24	288	156	110	88	76	62	53	47	42	38	35
27	308	161	110	86	73	64	54	47	41	38	35
30	331	169	112	86	72	63	55	47	42	37	34
40	422	206	130	95	76	65	57	52	47	41	37
Балки без закреплений в пролете при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к нижнему поясу											
8	309	198	141	90	63	46	35	28	23	19	16
10	314	185	135	107	80	59	45	36	29	24	20
12	335	190	132	103	86	73	57	45	36	30	25
14	351	205	136	103	84	72	62	55	45	37	31
16	380	215	145	106	85	71	62	55	49	44	37
18	419	225	157	112	87	72	62	55	49	44	40
20	467	241	161	121	92	75	63	55	49	45	41
22	529	265	173	130	100	80	67	58	51	46	42
24	616	302	191	141	113	89	74	63	55	49	45
27	673	323	201	144	114	94	76	65	56	50	45
30	733	348	213	150	116	96	80	67	58	51	45
40	958	444	264	181	136	108	91	79	68	59	52
Балки при наличии не менее двух закреплений верхнего пояса, делящих пролет на равные части, независимо от вида и места приложения нагрузок											
8	248	165	116	74	51	38	29	23	18	15	13
10	240	150	112	89	66	48	37	29	24	20	16
12	236	148	107	86	71	60	47	37	30	25	21
14	237	154	107	84	70	60	52	45	37	30	25
16	249	151	110	84	69	59	51	46	41	36	30
18	268	153	112	86	69	58	51	45	41	37	34
20	293	159	112	90	71	59	51	45	41	37	34
22	328	172	118	92	76	62	53	47	42	38	35
24	379	193	128	97	81	68	57	50	44	40	37
27	411	204	131	98	80	70	58	50	44	40	36
30	445	217	137	100	80	68	60	51	45	40	36
40	576	272	166	116	90	74	63	56	51	45	40

ГЛАВА 17

НОРМАЛИ КОНСТРУКЦИЙ

17.1. Стыки элементов из прокатных профилей

17.1.1. Стыки элементов из одиночных уголков равнополочных по ГОСТ 8509–93. Конструктивное решение.

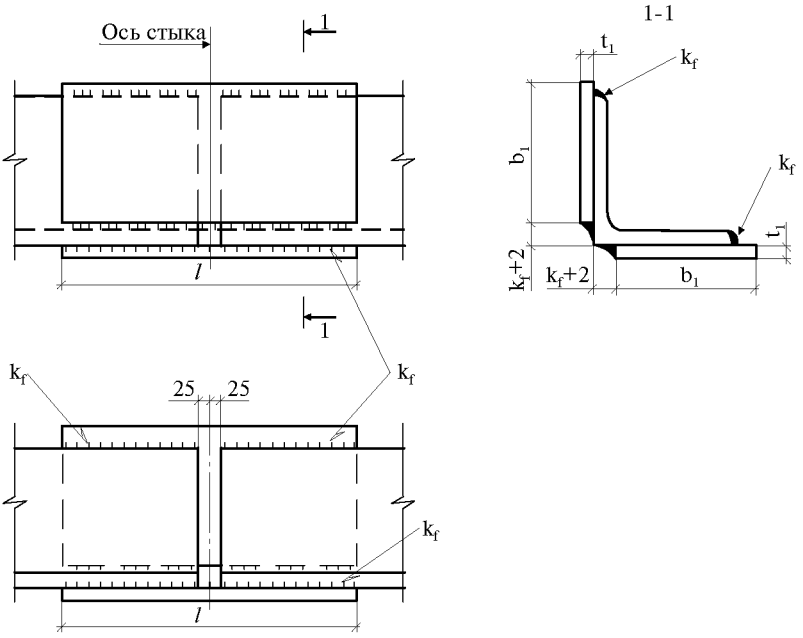


Рис.17.1.

Конструкция стыка, размеры стыковых накладок и сварных швов в зависимости от стали уголков и накладок, типа электродов или марки сварочной проволоки должны соответствовать указанным на данном чертеже и в табл.17.1 и 17.2.

Таблица 17.1. Сталь элементов и накладок марки С245. Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св–08А

Номер уголка	Сечение, мм		Стыковая накладка				Катет шва k_f, мм
	b	t	сечение, мм		длина l, мм	масса 1 шт, кг	
			b_1	t_1			
1	2	3	4	5	6	7	8
5	50	4	50	4	150	0,24	4
		5		5	160	0,31	4
		6		6	170	0,4	4
5,6	56	4	60	4	150	0,28	4
		5		5	170	0,4	4
6,3	63	4	65	4	160	0,33	4
		5		5	160	0,41	5
		6		6	180	0,55	5
7	70	5	70	5	190	0,52	4
		6		6	190	0,63	5
		7		8	210	0,92	5
		8		8	200	0,88	6

1	2	3	4	5	6	7	8
7,5	75	5	75	5	200	0,59	4
		6		6	200	0,71	5
		7		8	220	1,04	5
		8		8	210	0,99	6
8	80	6	80	6	210	0,79	5
		7		8	230	1,16	5
		8		8	220	1,11	6
9	90	6	90	6	220	0,83	5
		7		8	250	1,26	5
		8		8	240	1,21	6
10	100	7	100	8	270	1,7	5
		8		8	260	1,63	6
		10		10	240	1,88	8
		12		12	270	2,54	8
11	110	7	110	8	290	2	5
		8		8	270	1,87	6
12,5	125	8	125	8	300	2,36	6
		9		10	330	3,24	6
		10		10	290	2,85	8
		12		12	300	3,53	10
14	140	9	140	10	360	3,96	6
		10		10	310	3,41	8
		12		12	330	4,35	10
16	160	10	160	10	350	4,4	8
		11		12	380	5,73	8
		12		12	370	5,58	10
		14		14	360	6,33	12
		16		16	390	7,84	14
18	180	11	180	12	410	6,95	8
		12		12	410	6,95	10
20	200	12	200	12	440	8,29	10
		14		14	430	9,45	12
		16		16	470	11,81	14
		20		20	500	15,7	16
		25		26*	580	23,68	16
		30		30*	680	32,03	16
22	220	14	220	14	470	11,36	12
		16		16	510	14,09	14
25	250	16	250	16	580	18,21	14
		18		18	640	22,61	14
		20		20	620	24,34	16
		22		22*	650	28,06	16
		25		26*	720	36,74	16
		28		28*	790	43,41	16
		30		30*	840	49,46	16

* Накладки, отмеченные звездочкой, изготовлять из стали марки С225.

Таблица 17.2. Сталь элементов и накладок марки С345. Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св–10ГА

Номер уголка	Сечение, мм		Стыковая накладка				Катет шва k_f, мм
	b	t	сечение, мм		длина l, мм	масса 1 шт, кг	
			b_1	t_1			
1	2	3	4	5	6	7	8
5	50	4	50	4	150	0,24	4
		5		5	170	0,33	4
		6		6	190	0,45	4
5,6	56	4	60	4	160	0,3	4
		5		5	180	0,42	4
6,3	63	4	65	4	170	0,35	4
		5		5	170	0,43	5
		6		6	190	0,58	5
7	70	5	70	5	210	0,58	4
		6		6	210	0,69	5
		7		8	230	1,01	5
		8		8	220	0,97	6
7,5	75	5	75	5	230	0,68	4
		6		6	220	0,78	5
		7		8	240	1,13	5
		8		8	230	1,08	6
8	80	6	80	6	230	0,87	5
		7		8	250	1,26	5
		8		8	240	1,21	6
9	90	6	90	6	250	1,06	5
		7		8	270	1,53	5
		8		8	260	1,47	6
10	100	7	100	8	300	1,88	5
		8		8	290	1,82	6
		10		10	270	2,12	8
		12		12	290	2,73	8
11	110	7	110	8	320	2,21	5
		8		8	310	2,14	6
12,5	125	8	125	8	340	2,67	6
		9		10	370	3,63	6
		10		10	320	3,14	8
		12		12	320	3,77	10
14	140	9	140	10	410	4,51	6
		10		10	350	3,85	8
		12		12	360	4,75	10
16	160	10	160	10	390	4,9	8
		11		12	400	6,03	8
		12		12	400	6,03	10
		14		14	390	6,86	12
		16		16	420	8,44	14
18	180	11	180	12	450	7,63	8
		12		12	440	7,46	10

Продолжение табл.17.2

1	2	3	4	5	6	7	8
20	200	12	200	12	480	9,04	10
		14		14	470	10,33	12
		16		16	510	12,81	14
		20		20	550	17,27	16
		25		26	630	25,72	16
		30		30	730	34,38	16
22	220	14	220	14	510	12,33	12
		16		16	560	15,47	14
25	250	16	250	16	630	19,78	14
		18		18	690	24,37	14
		20		20	670	26,3	16
		22		22	700	30,22	16
		25		26	780	39,8	16
		28		28	860	47,26	16
		30		30	910	53,58	16

17.1.2. Стыки элементов из одиночных уголков неравнополочных по ГОСТ 8510–86*. Конструктивное решение.

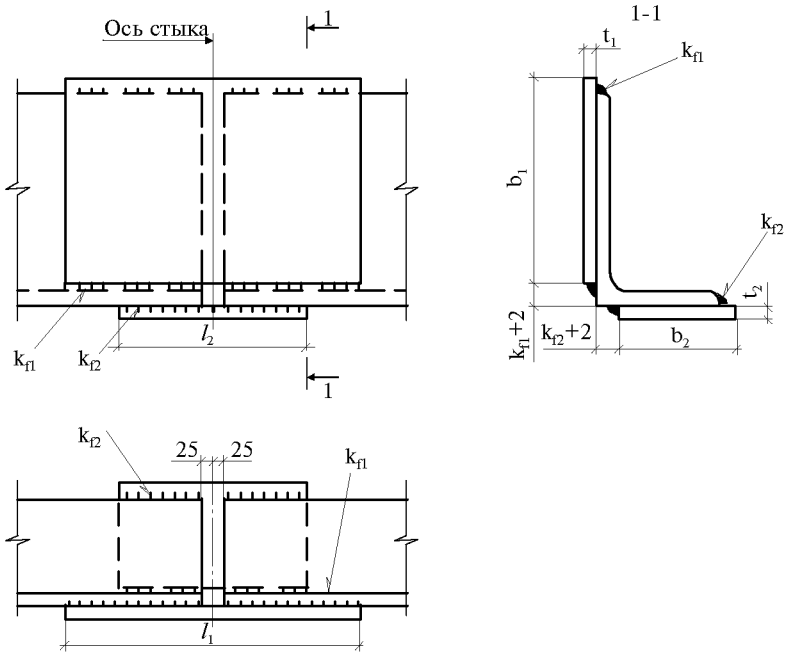


Рис.17.2.

Конструкция стыка, размеры стыковых накладок и сварных швов в зависимости от стали уголков и накладок, типа электродов или марки сварочной проволоки должны соответствовать указанным на данном чертеже и в табл.17.3, 17.4.

Таблица 17.3. Сталь элементов и накладок марки С245. Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св–08А

Сечение уголка элемента, мм		Стыковая накладка									
		Бóльшая полка					Меньшая полка				
$B \times b$	t	сечение, мм		длина l_1,	масса 1 шт.,	катет шва k_{f1},	сечение, мм		длина l_2,	масса 1 шт.,	катет шва k_{f2},
		b_1	t_1	мм	кг	мм	b_2	t_2	мм	кг	мм
50×32	4	50	5	150	0,29	4	35	5	150	0,21	4
56×36	4	60	4	150	0,28	4	40	4	150	0,19	4
	5		5	170	0,4	4		5	150	0,24	4
	4		4	160	0,33	4		4	150	0,19	4
63×40	5	65	5	180	0,46	4	40	5	150	0,24	4
	6		6	200	0,61	4		6	150	0,28	4
70×45	5	70	6	190	0,63	4	45	6	150	0,32	4
75×50	5	75	5	200	0,59	4	50	5	160	0,31	4
	6		6	230	0,81	4		6	170	0,4	4
80×50	5	80	5	210	0,66	4	50	5	160	0,31	4
	6		6	210	0,79	5		6	150	0,35	5
90×56	6	90	6	220	0,93	5	60	6	170	0,48	5
	8		8	270	1,53	6		8	190	0,72	6
100×63	6	100	6	240	1,13	5	65	6	180	0,55	5
	8		8	260	1,63	6		8	190	0,78	6
110×70	7	110	8	270	1,86	6	70	8	200	0,88	6
	8		8	300	2,36	6		8	220	1,11	6
125×80	10	125	10	290	2,85	8	80	10	210	1,32	8
	12		12	330	3,89	8		12	230	1,73	8
140×90	8	140	8	330	2,9	6	90	8	240	1,36	6
	10		10	310	3,41	8		10	230	1,63	8
160×100	10	160	10	350	4,4	8	100	10	240	1,88	8
	12		12	370	5,58	10		12	250	2,36	10
180×110	10	180	10	380	5,37	8	110	10	260	2,25	8
	12		12	410	6,95	10		12	270	2,8	10
200×125	12	200	12	480	9,04	8	125	12	330	3,89	8
	14		14	500	10,99	10		14	340	4,62	10

Таблица 17.4. Сталь элементов и накладок марки С345. Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св–10ГА

Сечение уголка элемента, мм		Стыковая накладка									
		Бóльшая полка					Меньшая полка				
$B \times b$	t	сечение, мм		длина l_1,	масса 1 шт.,	катет шва k_{f1},	сечение, мм		длина l_2,	масса 1 шт.,	катет шва k_{f2},
		b_1	t_1	мм	кг	мм	b_2	t_2	мм	кг	мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
50×32	4	50	5	150	0,29	4	35	5	150	0,21	4
56×36	4	60	4	160	0,3	4	40	4	150	0,19	4
	5		5	180	0,42	4		5	150	0,24	4
	4		4	180	0,37	4		4	150	0,19	4
63×40	5	65	5	200	0,51	4	40	5	150	0,24	4
	6		6	220	0,67	4		6	160	0,3	4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
70×45	5	70	6	210	0,69	4	45	6	160	0,34	4
75×50	5	75	5	220	0,65	4	50	5	170	0,33	4
	6		6	250	0,88	4		6	190	0,45	4
80×50	5	80	5	230	0,72	4	50	5	170	0,33	4
	6		6	230	0,87	5		6	170	0,4	5
90×56	6	90	6	250	1,06	5	60	6	180	0,51	5
	8		8	260	1,47	6		8	190	0,72	6
100×63	6	100	6	270	1,27	5	65	6	190	0,58	5
	8		8	290	1,82	6		8	210	0,86	6
110×70	8	110	8	310	2,14	6	70	8	220	0,97	6
	8		8	340	2,67	6		8	240	1,21	6
125×80	10	125	10	320	3,14	8	80	10	230	1,44	8
	12		12	350	4,12	8		12	250	1,88	8
140×90	8	140	8	370	3,25	6	90	8	260	1,47	6
	10		10	350	3,85	8		10	250	1,77	8
160×100	10	160	10	390	4,9	8	100	10	270	2,12	8
	12		12	400	6,03	10		12	270	2,54	10
180×110	10	180	10	430	6,08	8	110	10	290	2,5	8
	12		12	440	7,46	10		12	290	3,01	10
200×125	12	200	12	520	9,8	8	125	12	350	4,12	8
	14		14	540	11,87	10		14	360	4,95	10

17.1.3. Стыки элементов из двутавров по ГОСТ 26020–83 и ГОСТ 8239–89. Конструктивное решение.

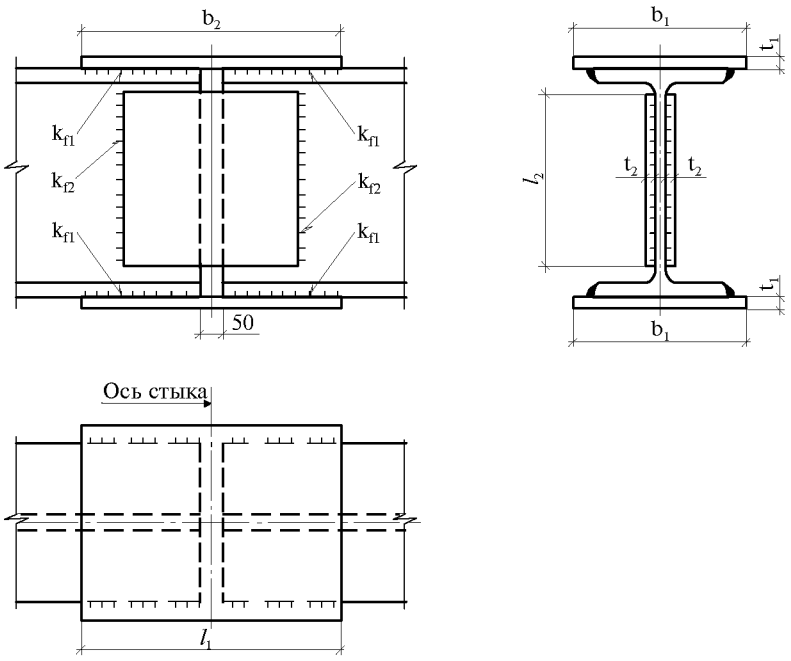


Рис.17.3.

Конструкция стыка, размеры стыковых накладок и сварных швов в зависимости от типа двутавров, стали двутавров и накладок, типа электродов или марки сварочной проволоки должны соответствовать указанным на данном чертеже и табл.17.5–17.14.

Таблица 17.5. Сталь элементов и накладок марки С245. Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св–08А

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
12Б1	80×6	200	0,75	4	100×4	90	0,28	4
12Б2	80×6	200	0,75	5	100×4	90	0,28	4
14Б1	90×6	200	0,85	5	100×4	110	0,35	4
14Б2	90×8	230	1,3	5	100×4	110	0,35	4
16Б1	100×6	230	1,08	5	100×4	120	0,38	4
16Б2	100×8	230	1,44	6	100×5	120	0,47	5
18Б1	110×8	230	1,59	6	100×4	140	0,44	4
18Б2	110×8	260	1,8	6	110×5	140	0,6	5
20Б1	120×10	300	2,83	6	110×5	150	0,65	5
23Б1	130×10	340	3,47	6	110×5	180	0,78	5
26Б1	140×10	340	3,74	6	110×5	210	0,91	5
26Б2	140×10	390	4,29	6	110×5	210	0,91	5
30Б1	160×10	390	4,9	6	110×5	240	1,04	5
30Б2	160×10	440	5,53	6	110×5	240	1,04	5
35Б1	170×10	350	4,67	8	120×5	290	1,36	5
35Б2	190×10	390	5,82	8	120×5	290	1,36	5
40Б1	200×10	410	6,44	8	120×6	330	1,86	6
40Б2	190×12	470	8,41	8	130×6	330	2,02	6
45Б1	200×12	480	9,04	8	130×6	370	2,26	6
45Б2	210×14	500	11,54	10	140×8	370	3,25	8
50Б1	220×14	510	12,33	10	140×8	420	3,69	8
50Б2	230×14	570	14,41	10	150×8	420	3,96	8
55Б1	250×14	530	14,56	12	150×8	460	4,33	8
55Б2	250×16	580	18,21	12	150×8	460	4,33	8
60Б1	260×16	600	19,59	14	160×8	510	5,12	8
60Б2	260×18	660	24,25	14	160×8	510	5,12	8
70Б1	300×16	660	24,87	14	170×10	610	8,14	10
70Б2	310×18	680	29,79	16	180×10	610	8,62	10
80Б1	320×18	680	30,75	16	200×12	700	13,19	12
80Б2	320×20	690	34,67	18	200×12	700	13,19	12
90Б1	340×20	710	37,9	18	220×12	790	16,37	12
90Б2	340×22*	790	46,39	18	220×12	790	16,37	12
100Б1	360×22*	800	49,74	18	220×16	880	24,32	16
100Б2	360×25*	930	63,59	18	240×16	880	26,53	16
100Б3	370×28*	950	77,26	20	240×16	880	26,53	16

* Накладки, отмеченные звездочкой, изготовить из стали марки С255.

Таблица 17.6. Сталь элементов и накладок марки С345.
Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св-10ГА

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
12Б1	80×6	230	0,87	4	100×4	90	0,28	4
12Б2	80×6	220	0,83	5	100×5	90	0,35	5
14Б1	90×6	220	0,93	5	100×4	110	0,35	4
14Б2	90×8	260	1,47	5	100×5	110	0,43	5
16Б1	100×6	260	1,22	5	100×4	120	0,38	4
16Б2	100×8	260	1,63	6	100×5	120	0,47	5
18Б1	110×8	260	1,8	6	100×4	140	0,44	4
18Б2	110×8	290	2	6	110×5	140	0,6	5
20Б1	120×10	340	3,2	6	110×6	150	0,78	6
23Б1	130×10	380	3,88	6	110×6	180	0,93	6
26Б1	140×10	390	4,29	6	110×6	210	1,09	6
26Б2	140×10	440	4,84	6	110×6	210	1,09	6
30Б1	160×10	450	5,65	6	110×6	240	1,24	6
30Б2	160×10	510	6,41	6	110×6	240	1,24	6
35Б1	170×10	390	5,2	8	120×6	290	1,64	6
35Б2	190×10	440	6,56	8	120×6	290	1,64	6
40Б1	200×10	460	7,22	8	120×6	330	1,86	6
40Б2	190×12	510	9,13	8	130×6	330	2,02	6
45Б1	200×12	520	9,8	8	130×8	370	3,02	8
45Б2	210×14	540	12,46	10	140×8	370	3,25	8
50Б1	220×14	550	13,3	10	140×8	420	3,69	8
50Б2	230×14	530	13,4	12	150×8	420	3,96	8
55Б1	250×14	570	15,66	12	150×10	460	5,42	10
55Б2	250×16	620	19,47	14	150×10	460	5,42	10
60Б1	260×16	650	21,23	14	160×10	510	6,41	10
60Б2	260×18	630	23,14	16	160×12	510	7,89	12
70Б1	300×16	720	27,13	14	170×12	610	9,77	12
70Б2	310×18	660	28,91	18	180×12	610	10,34	12
80Б1	320×18	740	33,46	16	200×12	700	13,19	12
80Б2	320×20	740	37,18	18	200×12	700	13,19	12
90Б1	340×20	770	41,1	18	220×16	790	21,83	16
90Б2	340×22	850	49,91	18	220×16	790	21,83	16
100Б1	360×22	860	53,47	18	220×16	880	24,32	16
100Б2	360×25	1000	69,24	18	240×18	880	29,84	18
100Б3	370×28	1030	83,77	20	240×18	880	29,84	18
100Б3	370×32	1140	105,96	20	250×20	880	34,54	20

Таблица 17.7. Сталь элементов и накладок марки С245.
Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св-08А

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20Ш1	170×10	420	5,6	6	120×6	140	0,79	6
23Ш1	180×10	480	6,78	6	120×6	170	0,96	6
26Ш1	210×10	430	7,09	8	120×6	190	1,07	6
26Ш2	200×12	490	9,23	8	130×6	190	1,16	6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
30Ш1	230×12	510	11,05	8	140×6	230	1,52	6
30Ш2	230×14	530	13,4	10	140×8	230	2,02	8
30Ш3	240×14	590	15,56	10	140×8	230	2,02	8
35Ш1	280×14	620	19,08	10	160×8	270	2,71	8
35Ш2	280×14	580	17,85	12	160×8	270	2,71	8
35Ш3	280×16	650	22,86	12	160×8	270	2,71	8
40Ш1	330×14	680	24,66	12	180×8	310	3,5	8
40Ш2	330×16	760	31,5	12	180×10	310	4,38	10
40Ш3	330×18	850	39,63	12	180×12	310	5,26	12
50Ш1	330×16	740	30,67	12	230×10	400	7,22	10
50Ш2	330×18	850	39,63	12	230×12	400	8,67	12
50Ш3	350×20	810	44,51	16	230×12	400	8,67	12
50Ш4	360×22*	910	56,58	16	230×16	400	11,56	16
60Ш1	350×18	860	42,53	14	260×10	490	10	10
60Ш2	370×20	870	50,54	16	260×16	490	16	16
60Ш3	360×25*	910	64,29	18	260×16	490	16	16
60Ш4	370×28*	1030	83,77	18	260×18	490	18	18
70Ш1	360×20	850	48,04	16	200×12	580	10,93	12
70Ш2	380×22*	960	63	16	200×14	580	12,75	14
70Ш3	360×28*	1000	79,13	18	250×16	580	18,21	16

* Накладки, отмеченные звездочкой, изготовлять из стали марки С255.

Таблица 17.8. Сталь элементов и накладок марки С345. Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св–10ГА

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
20Ш1	170×10	480	6,41	6	120×6	140	0,79	6
23Ш1	180×10	540	7,63	6	120×6	170	0,96	6
26Ш1	210×10	490	8,08	8	120×8	190	1,43	8
26Ш2	200×12	530	10	8	130×8	190	1,55	8
30Ш1	230×12	550	11,92	8	140×8	230	2,02	8
30Ш2	230×14	570	14,41	10	140×8	230	2,02	8
30Ш3	240×14	640	16,89	10	140×8	230	2,02	8
35Ш1	280×14	680	20,92	10	160×8	270	2,71	8
35Ш2	280×14	630	19,39	12	160×10	270	3,39	10
35Ш3	280×16	710	24,97	12	160×10	270	3,39	10
40Ш1	330×14	740	26,84	12	180×8	310	3,5	8
40Ш2	330×16	830	34,4	12	180×12	310	5,26	12
40Ш3	330×18	920	42,9	12	180×12	310	5,26	12
50Ш1	330×16	800	33,16	12	230×10	400	7,22	10
50Ш2	330×18	930	43,36	12	230×16	400	11,56	16
50Ш3	350×20	880	48,36	16	230×16	400	11,56	16
50Ш4	360×22	990	61,55	16	230×16	400	11,56	16
60Ш1	350×18	940	46,49	14	260×12	490	12	12
60Ш2	370×20	940	54,6	16	260×16	490	16	16
60Ш3	360×25	980	69,24	18	260×18	490	18	18
60Ш4	370×28	1120	91,09	18	260×20	490	20	20
70Ш1	360×20	920	52	16	200×12	580	10,93	12
70Ш2	380×22	1040	68,25	16	200×16	580	14,57	16
70Ш3	360×28	1090	86,25	18	250×18	580	20,49	18
70Ш4	360×32	1230	111,23	18	300×20	580	27,32	20
70Ш5	370×36	1270	132,79	20	300×24	580	32,78	24

Таблица 17.9. Сталь элементов и накладок марки С245.
Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св-08А

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
20К1	220×10	580	10,02	6	120×6	140	0,79	6
20К2	220×12	650	13,47	6	130×6	140	0,86	6
23К1	260×12	700	17,14	6	130×6	170	1,04	6
23К2	260×12	610	14,94	8	140×8	170	1,49	8
26К1	280×12	660	17,41	8	140×8	190	1,67	8
26К2	280×14	670	20,62	10	150×8	190	1,79	8
26К3	280×16	750	26,38	10	160×8	190	1,91	8
30К1	320×14	760	26,73	10	150×8	230	2,17	8
30К2	320×16	730	29,34	12	160×8	230	2,31	8
30К3	350×16	800	35,17	14	170×10	230	3,07	10
35К1	380×16	800	38,18	14	160×8	270	2,71	8
35К2	380×18	910	48,86	14	170×10	270	3,6	10
35К3	380×20	910	54,29	16	190×12	270	4,83	12
40К1	450×16	980	55,39	14	170×10	310	4,14	10
40К2	440×20	1030	71,15	16	190×12	310	5,55	12
40К3	440×25*	1070	92,39	18	220×16	310	8,57	16
40К4	450×28*	1150	113,75	20	250×18	310	10,95	18

* Накладки, отмеченные звездочкой, изготовлять из стали марки С255.

Таблица 17.10. Сталь элементов и накладок марки С345.
Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св-10ГА

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
20К1	220×10	660	11,4	6	120×8	140	1,06	8
20К2	220×12	700	14,51	6	130×8	140	1,14	8
23К1	260×12	770	18,86	6	130×6	170	1,04	6
23К2	260×12	680	16,65	8	140×8	170	1,49	8
26К1	280×12	720	18,99	8	140×8	190	1,67	8
26К2	280×14	720	22,16	10	150×8	190	1,79	8
26К3	280×16	820	28,84	10	160×10	190	2,39	10
30К1	320×14	830	29,19	10	150×8	230	2,17	8
30К2	320×16	790	31,75	12	160×10	230	2,89	10
30К3	350×16	860	37,81	14	170×12	230	3,68	12
35К1	380×16	870	41,52	14	160×10	270	3,39	10
35К2	380×18	990	53,16	14	170×10	270	3,6	10
35К3	380×20	990	59,06	16	190×12	270	4,83	12
40К1	450×16	1070	60,48	14	170×10	310	4,14	10
40К2	440×20	1120	77,40	16	190×12	310	5,55	12
40К3	440×25	1160	100,17	18	220×16	310	8,57	16
40К4	450×28	1240	122,65	20	250×20	310	12,17	20
40К5	470×32	1350	159,39	22	290×24	310	16,94	24

Таблица 17.11. Сталь элементов и накладок марки С245.
Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св–08А

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
35ДБ1	150×10	300	3,53	8	110×5	300	1,3	5
40ДБ1	160×10	330	4,14	8	120×5	350	1,65	5
45ДБ1	190×10	400	5,97	8	130×6	390	2,39	6
45ДБ2	210×14	420	9,69	12	130×6	380	2,33	6

Таблица 17.12. Сталь элементов и накладок марки С345.
Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св–10ГА

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
35ДБ1	150×10	330	3,88	8	110×5	300	1,3	5
40ДБ1	160×10	370	4,65	8	120×6	350	1,98	6
45ДБ1	190×10	440	6,56	8	110×6	390	2,02	6
45ДБ2	210×14	460	10,62	12	130×8	380	3,1	8

Таблица 17.13. Сталь элементов и накладок марки С245.
Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св–08А

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
10	80×6	230	0,87	4	100×4	70	0,22	4
12	90×6	260	1,1	4	100×4	90	0,28	4
14	100×8	290	1,82	4	100×4	100	0,31	4
16	100×8	270	1,7	5	100×4	120	0,38	4
18	110×8	300	2,07	5	100×4	140	0,48	4
20	120×8	330	2,49	5	110×4	160	0,55	4

Таблица 17.14. Сталь элементов и накладок марки С345.
Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св–10ГА

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
10	80×6	250	0,94	4	100×5	70	0,27	5
12	90×6	290	1,23	4	100×5	90	0,35	5
14	100×8	320	2,01	4	100×5	100	0,39	5
16	100×8	300	1,88	5	100×5	120	0,47	5
18	110×8	330	2,28	5	100×5	140	0,6	5
20	120×8	370	2,79	5	110×5	160	0,69	5

17.1.4. Стыки элементов из швеллеров по ГОСТ 8240–89.

Конструктивное решение.

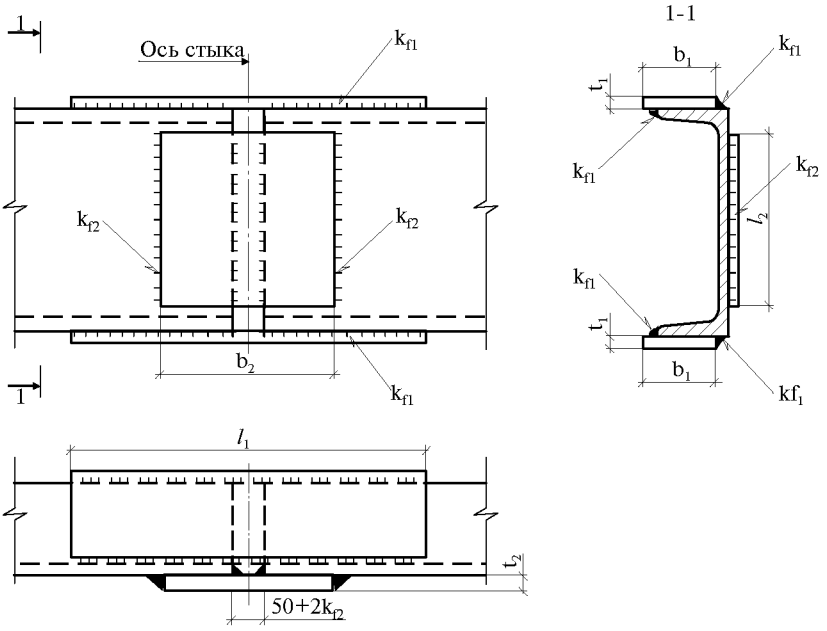


Рис.17.4.

Конструкция стыка, размеры стыковых накладок и сварных швов в зависимости от стали швеллеров и накладок, типа электродов и марки сварочной проволоки должны соответствовать указанным на данном чертеже и в табл.17.15, 17.16.

Таблица 17.15. Сталь элементов и накладок марки С245.
Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св–08А

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
8	45×8	190	0,54	4	100×5	60	0,24	4
10	50×8	210	0,66	4	100×5	80	0,32	4
12	60×8	230	0,87	4	100×5	100	0,39	4
14	65×10	250	1,28	4	120×5	120	0,56	4
16	65×10	240	1,22	5	120×5	140	0,66	4
18	70×10	260	1,43	5	120×6	160	0,9	4
20	80×10	280	1,76	5	120×6	180	1,02	4
22	90×12	300	2,54	6	120×6	200	1,13	4
24	90×12	310	2,63	6	140×6	220	1,45	4
27	100×12	340	3,2	6	140×8	250	2,2	4
30	110×12	300	3,11	8	140×8	280	2,46	5
33	110×14	310	4	10	150×8	300	2,83	5
36	120×14	330	4,35	10	150×8	330	3,11	6
40	120×16	360	5,43	10	150×8	370	3,49	6

Таблица 17.16. Сталь элементов и накладок марки С345. Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св–10ГА

Номер профиля	Накладка по полкам				Накладка по стенке			
	сечение $b_1 \times t_1$, мм	длина l_1, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f1}, мм	сечение $b_2 \times t_2$, мм	длина l_2, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_{f2}, мм
8	45×8	210	0,59	4	100×5	60	0,24	4
10	50×8	230	0,72	4	100×5	80	0,32	4
12	60×8	260	0,98	4	100×5	100	0,39	4
14	65×10	290	1,48	4	120×5	120	0,56	4
16	65×10	270	1,38	5	120×5	140	0,66	4
18	70×10	290	1,59	5	120×6	160	0,9	5
20	80×10	320	2,01	5	120×6	180	1,02	5
22	90×12	310	2,63	6	120×6	200	1,13	5
24	90×12	350	2,96	6	140×6	220	1,45	5
27	100×12	360	3,38	6	140×8	250	2,2	5
30	110×12	320	3,32	8	140×8	280	2,46	5
33	110×14	330	3,99	10	150×8	300	2,83	6
36	120×14	360	4,75	10	150×8	330	3,11	6
40	120×16	390	5,88	10	150×8	370	3,49	6

17.1.5. Стыки элементов из парных уголков равнополочных по ГОСТ 8509–93.
Конструктивное решение:

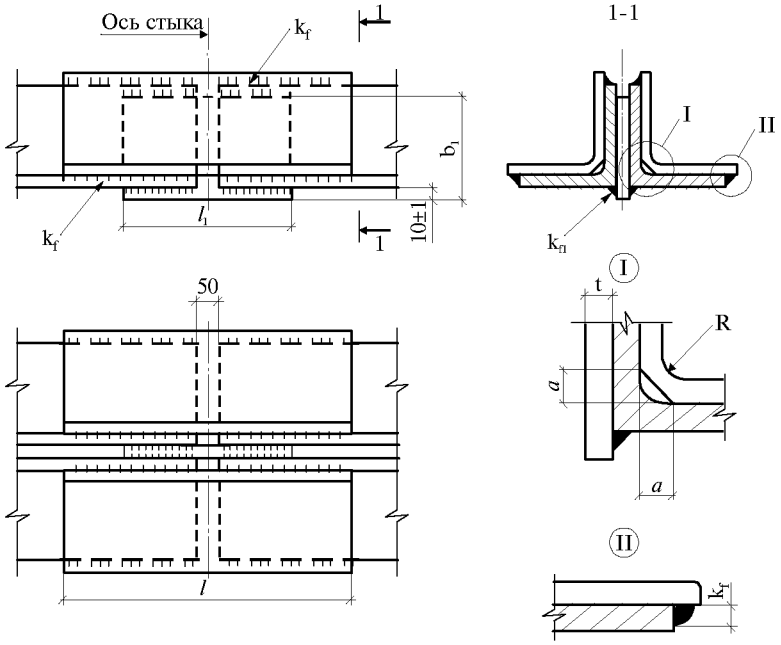


Рис.17.5.

1. Размер a равен радиусу R; размер t определяется конструктивно.
2. Конструкция стыка, размеры стыковых накладок и сварных швов в зависимости от стали уголков и накладок, типа электродов или марки сварочной проволоки должны соответствовать указанным на данном чертеже и в табл.17.17–17.18.
3. Катет шва k_{f1} принять по табл. 38 СНиП II–23–81*.

Таблица 17.17. Сталь элементов и накладок марки С245. Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св–08А

Номер уголка	Сечение, мм		Стыковой уголок				Прокладка, мм	
	b	t	номер уголка	длина l, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_f, мм	ширина b_1	длина l_1
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	50	4 5 6	5	180 210 230	0,55 0,79 1,03	4 4 4	55	150
5,6	56	4 5	5,6	210 240	0,72 1,02	4 4	65	150
6,3	63	4 5 6	6,3	230 270 300	0,9 1,3 1,72	4 4 4	70	150
7	70	5 6 7 8	7	280 320 300 290	1,51 2,04 2,22 2,43	4 4 5 6	80	200
7,5	75	5 6 7 8	7,5	300 340 320 310	1,74 2,34 2,55 2,8	4 4 5 6	80	200
8	80	6 7 8	8	350 330 310	2,58 2,81 2,99	4 5 6	90	250
9	90	6 7 8	9	330 370 350	2,75 3,57 3,83	5 5 6	100	250
10	100	7 8 10 12	10	390 370 350 370	4,21 4,53 5,29 6,62	5 6 8 10	110	250
11	110	7 8	11	460 440	5,47 5,94	5 6	120	300
12,5	125	8 9 10 12	12,5	470 510 440 460	7,27 8,82 8,4 10,43	6 6 8 10	135	300
14	140	9 10 12	14	590 500 530	11,45 10,73 13,52	6 8 10	150	400
16	160	10 11 12 14 16	16	550 600 590 570 620	13,57 16,21 16,73 19,36 23,88	8 8 10 12 14	170	400
18	180	11 12	18	690 680	21,02 22,52	8 10	190	500
20	200	12 14 16 20 25 30	20	760 720 790 840 960 1110	28,1 30,82 38,43 50,47 71,06 97,19	10 12 14 16 16 16	210	500

1	2	3	4	5	6	7	8	9
22	220	14 16	22	790 870	37,45 46,83	12 14	230	500
25	250	16 18 20 22 25 28 30	25	1000 1110 1070 1100 1230 1360 1440	61,55 76,44 81,44 91,64 115,58 142,12 160,47	14 14 16 16 16 16 16	260	600

Таблица 17.18. Сталь элементов и накладок марки С345. Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св–10ГА

Номер уголка	Сечение, мм		Стыковой уголок				Прокладка, мм	
	b	t	номер уголка	длина l, мм	масса 1 шт., кг	катет шва k_f, мм	ширина b_1	длина l_1
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	50	4 5 6	5	200 230 260	0,61 0,87 1,16	4 4 4	55	150
5,6	56	4 5	5,6	240 270	0,83 1,15	4 5	65	150
6,3	63	4 5 6	6,3	260 300 340	1,01 1,44 1,94	4 4 4	70	150
7	70	5 6 7 8	7	310 360 340 320	1,66 2,3 2,51 2,68	4 4 5 6	80	200
7,5	75	5 6 7 8	7,5	340 380 360 340	1,97 2,62 2,87 3,07	4 4 5 6	80	200
8	80	6 7 8	8	400 370 350	2,94 3,15 3,38	4 5 6	90	250
9	90	6 7 8	9	370 420 400	3,08 4,05 4,37	5 5 6	100	250
10	100	7 8 10 12	10	440 420 400 400	4,75 5,15 6,04 7,16	5 6 8 10	110	250
11	110	7 8	11	520 500	6,18 6,75	5 6	120	300
12,5	125	8 9 10 12	12,5	530 590 500 500	8,19 10,21 9,55 11,34	6 6 8 10	135	300
14	140	9 10 12	14	670 570 570	13,01 12,23 14,54	6 8 10	150	400

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	160	10 11 12 14 16	16	630 650 640 620 680	15,54 17,56 18,14 21,06 26,19	8 8 10 12 14	170	400
18	180	11 12	18	760 740	23,16 24,51	8 10	190	500
20	200	12 14 16 20 25 30	20	830 780 860 920 1040 1210	30,69 33,38 41,84 55,27 76,98 105,95	10 12 14 16 16 16	210	500
22	220	14 16	22	860 950	40,76 51,14	12 14	230	500
25	250	16 18 20 22 25 28 30	25	1090 1210 1170 1190 1340 1480 1570	67,09 83,32 89,05 99,14 125,92 154,66 174,96	14 14 16 16 16 16 16	260	600

17.1.6. Стыки элементов из парных уголков неравнополочных по ГОСТ 8510–86*.
Конструктивное решение:

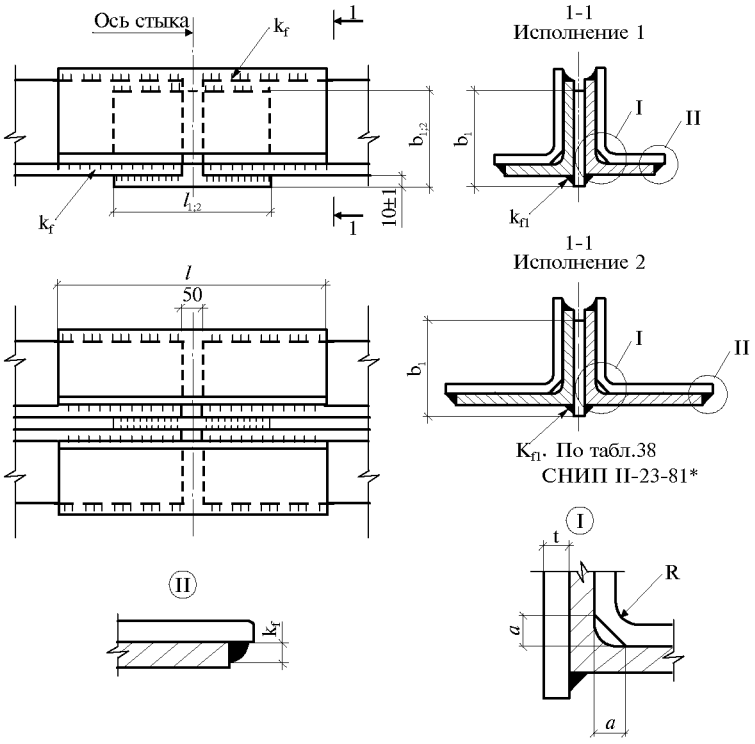


Рис.17.6.

1. Размер a равен радиусу R; размер t определяется конструктивно.
2. Конструкция стыка, размеры стыковых накладок и сварных швов в зависимости от стали уголков и накладок, типа электродов или марки сварочной проволоки должны соответствовать указанным на данном чертеже и в табл.17.19, 17.20.

Таблица 17.19. Сталь элементов и накладок марки С245. Тип электродов Э42, Э42А. Марка сварочной проволоки Св–08А

Сечение уголка элемента, мм		Стыковой уголок					Прокладка, мм			
		сечение, мм		длина	масса 1 шт.,	высота шва	ширина	длина	ширина	длина
$B\times b$	t	$B\times b$	t	l, мм	кг	k_f, мм	b_1	l_1	b_2	l_2
50×32	4	50×32	4	190	0,46	4	55	150	35	150
56×36	4	56×36	4	200	0,56	4	65	150	40	150
	5		5	230	0,8	4				
	4		4	220	0,7	4				
63×40	5	63×40	5	250	0,98	4	70	150	45	150
	6		6	270	1,25	4				
70×45	5	70×45	5	260	1,14	4	75	200	50	150
75×50	5	75×50	5	280	1,34	4	80	200	55	150
	6		6	320	1,82	4				
80×50	5	80×50	5	290	1,3	4	90	250	55	150
	6		6	280	1,66	5				
90×56	6	90×56	6	310	2,08	5	100	250	65	150
	8		8	330	2,89	6				
100×63	6	100×63	6	330	2,48	5	110	250	70	150
	8		8	350	3,45	6				
110×70	8	110×70	8	390	4,26	6	120	300	75	200
	8		8	430	5,41	6				
125×80	10	125×80	10	400	6,19	8	135	300	90	250
	12		12	460	8,44	8				
140×90	8	140×90	8	490	6,92	6	150	400	100	250
	10		10	460	8,03	8				
160×100	10	160×100	10	500	9,93	8	170	400	110	250
	12		12	530	12,5	10				
180×110	10	180×110	10	570	12,65	8	190	500	120	300
	12		12	660	17,42	8				
200×125	12	200×125	12	730	21,71	8	210	500	135	300
	14		14	760	26,17	10				

Таблица 17.20. Сталь элементов и накладок марки С345. Тип электродов Э50, Э50А. Марка сварочной проволоки Св–10ГА

Сечение уголка элемента, мм		Стыковой уголок					Накладка, мм			
		сечение, мм		длина	масса 1 шт.,	высота шва	ширина	длина	ширина	длина
$B\times b$	t	$B\times b$	t	l, мм	кг	k_f, мм	b_1	l_1	b_2	l_2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
50×32	4	50×32	4	200	0,48	4	55	150	35	150
56×36	4	56×36	4	220	0,62	4	65	150	40	150
	5		5	250	0,87	4				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	4		4	230	0,73	4				
63×40	5	63×40	5	270	1,06	4	70	150	45	150
	6		6	300	1,39	4				
70×45	5	70×45	5	290	1,27	4	75	200	50	150
	5		5	320	1,53	4				
75×50	6	75×50	6	360	2,05	4	80	200	55	150
	8		8	320	2,38	6				
80×50	5	80×50	5	330	1,48	4	90	250	55	150
	6		6	310	1,84	5				
90×56	6	90×56	6	340	2,28	5	100	250	65	150
	8		8	370	3,24	6				
100×63	6	100×63	6	370	2,79	5	110	250	70	150
	8		8	400	3,95	6				
110×70	8	110×70	8	440	4,81	6	120	300	75	200
	8		8	490	6,16	6				
125×80	10	125×80	10	460	7,12	8	135	300	90	250
	12		12	500	9,17	8				
140×90	8	140×90	8	560	7,91	6	150	400	100	250
	10		10	520	9,08	8				
160×100	10	160×100	10	570	11,32	8	170	400	110	250
	12		12	570	13,44	10				
180×110	10	180×110	10	650	14,43	8	190	500	120	300
	12		12	720	19,01	8				
200×125	12	200×125	12	790	23,5	8	210	500	135	300
	14		14	820	28,23	10				

17.2. Риски отверстий в прокатных профилях

17.2.1. Уголки стальные горячекатаные равнополочные по ГОСТ 8509-93 и уголки стальные горячекатаные неравнополочные по ГОСТ 8510–86*.

Таблица 17.21. Размещение отверстий

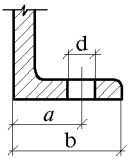


Рис.17.7.

Однорядное расположение			
b, мм	*a*, мм	*d*, мм не более для болтов по ГОСТ	
		7798-70*	22353-77
50	30	15	–
56			–
63	35	19	–
70	40		–
75	45	23	–
80			–
90	50	28	28
100*	60		
110			
125	75		

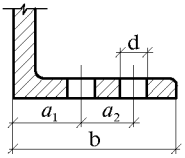


Рис.17.8.

Двухрядное расположение

b, мм	Порядок расположения отверстий	Риски		d, мм не более	
		a_1, мм	a_2, мм	для болтов по ГОСТ	
				7798-70*	22353-77
125*	Шахматный	55	35	23	–
140	Рядовой		55	19	–
	Шахматный	60	45	28	–
160*	Рядовой		65	23	–
	Шахматный	65	60		–
180	Рядовой		75		
	Шахматный		70	28	
200**	Рядовой,	80	80		28
220	шахматный		90		
250**		90	100		

Примечание. В стыках профилей полки b, отмеченной звездочкой, при толщинах полок, начиная с 14 мм, и отмеченных двумя звездочками, начиная с 25 мм, размеры a, a_1, a_2, d определяются индивидуально.

17.2.2. Двутавры стальные горячекатанные с параллельными гранями полок по ГОСТ 26020–83*.

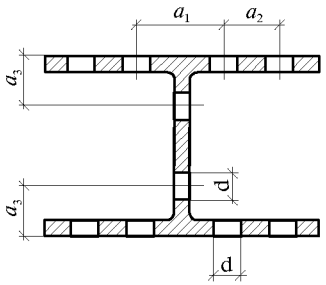


Рис.17.9.

(См. табл.17.22).

17.2.3. Двутавры стальные горячекатаные по ГОСТ 8239–89.

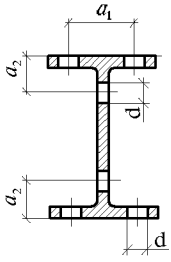


Рис.17.10.

(См. табл.17.23).

Таблица 17.22. Размещение отверстий в двутаврах с параллельными гранями полок

Нормальные двутавры Б, расположение отверстий											
Номер профиля	в полке								в стенке		
	двухрядное			четырехрядное					a_3, мм	d, мм, не более	
	a_1, мм	d, мм, не более		Порядок расположения отверстий	a_1, мм	a_2, мм	d, мм, не более			для болтов по ГОСТ	
		для болтов по ГОСТ					для болтов по ГОСТ				
		7798-70*	22353-77				7798-70*	22353-77		7798-70*	22353-77
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20Б1	60	15	–	–	–	–	–	–	50	28	–
23Б1	65		–	–	–	–	–	–			–
26Б1; 26Б2	70	19	–	–	–	–		–	60	33	–
30Б1; 30Б2	80		–	–	–	–	–	–			–
35Б1; 35Б2	90	23	–	–	–	–	–	–			–
40Б1; 40Б2	100	23	–	–	–	–	–	–	70		–
45Б1; 45Б2			–	–	–	–	–	–			–
50Б1; 50Б2	110	28	23	–	–	–	–	–	80		33
55Б1; 55Б2	130	33	28	–	–	–	–	–			
60Б1; 60Б2	140		33	–	–	–	–	–			
70Б1; 70Б2				Рядовой	100	50	19	–			
				Шахматный	110	45	23	–			
80Б1; 80Б2				Рядовой	110	50	19	–	90		
				Шахматный	120	45	23	19			
90Б1; 90Б2	150			Рядовой	120	60	23	–			
					130	50	–	19			
				Шахматный			28	23			
100Б1–100Б4	160			Рядовой	140	60	23		100		
				Шахматный		50	28	–			
							–	28			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Широкополочные двутавры Ш, расположение отверстий											
20 Ш1	80	23	–	–	–	–	–	–	50	23	–
23 Ш1			–	–	–		–	–		28	–
26Ш1; 26Ш2	100	28	23	–	–	–	–	–	60		28
30Ш1–30Ш3	110		28	–	–	–		–	70		
35Ш1–35Ш3	130			Рядовой	90	50	19	–			
				Шахматный	100	45	23	–			
40Ш1–40Ш3	140			Рядовой	110	60		–	80		
						50	–	19			
				Шахматный			28			33	33
50Ш1–50Ш4	150	33	33	Рядовой	120	60	23	–			
						50	–	19	90		
				Шахматный	130		28	23			
60Ш1–60Ш4	160			Рядовой		60	23		100		
				Шахматный		50	28				
70Ш1–70Ш5				Рядовой	140	60	23		110		
				Шахматный		40	28	23			
Колонные двутавры К, расположение отверстий											
20К1; 20К2	100		28	–	–	–	–	–	50	23	
23К1; 23К2	120			Рядовой	80	50	19	–	60	28	
				Шахматный	90	45	23	–			
26К1–26К3				Рядовой		45	23	–	70		28
				Шахматный	100	45	23				
30К1–30К3	130	33	33	Рядовой		60	23	19			
				Шахматный	110	50	28		80		
35К1–35К3				Рядовой		70	28	23		33	33
				Шахматный	130	60	33				
40К1–40К5	140			Рядовой	140	85	33	28	100		
				Шахматный		60	–	33			
Двутавры дополнительной серии ДБ, расположение отверстий											
35ДБ1	80	19	–	–	–	–	–	–			–
40ДБ1			–	–	–	–	–	–			–
45ДБ1	90	23	–	–	–	–	–	–	70	33	–
45ДБ2	100	28	–	–	–	–	–	–			–
		–	19								33

Таблица 17.23. Расположение отверстий в двутаврах по ГОСТ 8239-89

Номер профиля	Расположение отверстий			
	в полке		в стенке	
	a_1, мм	d, мм не более	a_2, мм	d, мм не более
18	50	15	50	19
20	55			
22	60	19	60	23
24				
27	70			
30			65	
33	80	23		
36			70	
40				
45	90			
50	100	28	80	28
55				
60	110		90	

17.2.4. Сталь горячекатаная. Швеллеры по ГОСТ 8240–89.

С уклоном внутренних граней полок

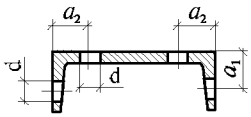


Рис.17.11.

С параллельными гранями полок

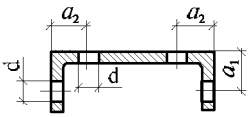
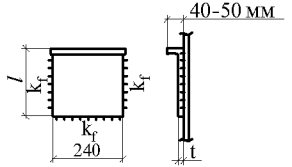
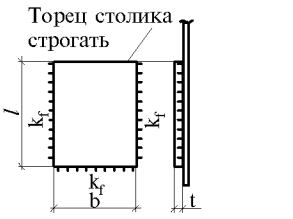
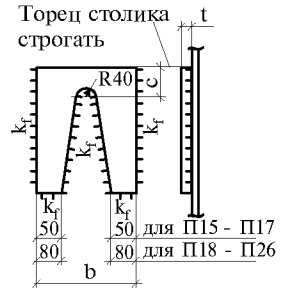


Рис.17.12.

Таблица 17.24. Расположение отверстий в швеллерах с уклоном внутренних и параллельных граней полок

Номер профиля	Расположение отверстий			
	в полке		в стенке	
	a_1, мм	d, мм не более	a_2, мм	d, мм не более
12	30	15	40	15
14	35	19	45	
14а				
16	40		50	19
16а		23		
18			55	23
18а	45			19
20			60	23
20а	50			
22			65	28
22а		28		23
24				
24а	60			
27			70	28
30				
33				23
36	70		75	28
40				

Таблица 17.25. Параметры столиков для опирания ферм и балок со строганными концами

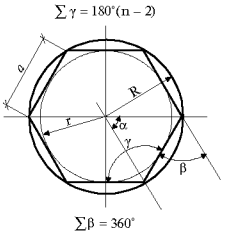
Марка детали	Эскиз	Размер столика, мм				k_f, мм	Несущая способность столика, кН		Масса 1 шт, кг	Примечание
		l	b	t	c		Свариваемая сталь марки			
							С245	С345		
П1 П2 П3		200	40	14	–	6 8 10	196 294 343	245 343 392	10,3	Из ⌊ 200×14 С345
П4 П5		220	50	16	–	12 14	392 441	441 441	12,9	Из ⌊ 220×16 С345
П6 П7 П8		270	250	40	–	10 12 16	539 637 834	588 686 834	22,3	–
П9 П10 П11		400	320	40	–	10 12 16	981 1177 1422	1030 1482 1482	42	
П12 П13 П14		500	360	40	–	10 12 16	1270 1520 1860	1320 1620 1860	59,4	
П15 П16 П17		270	250	40	100	10 12 16	686 834 1030	736 834 1030	15,6	–
П18 П19 П20		600	360	40	250	10 12 16	1960 2350 2890	2060 2500 2890	54,3	
П21 П22 П23		700	400	50	300	10 12 16	2300 2750 3380	2400 2890 3380	83,8	
П24 П25 П26		800	450	50	300	10 12 16	2750 3330 4070	2940 3480 4070	104,2	

Примечания: 1. При расчете швов, прикрепляющих столики, учтены изгиб и срез углового шва; введен коэффициент запаса κ=1,5 на возможную неравномерность передачи усилия. 2. Вид сварки – полуавтоматическая, проволокой диаметром 1,4–2 мм, положение шва – нижнее.

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ КОНСТРУКТОРА

18.1 Правильные многоугольники

Обозначения



α – центральный угол, равный $360{:}n$;
β – внешний угол, равный $360{:}n$;
γ – внутренний угол, равный $180°–\beta$;
n – число сторон;
a – сторона многоугольника;
R – радиус описанной окружности;
r – радиус вписанной окружности;
S – площадь многоугольника.

$$a = 2\sqrt{R^2 - r^2} = 2R\sin\frac{\alpha}{2} = 2r\,\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2};\qquad r = \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} = \frac{a}{2}\mathrm{ctg}\frac{\alpha}{2};$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + r^2} = \frac{a}{2}\cdot\frac{1}{\sin\frac{\alpha}{2}};\qquad S = 0{,}5nar = nr^2\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2} = 0{,}5nR^2\sin\alpha = 0{,}25na^2\mathrm{ctg}\frac{\alpha}{2}$$

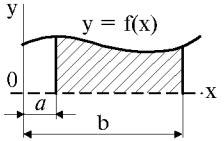
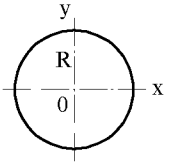
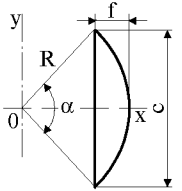
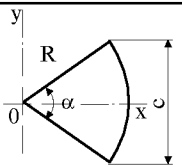
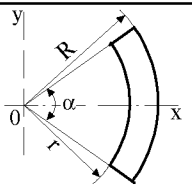
Элементы правильных многоугольников

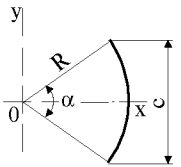
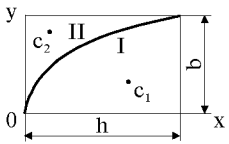
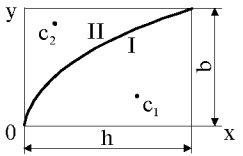
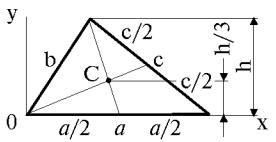
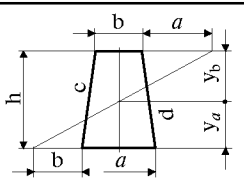
n	α	$\frac{R}{a}$	$\frac{a}{R}$	$\frac{r}{a}$	$\frac{a}{r}$	$\frac{S}{a^2}$	$\frac{S}{R^2}$	$\frac{S}{r^2}$
5	72°	0,8507	1,1756	0,6882	1,4531	1,7205	2,3776	3,6327
6	60°	1,0000	1,0000	0,8660	1,1547	2,5981	2,5981	3,4641
7	51°25′43″	1,1524	0,8678	1,0383	0,9631	3,6339	2,7364	3,3707
8	45°	1,3066	0,7654	1,2071	0,8284	4,8284	2,8284	3,3137
9	40°	1,4619	0,6840	1,3737	0,7279	6,1818	2,8925	3,2757
10	36°	1,6180	0,6180	1,5388	0,6498	7,6942	2,9389	3,2492
12	30°	1,9319	0,5176	1,8660	0,5359	11,1962	3,0000	3,2154
16	22°30′	2,5629	0,3902	2,5137	0,3978	20,1095	3,0615	3,1826
24	15°	3,8306	0,2611	3,7979	0,2633	45,5747	3,1058	3,1597
48	7°30′	7,6449	0,1308	7,6285	0,1311	183,0851	3,1326	3,1461

n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
1	0,00000	21	0,14904	41	0,07655	61	0,05148	81	0,03878
2	1,00000	22	0,14231	42	0,07473	62	0,05065	82	0,03830
3	0,86603	23	0,13617	43	0,07300	63	0,04985	83	0,03784
4	0,70711	24	0,13053	44	0,07134	64	0,04907	84	0,03739
5	0,58779	25	0,12533	45	0,06976	65	0,04831	85	0,03695
6	0,50000	26	0,12054	46	0,06824	66	0,04758	86	0,03652
7	0,43388	27	0,11609	47	0,06679	67	0,04687	87	0,03610
8	0,38268	28	0,11196	48	0,06540	68	0,04618	88	0,03569
9	0,34202	29	0,10812	49	0,06407	69	0,04551	89	0,03529
10	0,30902	30	0,10453	50	0,06279	70	0,04486	90	0,03490
11	0,28173	31	0,10117	51	0,06156	71	0,04423	91	0,03452
12	0,25882	32	0,09802	52	0,06038	72	0,04362	92	0,03414
13	0,23932	33	0,09506	53	0,05924	73	0,04302	93	0,03377
14	0,22252	34	0,09227	54	0,05814	74	0,04244	94	0,03341
15	0,20791	35	0,08964	55	0,05709	75	0,04188	95	0,03306
16	0,19509	36	0,08716	56	0,05607	76	0,04132	96	0,03272
17	0,18375	37	0,08481	57	0,05509	77	0,04079	97	0,03238
18	0,17365	38	0,08258	58	0,05414	78	0,04027	98	0,03205
19	0,16459	39	0,08047	59	0,05322	79	0,03976	99	0,03173
20	0,15643	40	0,07846	60	0,05234	80	0,03926	100	0,03141

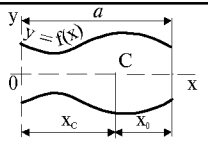
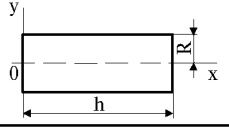
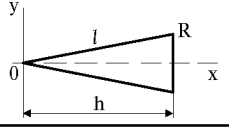
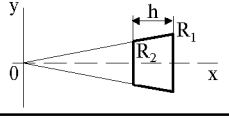
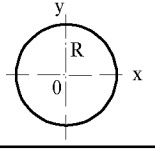
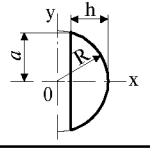
$a=2Rk$

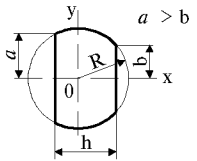
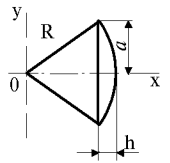
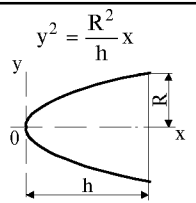
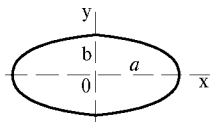
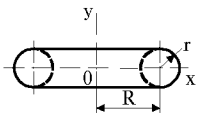
18.2. Простейшие фигуры и кривые

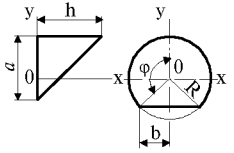
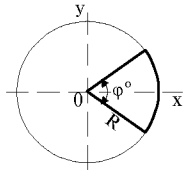
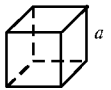
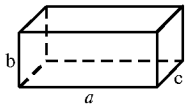
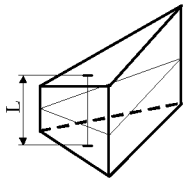
Наименование	Эскиз	Периметр s	Площадь F	Абсцисса центра тяжести x_c
Общий случай		$Y_a + Y_b + (b-a) + \int_a^b \sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\,dx$	$\int_a^b y dx$	$\frac{\int_a^b yxdx}{Fab}$
Круг		$2\pi R$	πR^2	0
Сегмент	 $R = \frac{c^2 + 4f^2}{8f}$	$c + R\alpha$ $\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{c}{2R}$	$\frac{\alpha R^2 - c(R-f)}{2}$	$\frac{c^3}{12F}$
Сектор		$R(2+\alpha)$	$\frac{\alpha R^2}{2}$	$\frac{2}{3}\cdot\frac{c}{\alpha} = \frac{R^2 c}{3F}$
Кольцо		$2(R-r)+\alpha(R+r)$	$\frac{\alpha}{2}(R^2 - r^2)$	$\frac{4}{3}\cdot\frac{R^2 + Rr + r^2}{R+r}\cdot\frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{\alpha}$

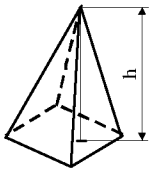
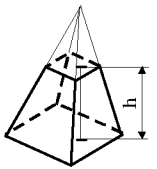
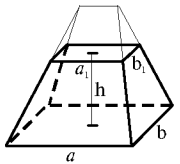
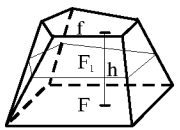
Наименование	Эскиз	Периметр s	Площадь F	Абсцисса центра тяжести x_c
Дуга		–	–	$\frac{c}{\alpha}=\frac{2R}{\alpha}\sin\frac{\alpha}{2}$
Квадратная парабола		$h+b+\frac{a}{2}+\frac{b^2}{4h}\ln\left(\frac{2h}{b}+\frac{a}{b}\right)$, где $a=\sqrt{b^2+4h^2}$	$I-\frac{2}{3}bh$ $II-\frac{1}{3}bh$	$x_{c_1}=0{,}6h;\ y_{c_1}=0{,}375b$ $x_{c_2}=0{,}3h;\ y_{c_2}=0,\ 75b$
Кубическая парабола		–	$I-\frac{3}{4}bh$ $II-\frac{1}{4}bh$	$x_{c_1}=\frac{4}{7}h;\ y_{c_1}=0{,}4b$ $x_{c_2}=\frac{2}{7}h;\ y_{c_2}=0{,}8b$
Треугольник		$a+b+c$	$\frac{ah}{2}$	$y_c=\frac{1}{3}h$
Трапеция		$a+b+c+d$	$\frac{a+b}{2}h$	$y_a=\frac{h}{3}\cdot\frac{a+2b}{a+b}$; $y_b=\frac{h}{3}\cdot\frac{b+2a}{a+b}$

18.3. Простейшие тела

Наименование	Эскиз	Боковая поверхность S	Объем V	Абсцисса центра тяжести x_c
Тела вращения				
Тело вращения с образующей $y=f(x)$		$2\pi\int_0^a y\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\,dx$	$\pi\int_0^a y^2 dx$	$\frac{\pi\int_0^a y^2 x dx}{V}$
Прямой круговой цилиндр		$2\pi Rh$	$\pi R^2 h$	$\frac{h}{2}$
Прямой круговой конус		πRl	$\frac{1}{3}\pi R^2 h$	$x_0=\frac{h}{4}$
Усеченный прямой круговой конус		$\pi(R_1+R_2)\sqrt{(R_1-R_2)^2+h^2}$	$\frac{\pi h}{3}(R_1^2+R_1R_2+R_2^2)$	$x_0=\frac{h(R_1^2+2R_1R_2+3R_2^2)}{4(R_1^2+R_1R_2+R_2^2)}$
Шар		$4\pi R^2$	$\frac{4}{3}\pi R^3$	0
Шаровой сегмент		$\pi(a^2+h^2)$	$\frac{\pi h}{6}(3a^2+h^2)$	$\frac{3}{4}\cdot\frac{(2R-h)^2}{3R-h}$

Наименование	Эскиз	Боковая поверхность S	Объем V	Абсцисса центра тяжести x_c
Шаровой слой		$2\pi Rh$	$\frac{\pi h}{6}(3a^2 + 3b^2 + h^2)$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{a^4 - b^4}{(3a^2 + 3b^2 + h^2)}$
Шаровой сектор		$\pi R(2h+a)$	$\frac{2}{3}\pi R^2 h$	$\frac{3}{8}(2R - h)$
Параболоид вращения		$\frac{\pi R}{6h^2}\left[\sqrt{(4h^2 + R^2)^3} - R^3\right]$	$\frac{\pi R^2 h}{2}$	$\frac{2}{3}h$
Эллипсоид вращения		–	Ось вращения x: $\frac{4}{3}\pi ab^2$ Ось вращения y: $\frac{4}{3}\pi a^2 b$	0
Тор		$4\pi^2 rR$	$2\pi^2 r^2 R$	0

Наименование	Эскиз	Боковая поверхность S	Объем V	Абсцисса центра тяжести x_c
Цилиндрический клин		$\frac{2hR}{a}\left[(a-R)\varphi+b\right]$	$\frac{h}{3a}\left[b(3R^2-b^2)+3R^2(a-R)\varphi\right]$	–
Шаровой клин		$\frac{\pi R^2\varphi^0}{90}$	$\frac{\pi R^3\varphi^0}{270}$	–
Тела, ограниченные плоскостями				
Куб		$4a^2$	a^3 (a – ребро куба)	
Прямоугольный параллелепипед		$2(ab+bc)$	abc (a, b, c – взаимно перпендикулярные ребра)	
Произвольная призма, усеченная непараллельно основанию		–	FL (L – длина прямой, соединяющей центры верхнего и нижнего оснований; F – площадь перпендикулярного сечения)	

Наименование	Эскиз	Боковая поверхность S	Объем V	Абсцисса центра тяжести x_c
Пирамида		–	$\frac{1}{3}Fh$ (F – площадь основания; h – высота)	
Усеченная пирамида		–	$\frac{h}{3}(F+f+\sqrt{Ff})$ (F и f – площади оснований; h – высота)	
Обелиск Клин		–	$\frac{h}{6}[(2a+a_1)b+(2a_1+a)b_1]$; $\frac{bh}{6}(2a+a_1)$ при $b_1=0$	
Призматоид		–	$\frac{h}{6}(F+f+4F_1)$ (F, f – площади оснований; F_1 – площадь основания на половине высоты)	

18.4. Основные алгебраические формулы

Формулы сокращенного умножения

$(a+b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab;$

$(a+b)^3 = a^3 + b^3 + 3a^2b + 3ab^2;$

$a^2 - b^2 = (a+b)(a-b);$

$(a+b+c)^2 = a^2 + b^2 + c^2 + 2ab + 2ac + 2bc;$

$(a+b+c)^3 = a^3 + b^3 + c^3 + 3a^2b + 3a^2c + 3ab^2 + 3ac^2 + 3bc^2 + 3b^2c + 6abc;$

$a^3 + b^3 = (a+b)(a^2 - ab + b^2);\ a^3 - b^3 = (a-b)(a^2 + ab + b^2)$

Степени и корни

$$a^m a^n = a^{m+n};\ a^m / a^n = a^{m-n};\ a^0 = 1;\ \frac{1}{a^n} = a^{-n};\ (a^m)^n = a^{mn};\ \sqrt[n]{a^m} = a^{\frac{m}{n}}.$$

Линейные уравнения:

С двумя неизвестными

$a_1x + b_1y + c_1 = 0;\ x = \dfrac{b_1c_2 - b_2c_1}{a_1b_2 - a_2b_1};$

$a_2x + b_2y + c_2 = 0;\ y = \dfrac{c_1a_2 - c_2a_1}{a_1b_2 - a_2b_1};$

С тремя неизвестными

$$a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0;\ x = -\frac{A_1d_1 + A_2d_2 + A_3d_3}{A_1a_1 + A_2a_2 + A_3a_3};$$

$$a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0;\ y = -\frac{B_1c_1 + B_2c_2 + B_3c_3}{A_1a_1 + A_2a_2 + A_3a_3};$$

$$a_3x + b_3y + c_3z + d_3 = 0;\ z = \frac{B_1b_1 + B_2b_2 + B_3b_3}{A_1a_1 + A_2a_2 + A_3a_3};$$

$A_1 = b_3c_2 - b_2c_3;$
$A_2 = b_1c_3 - b_3c_1;$
$A_3 = b_2c_1 - b_1c_2;$
$B_1 = a_3d_2 - a_2d_3;$
$B_2 = a_1d_3 - a_3d_1;$
$B_3 = a_2d_1 - a_1d_2;$

Квадратные уравнения

$$x^2 + px + q = 0;\ x = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - q};\ ax^2 + bx + c = 0;\ x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Логарифмы

$$A^a = N;\ \lg_A N = a;\ \lg 1 = 0;\ \lg(N_1 \cdot N_2) = \lg N_1 + \lg N_2;\ \lg\frac{N_1}{N_2} = \lg N_1 - \lg N_2;\ \lg N^n = n \lg N;$$

$$\lg\sqrt[n]{N} = \frac{1}{n}\lg N;\ \ln x = 2{,}302585 \lg x;\ \lg x = 0{,}434294 \ln x$$

Прогрессии

Прогрессия	Члены прогрессии			Сумма n членов	Примечания
	1-й	2-й	n-й		
Арифметическая	a_1	a_1+r	$a_1+(n-1)r$	$S_n=\frac{(a_1+a_n)n}{2}$	r – разность прогрессии
Геометрическая	a_1	a_1q	a_1q^{n-1}	$S_n=\frac{a(q^n-1)}{q-1}$	q – знаменатель прогрессии

Соединения

Число размещений из n элементов по m, отличающихся составом или порядком элементов:

$$A_n^m = n(n-1)(n-2)\cdots(n-m+1).$$

Число перестановок из n элементов по n, отличающихся только порядком элементов: $P_n = 1\cdot 2\cdot 3\ldots,\ n = n!$

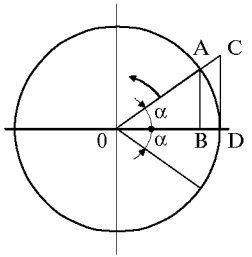
Число сочетаний из n элементов по m, отличающихся только составом элементов:

$$C_n^m = \frac{n(n-1)(n-2)\cdots(n-m+1)}{1\cdot 2\cdot 3\ldots m} = \frac{A_n^m}{P_m} = \frac{n!}{m!(n-m)!};\ C_n^1 = n;\ C_n^m = C_n^{n-m};\ C_n^n = C_n^0 = 1.$$

Бином Ньютона

$$(a+b)^n = a^n na^{n-1}b + \frac{n(n-1)}{2!}a^{n-2}b^2 + \cdots + nab^{n-1} + b^n.$$

18.5. Основные тригонометрические формулы



$$\sin\alpha = \frac{AB}{OA};\quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha};\quad \sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1;$$

$$\cos\alpha = \frac{OB}{OA};\quad \operatorname{ctg}\alpha = \frac{\cos\alpha}{\sin\alpha};\quad 1 + \operatorname{tg}^2\alpha = \frac{1}{\cos^2\alpha};$$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{CD}{OD};\quad \operatorname{cosec}\alpha = \frac{1}{\sin\alpha};\quad 1 + ctg^2\alpha = \frac{1}{\sin^2\alpha};$$

$$\operatorname{ctg}\alpha = \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha};\quad \sec\alpha = \frac{1}{\cos\alpha}.$$

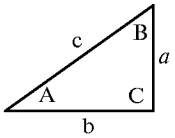
Формулы приведения и значения функций для некоторых углов

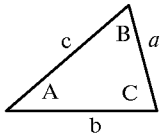
Функция	Данный угол												
	$-\alpha$	$90°-\alpha$	$90°+\alpha$	$180°-\alpha$	$180°+\alpha$	$270°-\alpha$	$270°+\alpha$	$360°-\alpha$	$0°$	$30°$	$45°$	$60°$	$90°$
sin	$-\sin\alpha$	$+\cos\alpha$	$+\cos\alpha$	$+\sin\alpha$	$-\sin\alpha$	$-\cos\alpha$	$-\cos\alpha$	$-\sin\alpha$	0	1/2	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{3}/2$	1
cos	$\cos\alpha$	$+\sin\alpha$	$-\sin\alpha$	$-\cos\alpha$	$-\cos\alpha$	$-\sin\alpha$	$+\sin\alpha$	$+\cos\alpha$	1	$\sqrt{3}/2$	$\sqrt{2}/2$	1/2	0
tg	$-\operatorname{tg}\alpha$	$+\operatorname{ctg}\alpha$	$-\operatorname{ctg}\alpha$	$-\operatorname{tg}\alpha$	$+\operatorname{tg}\alpha$	$+\operatorname{ctg}\alpha$	$-\operatorname{ctg}\alpha$	$-\operatorname{tg}\alpha$	0	$\sqrt{3}/3$	1	$\sqrt{3}$	$\pm\infty$
ctg	$-\operatorname{ctg}\alpha$	$+\operatorname{tg}\alpha$	$-\operatorname{tg}\alpha$	$-\operatorname{ctg}\alpha$	$+\operatorname{ctg}\alpha$	$+\operatorname{tg}\alpha$	$-\operatorname{tg}\alpha$	$-\operatorname{ctg}\alpha$	$+\infty$	$\sqrt{3}$	1	$\sqrt{3}/3$	0

Тригонометрические функции двух углов, двойного и половинного углов

Функции суммы и разности двух углов	Функции двойного и половинного углов	Суммы и разности функций двух углов
$\sin(\alpha+\beta)=\sin\alpha\cos\beta+\cos\alpha\sin\beta$	$\sin 2\alpha=2\sin\alpha\cos\alpha$	$\sin\alpha+\sin\beta=2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$
$\sin(\alpha-\beta)=\sin\alpha\cos\beta-\cos\alpha\sin\beta$	$\cos 2\alpha=\cos^2\alpha-\sin^2\alpha$	$\sin\alpha-\sin\beta=2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$
$\cos(\alpha+\beta)=\cos\alpha\cos\beta-\sin\alpha\sin\beta$	$\operatorname{tg}2\alpha=\frac{2\operatorname{tg}\alpha}{1-\operatorname{tg}^2\alpha}$	$\cos\alpha+\cos\beta=2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$
$\cos(\alpha-\beta)=\cos\alpha\cos\beta+\sin\alpha\sin\beta$	$\sin\frac{\alpha}{2}=\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{2}}$	$\cos\alpha-\cos\beta=-2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$
$\operatorname{tg}(\alpha+\beta)=\frac{\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\beta}{1-\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta}$	$\cos\frac{\alpha}{2}=\sqrt{\frac{1+\cos\alpha}{2}}$	$\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\beta=\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\alpha\cos\beta}$
$\operatorname{tg}(\alpha-\beta)=\frac{\operatorname{tg}\alpha-\operatorname{tg}\beta}{1+\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta}$	$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}=\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{1+\cos\alpha}}$	$\operatorname{tg}\alpha-\operatorname{tg}\beta=\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\cos\alpha\cos\beta}$
$\operatorname{ctg}(\alpha+\beta)=\frac{\operatorname{ctg}\alpha\operatorname{ctg}\beta-1}{\operatorname{ctg}\alpha+\operatorname{ctg}\beta}$	–	$\operatorname{ctg}\alpha+\operatorname{ctg}\beta=\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\alpha\sin\beta}$
$\operatorname{ctg}(\alpha-\beta)=\frac{\operatorname{ctg}\alpha\operatorname{ctg}\beta-1}{\operatorname{ctg}\beta-\operatorname{ctg}\alpha}$	–	$\operatorname{ctg}\alpha-\operatorname{ctg}\beta=\frac{\sin(\beta-\alpha)}{\sin\alpha\sin\beta}$

18.6. Решение треугольников





Теорема синусов

$$\frac{a}{\sin A}=\frac{b}{\sin B}=\frac{c}{\sin C}=2R;\quad \sin\frac{A}{2}=\sqrt{\frac{(p-b)(p-c)}{bc}}.$$

Теорема косинусов

$$a^2=b^2+c^2-2bc\cos A;$$
$$b^2=a^2+c^2-2ac\cos B;$$
$$c^2=a^2+b^2-2ab\cos C;$$

$$a=b\cos C+c\cos B;$$
$$b=a\cos C+c\cos A;$$
$$c=b\cos A+a\cos B.$$

$$\cos\frac{A}{2}=\sqrt{\frac{p(p-a)}{bc}};$$
$$\operatorname{tg}\frac{A}{2}=\sqrt{\frac{(p-b)(p-c)}{p(p-a)}};$$

S – площадь треугольника;

p – полупериметр;

R – радиус описанного круга.

$$S=\frac{1}{2}ab\sin C=2R^2\sin A\sin B\sin C=\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}=\frac{abc}{4R}.$$

Прямоугольные треугольники

Дано	Требуется определить					
	A	B	a	b	c	S
$a,\ b$	$\operatorname{tg}A=\frac{a}{b}$	$\operatorname{tg}B=\frac{b}{a}$	–	–	$\sqrt{a^2+b^2}$	$\frac{ab}{2}$
$a,\ c$	$\sin A=\frac{a}{c}$	$\cos B=\frac{a}{c}$	–	$\sqrt{c^2-a^2}$	–	$\frac{a}{2}\sqrt{c^2-a^2}$
$A,\ a$	–	$90°-A$	–	$a\operatorname{ctg}A$	$\frac{a}{\sin A}$	$\frac{a^2\operatorname{ctg}A}{2}$
$A,\ b$	–	$90°-A$	$b\operatorname{tg}A$	–	$\frac{b}{\cos A}$	$\frac{b^2\operatorname{tg}A}{2}$
$A,\ c$	–	$90°-A$	$c\sin A$	$c\cos A$	–	$\frac{c^2\sin 2A}{4}$

Косоугольные треугольники

Дано	Требуется определить					
	A	B	C	b	c	S
$a,\ b,\ c$	$\cos A = \frac{c^2 - a^2 + b^2}{2bc}$	$\cos B = \frac{a^2 - b^2 + c^2}{2ac}$	$\cos C = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$	–	–	$\frac{ab \sin C}{2}$
$a,\ b,\ A$	–	$\sin B = \frac{b \sin A}{a}$	$180° - A - B$	–	$\frac{b \sin C}{\sin B}$	–
$a,\ b,\ C$	$\sin A = \frac{a \sin C}{c}$	$180° - A - C$	–	–	$\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos C}$	$\frac{ab \sin C}{2}$
$a,\ B,\ C$	$180° - B - C$	–	–	$\frac{a \sin B}{\sin A}$	$\frac{a \sin C}{\sin A}$	$\frac{a^2 \sin B \sin C}{2 \sin A}$
$a,\ A,\ B$	–	–	$180° - A - B$	$\frac{a \sin B}{\sin A}$	$\frac{a \sin C}{\sin A}$	$\frac{a^2 \sin B \sin C}{2 \sin A}$

18.7. Перевод градусов в радианы

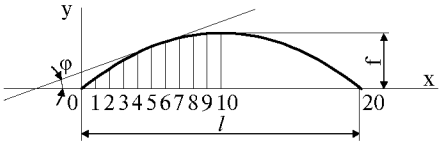
Градусы – радианы											
°	рад	°	рад	°	рад	°	рад	°	рад	°	рад
1	0,0174533	31	0,5410521	61	1,0646508	91	1,5882496	121	2,1118484	151	2,6354472
2	0,0349066	32	0,5585054	62	1,0821041	92	1,6057029	122	2,1292017	152	2,6529005
3	0,0523599	33	0,5759587	63	1,0995574	93	1,6231562	123	2,1467550	153	2,6703538
4	0,0698132	34	0,5934119	64	1,1170107	94	1,6406095	124	2,1642083	154	2,6878070
5	0,0872665	35	0,6108652	65	1,1344640	95	1,6580628	125	2,1816616	155	2,7052603
6	0,1047198	36	0,6283185	66	1,1519173	96	1,6755161	126	2,1991149	156	2,7227136
7	0,1221730	37	0,6457718	67	1,1693706	97	1,6929694	127	2,2165682	157	2,7401669
8	0,1396263	38	0,6632251	68	1,1868239	98	1,7104227	128	2,2340214	158	2,7576202
9	0,1570796	39	0,6806784	69	1,2042772	99	1,7278760	129	2,2514747	159	2,7750735
10	0,1745329	40	0,6981317	70	1,2217305	100	1,7453293	130	2,2689280	160	2,7925268
11	0,1919862	41	0,7155850	71	1,2391838	101	1,7627825	131	2,2863813	161	2,8099801
12	0,2094395	42	0,7330383	72	1,2566371	102	1,7802358	132	2,3038346	162	2,8274334
13	0,2268928	43	0,7504916	73	1,2740904	103	1,7976891	133	2,3212879	163	2,8448867
14	0,2443461	44	0,7679449	74	1,2915436	104	1,8151424	134	2,3387412	164	2,8623400
15	0,2617994	45	0,7853982	75	1,3089969	105	1,8325957	135	2,3561945	165	2,8797933

Градусы – радианы											
°	рад	°	рад	°	рад	°	рад	°	рад	°	рад
16	0,2792527	46	0,8028515	76	1,3264502	106	1,8500490	136	2,3736478	166	2,8972466
17	0,2967060	47	0,8203047	77	1,3439035	107	1,8675023	137	2,3911011	167	2,9146999
18	0,3141593	48	0,8377580	78	1,3613568	108	1,8849556	138	2,4085544	168	2,9321531
19	0,3316126	49	0,8552113	79	0,3788101	109	1,9024089	139	2,4260077	169	2,9496064
20	0,3490659	50	0,8726646	80	1,3962634	110	1,9198622	140	2,4434610	170	2,9670597
21	0,3665191	51	0,8901179	81	1,4137167	111	1,9373155	141	2,4609142	171	2,9845130
22	0,3839724	52	0,9075712	82	1,4311700	112	1,9547688	142	2,4783675	172	3,0019663
23	0,4014257	53	0,9250245	83	1,4486233	113	1,9722221	143	2,4958208	173	3,0194196
24	0,4188790	54	0,9424778	84	1,4660766	114	1,9896753	144	2,5132741	174	3,0368729
25	0,4363323	55	0,9599311	85	1,4835299	115	2,0071286	145	2,5307274	175	3,0543262
26	0,4537856	56	0,9773844	86	1,5009832	116	2,0245819	146	2,5481807	176	3,0717795
27	0,4712389	57	0,9948377	87	1,5184384	117	2,0420352	147	2,5656340	177	3,0892328
28	0,4886922	58	1,0122910	88	1,5358897	118	2,0594885	148	2,5830873	178	3,1066861
29	0,5061455	59	1,0297443	89	1,5533430	119	2,0769418	149	2,6005408	179	3,1241394
30	0,5235988	60	1,0471976	90	1,5707963	120	2,0943951	150	2,6179939	180	3,1415927

Минуты – радианы						Секунды – радианы					
′	рад	′	рад	′	рад	″	рад	″	рад	″	рад
1	0,0002909	21	0,0061087	41	0,0119264	1	0,0000048	21	0,0001018	41	0,0001988
2	0,0005818	22	0,0063995	42	0,0122173	2	0,0000097	22	0,0001067	42	0,0002036
3	0,0008727	23	0,0066904	43	0,0125082	3	0,0000145	23	0,0001115	43	0,0002085
4	0,0011636	24	0,0069813	44	0,0127991	4	0,0000194	24	0,0001164	44	0,0002133
5	0,0014544	25	0,0072722	45	0,0130900	5	0,0000242	25	0,0001212	45	0,0002182
6	0,0017453	26	0,0075631	46	0,0133809	6	0,0000291	26	0,0001261	46	0,0002230
7	0,0020362	27	0,0078540	47	0,0136717	7	0,0000339	27	0,0001309	47	0,0002279
8	0,0023271	28	0,0081449	48	0,0139626	8	0,0000388	28	0,0001357	48	0,0002327
9	0,0026180	29	0,0084358	49	0,0142535	9	0,0000436	29	0,0001406	49	0,0002376
10	0,0029089	30	0,0087266	50	0,0145444	10	0,0000485	30	0,0001454	50	0,0002424

Минуты – радианы						Секунды – радианы					
′	рад	′	рад	′	рад	″	рад	″	рад	″	рад
11	0,0031998	31	0,0090175	51	0,0148353	11	0,0000533	31	0,0001503	51	0,0002473
12	0,0034907	32	0,0093084	52	0,0151262	12	0,0000582	32	0,0001551	52	0,0002521
13	0,0037815	33	0,0095993	53	0,0154171	13	0,0000630	33	0,0001600	53	0,0002570
14	0,0040724	34	0,0098902	54	0,0157080	14	0,0000679	34	0,0001648	54	0,0002618
15	0,0043633	35	0,0101811	55	0,0159989	15	0,0000727	35	0,0001697	55	0,0002666
16	0,0046542	36	0,0104720	56	0,0162897	16	0,0000776	36	0,0001745	56	0,0002715
17	0,0049451	37	0,0107629	57	0,0165806	17	0,0000824	37	0,0001794	57	0,0002763
18	0,0052360	38	0,0110538	58	0,0168715	18	0,000873	38	0,0001842	58	0,0002812
19	0,0055269	39	0,0113446	59	0,0171624	19	0,0000921	39	0,0001891	59	0,0002860
20	0,0058178	40	0,0116355	60	0,0174533	20	0,0000970	40	0,0001939	60	0,0002909

18.8. Ординаты и углы наклона касательных дуг параболы, окружности, эллипса

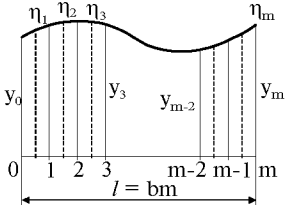


Формула	Величина	Номер сечения и его относительная абсцисса											Множитель l
		0 (20) / 0,00	1 (19) / 0,05	2 (18) / 0,10	3 (17) / 0,15	4 (16) / 0,20	5 (15) / 0,25	6 (14) / 0,30	7 (13) / 0,35	8 (12) / 0,40	9 (11) / 0,45	10 / 0,50	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Парабола													
$y = \frac{4f}{l^2} x(l - x)$	y	0,00	0,19	0,36	0,51	0,64	0,75	0,84	0,91	0,96	0,99	1,00	f
$\operatorname{tg}\varphi = \frac{4f(l - 2x)}{l^2}$	$\operatorname{tg}\varphi$	4,00	3,60	3,20	2,80	2,40	2,00	1,60	1,20	0,80	0,40	0,00	$f{:}l$

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Полуокружность													
$y^2 = x(l-x)$	y	0,000	0,218	0,300	0,357	0,400	0,433	0,458	0,477	0,490	0,497	0,500	l
$\operatorname{tg}\varphi = \dfrac{l-2x}{2\sqrt{x(l-x)}}$	$\operatorname{tg}\varphi$	∞	2,064	1,333	0,980	0,750	0,577	0,437	0,314	0,204	0,101	0,000	1
Полуэллипс													
$y^2 = \dfrac{4f^2}{l^2}x(l-x)$	y	0,000	0,436	0,600	0,714	0,800	0,866	0,916	0,954	0,980	0,994	1,000	f
$\operatorname{tg}\varphi = \dfrac{f}{l}\cdot\dfrac{l-2x}{\sqrt{x(l-x)}}$	$\operatorname{tg}\varphi$	∞	4,129	2,666	1,960	1,500	1,155	0,873	0,629	0,408	0,201	0,000	$f{:}l$

18.9. Площадь, ограниченная кривой и осью координат

Эскиз	№ п.п.	Формула (сверху вниз в порядке возрастания точности результата)	Примечание	№ п.п.	Формула (сверху вниз в порядке возрастания точности результата)	Примечание
	1	$F = b(0{,}5y_0 + y_1 + y_2 + \cdots + y_{m-1} + 0{,}5y_m)$	m – четное	4	$F = \dfrac{3}{8}b(y_0 + 3y_1 + 3y_2 + 2y_3 + 3y_4 + 3y_5 + 2y_6 + \cdots + 2y_{m-3} + 3y_{m-2} + 3y_{m-1} + y_m)$	m – кратное трем
	2	$F = b\sum_1^m \eta$				
	3	$F = \dfrac{b}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \cdots + 2y_{m-2} + 4y_{m-1} + y_m)$		5	$F = \dfrac{l}{6}(y_0 + 4y_{0,5m} + y_m)$	Для кривой не выше третьего порядка; m – четное

Пример: $y = \dfrac{0{,}02}{1+x^2}$; $l = 1$; $m = 10$.

По формуле (1) ..... F=0,156997
То же (2) ..... F=0,157121
То же (3) ..... F=0,157088
По формуле (4) – на участке 0–0,9 и (5) – на участке 0,9 – 1..... F=0,157080
Точное значение ..... F=0,15707963

18.10. Ординаты дуги окружности

Определение ординат точек производят в такой последовательности:
1) определяют расстояние между ординатами a умножением величины радиуса на коэффициент K, соответствующий заданному радиусу;
2) находят число точек делением c на a;
3) ординаты точек получают умножением радиуса на величину A, соответствующую данному номеру точки.
Пример. Исходные данные: R=8100 мм; c=2700 мм.
В таблице «Значения коэффициента K» находим коэффициент для данного радиуса K=0,018.
Расстояние между точками $a=RK=8100\cdot 0{,}018=145{,}9$ мм. Число точек (оно же число отрезков a)

$$n=\frac{c}{a}=\frac{2700}{145{,}9}=18 \text{ точек.}$$

Остаток $b = c - na = 2700 - 18 \cdot 145{,}9 = 74$ мм.

Ординаты точек: $S_1 = RA_1 = 8100 \cdot 0{,}000162 = 1$ мм;

$S_2 = RA_2 = 8100 \cdot 0{,}000648 = 5$ мм;

. . . . . .

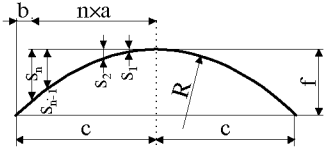
. . . . . .

$S_{17} = RA_{17} = 8100 \cdot 0{,}047968 = 389$ мм;

$S_{18} = RA_{18} = 8100 \cdot 0{,}053943 = 437$ мм.

Значения коэффициента K

R, мм	K
До 6 000	0,025
6 000 – 8 300	0,018
8 300 – 16 500	0,009
16 500 – 30 000	0,005
30 000 – 50 000	0,003
50 000 – 100 000	0,0015



c = RK | b = c - na | S = RA

№ точки	Значение A при						№ точки
	K=0,025	K=0,018	K=0,009	K=0,005	K=0,003	K=0,0015	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,000 313	0,000 162	0,000 041	0,000 012	0,000 005	0,000 001	1
2	0,001 251	0,000 648	0,000 162	0,000 050	0,000 018	0,000 005	2
3	0,002 817	0,001 459	0,000 365	0,000 112	0,000 041	0,000 010	3
4	0,005 013	0,002 595	0,000 649	0,000 200	0,000 072	0,000 018	4
5	0,007 843	0,004 058	0,001 013	0,000 313	0,000 112	0,000 028	5

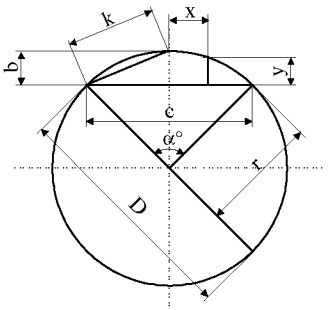
1	2	3	4	5	6	7	8
6	0,011 314	0,005 849	0,001 459	0,000 450	0,000 162	0,000 041	6
7	0,015 432	0,007 970	0,001 986	0,000 613	0,000 220	0,000 055	7
8	0,020 204	0,010 422	0,002 595	0,000 801	0,000 288	0,000 072	8
9	0,025 641	0,013 209	0,003 286	0,001 013	0,000 365	0,000 091	9
10	0,031 754	0,016 333	0,004 058	0,001 251	0,000 450	0,000 112	10
11	0,038 556	0,019 798	0,004 913	0,001 514	0,000 545	0,000 136	11
12	0,046 061	0,023 607	0,005 849	0,001 802	0,000 648	0,000 162	12
13	0,054 286	0,027 763	0,006 868	0,002 115	0,000 761	0,000 190	13
14	0,063 250	0,032 273	0,007 970	0,002 454	0,000 882	0,000 220	14
15	0,072 976	0,037 140	0,009 155	0,002 817	0,001 013	0,000 253	15
16	0,083 485	0,042 370	0,010 422	0,003 206	0,001 153	0,000 288	16
17	0,094 807	0,047 969	0,011 774	0,003 620	0,001 301	0,000 325	17
18	0,106 971	0,053 943	0,013 209	0,004 058	0,001 459	0,000 365	18
19	0,120 015	0,060 300	0,014 729	0,004 523	0,001 626	0,000 406	19
20	0,133 975	0,067 047	0,016 333	0,005 013	0,001 802	0,000 450	20
21	0,148 898	0,074 195	0,018 023	0,005 528	0,001 986	0,000 496	21
22	0,164 835	0,081 749	0,019 798	0,006 069	0,002 180	0,000 545	22
23	0,181 846	0,089 723	0,021 659	0,006 635	0,002 383	0,000 596	23
24	0,200 000	0,098 127	0,023 607	0,007 226	0,002 595	0,000 648	24
25	0,219 375	0,106 971	0,025 641	0,007 843	0,002 817	0,000 703	25
26	0,240 066	0,116 271	0,027 763	0,008 486	0,003 047	0,000 761	26
27	0,262 183	0,126 041	0,029 974	0,009 155	0,003 286	0,000 820	27
28	0,285 857	0,136 297	0,032 273	0,009 849	0,003 535	0,000 882	28
29	0,311 252	0,147 055	0,034 661	0,010 568	0,003 792	0,000 947	29
30	0,338 562	0,158 335	0,037 140	0,011 314	0,004 058	0,001 013	30
31	0,368 039	0,170 159	0,039 709	0,012 085	0,004 334	0,001 082	31
32	0,399 999	0,182 551	0,042 370	0,012 883	0,004 619	0,001 153	32
33	0,434 867	0,195 535	0,045 123	0,013 706	0,004 913	0,001 226	33
34	0,473 217	0,209 142	0,047 969	0,014 556	0,005 216	0,001 301	34
35	0,515 876	0,223 406	0,050 908	0,015 432	0,005 528	0,001 379	35

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8
36	0,564 110	0,238 359	0,053 943	0,016 333	0,005 849	0,001 459	36
37	0,620 033	0,254 048	0,057 074	0,017 261	0,006 180	0,001 541	37
38	0,687 751	0,270 518	0,060 300	0,018 216	0,006 519	0,001 626	38
39	0,777 794	0,287 823	0,063 625	0,019 197	0,006 868	0,001 713	39
40	1,000 000	0,306 026	0,067 147	0,020 204	0,007 226	0,001 802	40

№ точки	Значение A при					№ точки	Значение A при			
	K=0,018	K=0,009	K=0,005	K=0,003	K=0,0015		K=0,009	K=0,005	K=0,003	K=0,0015
41	0,325 200	0,070 571	0,021 238	0,007 593	0,001 893	61	0,164 178	0,047 648	0,016 887	0,004 195
42	0,345 428	0,074 195	0,022 298	0,007 970	0,001 986	62	0,170 159	0,049 264	0,017 450	0,004 334
43	0,366 814	0,077 920	0,023 386	0,008 355	0,002 082	63	0,176 283	0,050 908	0,018 023	0,004 475
44	0,389 479	0,081 749	0,024 500	0,008 750	0,002 180	64	0,182 551	0,052 582	0,018 605	0,004 619
45	0,413 569	0,085 683	0,025 641	0,009 155	0,002 281	65	0,188 967	0,054 286	0,019 197	0,004 764
46	0,439 272	0,089 723	0,026 809	0,009 568	0,002 383	66	0,195 535	0,056 019	0,019 798	0,004 913
47	0,466 818	0,093 870	0,028 005	0,010 000	0,002 488	67	0,202 259	0,057 782	0,020 409	0,005 063
48	0,496 509	0,098 127	0,029 227	0,010 422	0,002 595	68	0,209 142	0,059 574	0,021 030	0,005 216
49	0,528 751	0,102 493	0,030 477	0,010 864	0,002 705	69	0,216 189	0,061 398	0,021 659	0,005 370
50	0,564 110	0,106 971	0,031 754	0,011 314	0,002 817	70	0,223 406	0,063 250	0,022 298	0,005 528
51	0,603 420	0,111 564	0,033 059	0,011 774	0,002 930	71	0,230 793	0,065 134	0,022 948	0,005 687
52	0,647 999	0,116 271	0,034 392	0,012 243	0,003 047	72	0,238 359	0,067 047	0,023 607	0,005 849
53	0,700 191	0,121 096	0,035 751	0,012 722	0,003 165	73	0,246 109	0,068 992	0,024 275	0,006 013
54	0,765 018	0,126 041	0,037 140	0,013 209	0,003 286	74	0,254 048	0,070 968	0,024 953	0,006 180
55	0,858 934	0,131 107	0,038 556	0,013 706	0,003 408	75	0,262 183	0,072 976	0,025 641	0,006 348
56	–	0,136 297	0,040 000	0,014 213	0,003 535	76	0,270 518	0,075 014	0,026 339	0,006 519
57	–	0,141 612	0,041 473	0,014 729	0,003 662	77	0,279 062	0,077 083	0,027 047	0,006 692
58	–	0,147 055	0,042 973	0,015 254	0,003 792	78	0,287 823	0,079 185	0,027 763	0,006 868
59	–	0,152 628	0,044 503	0,015 789	0,003 924	79	0,296 808	0,081 319	0,028 490	0,007 046
60	–	0,158 335	0,046 061	0,016 333	0,004 058	80	0,306 026	0,083 485	0,029 227	0,007 226

18.11. Элементы окружности



$\pi = 3{,}14159265;$ $\lg \pi = 0{,}4971499;$

$\frac{1}{\pi} = 0{,}3183099;$ $\lg \frac{1}{\pi} = \bar{1}{,}5028501;$

$\pi^2 = 9{,}8696044;$ $\lg \pi^2 = 0{,}9942997;$

$\frac{1}{\pi^2} = 0{,}1013212;$ $\lg \frac{1}{\pi^2} = \bar{1}{,}0057003;$

$\sqrt{\pi} = 1{,}7724539;$ $\lg \sqrt{\pi} = 0{,}2485749;$

$\sqrt{\frac{1}{\pi}} = 0{,}5641896;$ $\lg \sqrt{\frac{1}{\pi}} = \bar{1}{,}7514251;$

$\frac{\pi}{180} = 0{,}0174533;$ $\lg \frac{\pi}{180} = \bar{2}{,}2418774;$

$\frac{180}{\pi} = 57{,}2957795;$ $\lg \frac{180}{\pi} = 1{,}7581266;$

1 *рад*=57°57′44″; 8(57°, 2958); 1°=0,017453 *рад.*

Длина окружности при диаметре равном единице

$$S = \pi = 3{,}14159265.$$

Длина окружности радиуса r

$$S = 2\pi r = \pi D.$$

Диаметр D окружности длиной S

$$D = 0{,}31831\ S.$$

Диаметр D окружности, длина которой равна периметру квадрата со стороной a:

$$D = 1{,}27324a\ .$$

Сторона a квадрата, периметр которого равен длине окружности диаметра D:

$$a = 0{,}78540D\ .$$

Диаметр D окружности, описанной вокруг квадрата со стороной a:

$$D = 1{,}41421a\ .$$

Сторона a квадрата, вписанного в окружность диаметра D:

$$a = 0{,}70711D\ .$$

Хорда $c = 2\sqrt{2br - b^2} = 2\sqrt{b(2r - b)} = 2r\sin\frac{\alpha}{2}.$

Стрелка $b = r - \frac{1}{2}\sqrt{4r^2 - c^2} = \frac{D}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(D + c)(D - c)} = \frac{c}{2}\operatorname{tg}\frac{\alpha}{4} = r\left(1 - \cos\frac{\alpha}{2}\right).$

Радиус окружности $r = \frac{4b^2 + c^2}{8b}.$

Координаты точки A $x = \sqrt{r^2 - (r + y - b)^2}\,;$ $y = \sqrt{r^2 - x^2} + b - r.$

Длина дуги $L = r\alpha\ рад;\ L = \frac{\pi}{180} r\alpha^\circ = 0{,}017453\, r\alpha^\circ$

(приближенно $L = \frac{8k - c}{3};\ L = \sqrt{c^2 + \frac{16}{3} b^2}$).

Центральный угол дуги длиной L $\alpha^\circ = \frac{180}{\pi r} L = 57{,}29578 \frac{L}{r} \cdot \alpha_{рад} = \frac{L}{r}.$

18.12. Двугранные углы

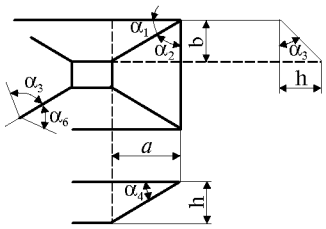
Аналитическое определение угла

$$tg\,\alpha_1 = \frac{b}{a};\quad tg\,\alpha_2 = \frac{a}{b};$$

$$tg\,\alpha_3 = \frac{h}{b};\quad tg\,\alpha_4 = \frac{h}{a}.$$

$$\cos\alpha_5 = \cos\alpha_1 \sin\alpha_3$$

$$\cos\alpha_6 = \cos\alpha_2 \sin\alpha_4$$



Графическое определение угла

Даны две проекции двугранного угла.

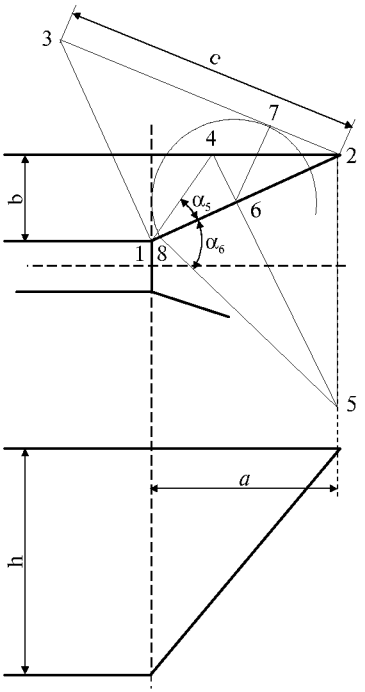
1. Из точки *1* восстанавливаем перпендикуляр *1–3* к ребру *1–2*. Откладываем *1–3*, равным h . Отрезок *3–2*, равный $\sqrt{a^2 + b^2 + h^2}$, дает истинную длину ребра *1–2*.

2. Из произвольной точки *6* прямой *1–2* восстанавливаем перпендикуляры *6–4* и *6–5* и опускаем перпендикуляр *6–7* на прямую *3–2*.

3. Проводим дугу *7–8* радиусом *6–7* с центром в точке *6*. Отрезки *8–4* и *8–5* образуют с прямой *1–2* углы α_5 и α_6, сумма которых дает искомый двугранный угол.

Проверка:

$$\text{tg}\,\alpha_5 = \frac{bc}{ah};\quad \text{tg}\,\alpha_6 = \frac{ac}{bh}.$$



ГЛАВА 19

РАЗВЕРТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

19.1. Общие положения

Листовыми конструкциями называются конструкции, выполненные из листов и предназначенные для хранения, транспортирования газов, жидкостей и сыпучих материалов. Листовые конструкции могут быть выполнены в виде многогранников: (призмы, пирамиды) и криволинейные, как правило, имеющие в сечении окружность, цилиндры, конусы, сферы. Многогранные листовые конструкции применяются для сооружений в основном с низкими нагрузками и их форма часто обусловливается технологическими соображениями. Криволинейные листовые конструкции используются для хранения и транспортировки продукта при наличии избыточного давления и вакуума. Такая форма листовых конструкций позволяет наиболее полно использовать прочностные свойства металла - его работу на растяжение. Широкому применению листовых конструкций способствовало внедрение при изготовлении и монтаже металлоконструкций индустриальных методов сварки - автоматической и полуавтоматической.

По назначению номенклатура строительных листовых металлоконструкций разнообразна (рис.19.1). Это: резервуары цилиндрические вертикальные и горизонтальные; газгольдеры цилиндрические, сферические; бункеры, силосы для сыпучих материалов; различные трубопроводы; конструкции доменных комплексов, кожухи доменных печей, воздухонагревателей, пылеуловителей, различные сосуды и аппараты химической промышленности и др.

Надежность листовых конструкций, их стоимость, трудоемкость при изготовлении и монтаже во многом зависят от рациональной конструкторской разработки. При этом следует:

- обеспечивать минимальное количество сварочных работ, особенно на монтаже, полное использование возможностей автоматической монтажной сварки;
- избегать сосредоточения сварных швов в одном месте, избегать пересечения сварных швов;
- при раскрое предусматривать расположение сварных швов, обеспечивающее к ним свободный доступ;
- обеспечивать минимальное количество технологических операций при изготовлении конструкций;
- членение на отправочные марки производить с учетом максимальных возможностей транспортных габаритов;
- выполнять раскрой деталей листовых конструкций, обеспечивающий минимальное количество отходов.

Методы построения разверток и последующего раскроя элементов листовых конструкций должны обеспечивать заданную точность. Обычно точность раскроя диктуется возможностями выполнения сварочных работ и колеблется в пределах 1-3 мм.

Такую степень точности можно получить как аналитическим расчетом развертки, так и графическим построением. Следует отметить, что внедрение ЭВМ может обеспечить теоретически точный расчет развертки. В данном случае ограничением является возможность практического нанесения на лист контуров детали по точкам. В настоящее время созданы программы для ЭВМ, позволяющие получить графическое построение раскроя детали в заданном масштабе на основе теоретического расчета. В этом случае возможно изготовление шаблона раскроя детали, обеспечивающее точность 0,5 мм и менее.

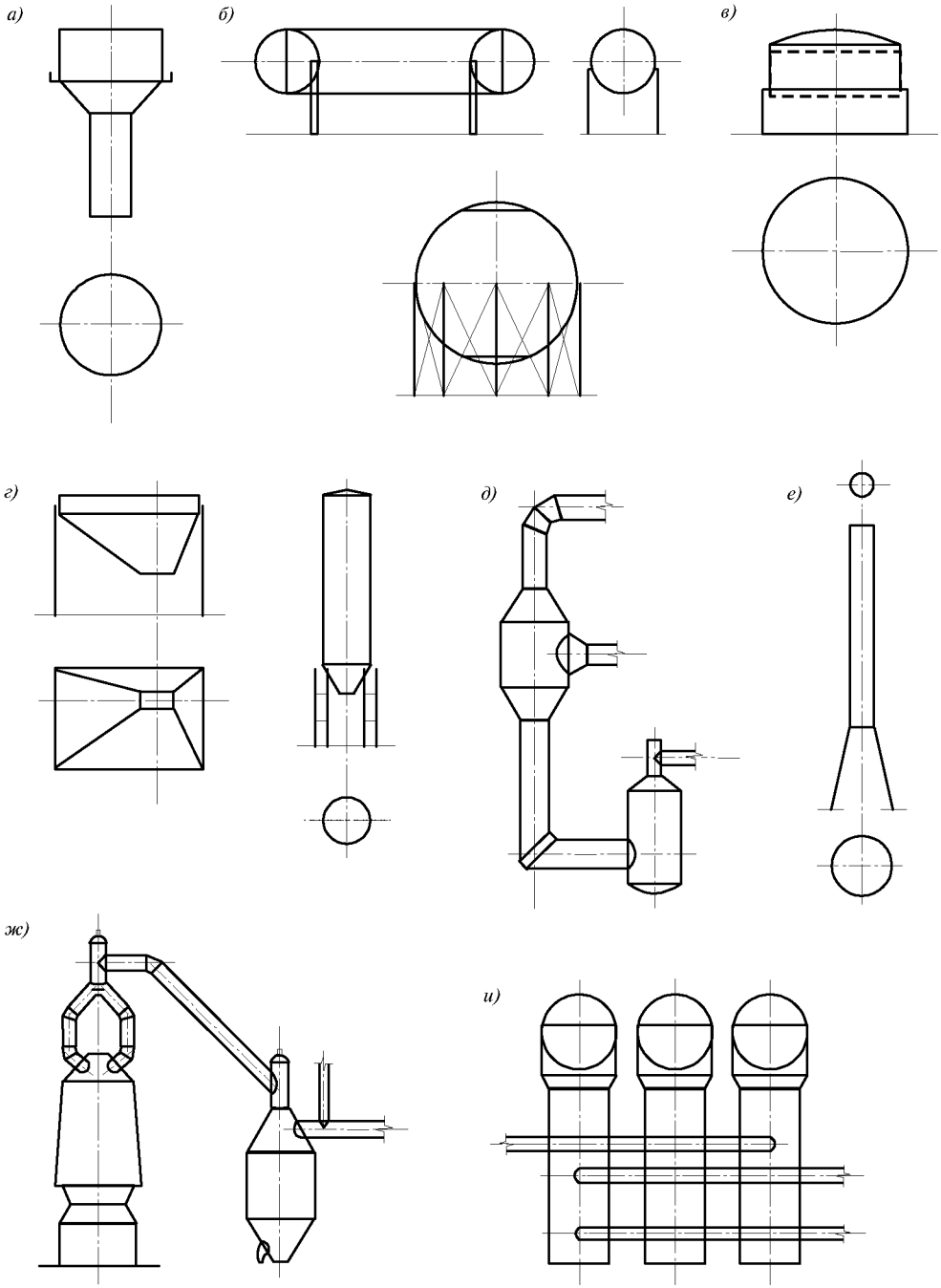


Рис.19.1. Пример геометрических форм различных листовых конструкций

а – водонапорная башня; *б* – газгольдеры; *в* – мокрый газгольдер; *г* – бункеры и силосы; *д* – аэродинамическая труба; *е* – дымовая труба; *ж* – доменная печь и пылеуловитель; *и* – воздухонагреватели

При построении разверток следует учитывать технологические возможности производства, методы резки листа, вальцовки, обработки кромок и др. Необходимо учитывать также толщину листа, прочностные характеристики стали.

Далее будут изложены основные сведения по разверткам поверхностей криволинейных листовых конструкций второго и третьего порядков.

Аналитический метод построения разверток обеспечивает большую точность построения, при этом целесообразно использование таблиц и широкое применение ЭВМ. Практические методы построения разверток листовых конструкций даны в работах [2-4].

Приведем общие сведения и формулы для расчета координат точек пересечения поверхностей для построения их разверток при изготовлении конструкций и проектировании. Все криволинейные поверхности можно разделить на два типа:

- с разворачивающимися поверхностями - это поверхности, у которых образующая является прямой линией и параллельна оси вращения или с ней пересекается;
- неразворачивающиеся поверхности - это поверхности, образуемые вращением кривых линий, либо прямых, скрещивающихся с осью вращения.

19.2. Разворачивающиеся поверхности

Разворачивающимися поверхностями являются конус и цилиндр или поверхность, составленная из этих фигур.

19.2.1. Цилиндр. Поверхность прямого цилиндра разворачивается в плоскость в виде прямоугольника, имеющего стороны:

$$H;\ \ 2\pi r. \tag{19.1}$$

При сечении цилиндра наклонной плоскостью ординаты развертки поверхности определяются по формуле (рис.19.2)

$$y = \frac{r\cos\varphi}{\operatorname{tg}\alpha} = h\cos\varphi\,. \tag{19.2}$$

19.2.2. Конус. Поверхность прямого конуса разворачивается в плоскость в виде кругового сектора с центральным углом

$$\varphi = 2\pi\sin\beta \tag{19.3}$$

и радиусом, равным

$$R = l_0 = H\ /\ \cos\beta\,. \tag{19.4}$$

Возможны три варианта сечения конуса (рис.19.3):

1) плоскостью, наклоненной к оси конуса ($90-\alpha<\beta$);

2) плоскостью, параллельной одной из образующих ($90-\alpha=\beta$);

3) плоскостью, параллельной оси конуса ($90-\alpha=0$).

Общий вариант сечения конуса плоскостью имеет следующие формулы развертки:

$$y = y_0\frac{1+\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta}{1+\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta\cos\varphi};\ \ l = l_0\frac{1+\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta}{1+\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\beta\cos\varphi}\,. \tag{19.5}$$

Второй вариант сечения – плоскостью, параллельной одной из образующей ($90-\alpha=\beta$):

$$y = \frac{2y_0}{1+\cos\varphi};\ \ l = \frac{2l_0}{1+\cos\varphi}\,. \tag{19.6}$$

Третий вариант сечения – плоскостью, параллельной его оси ($90-\alpha=0$):

$$y = \frac{y_0}{\cos\varphi};\ \ l = \frac{l_0}{\cos\varphi}\,. \tag{19.7}$$

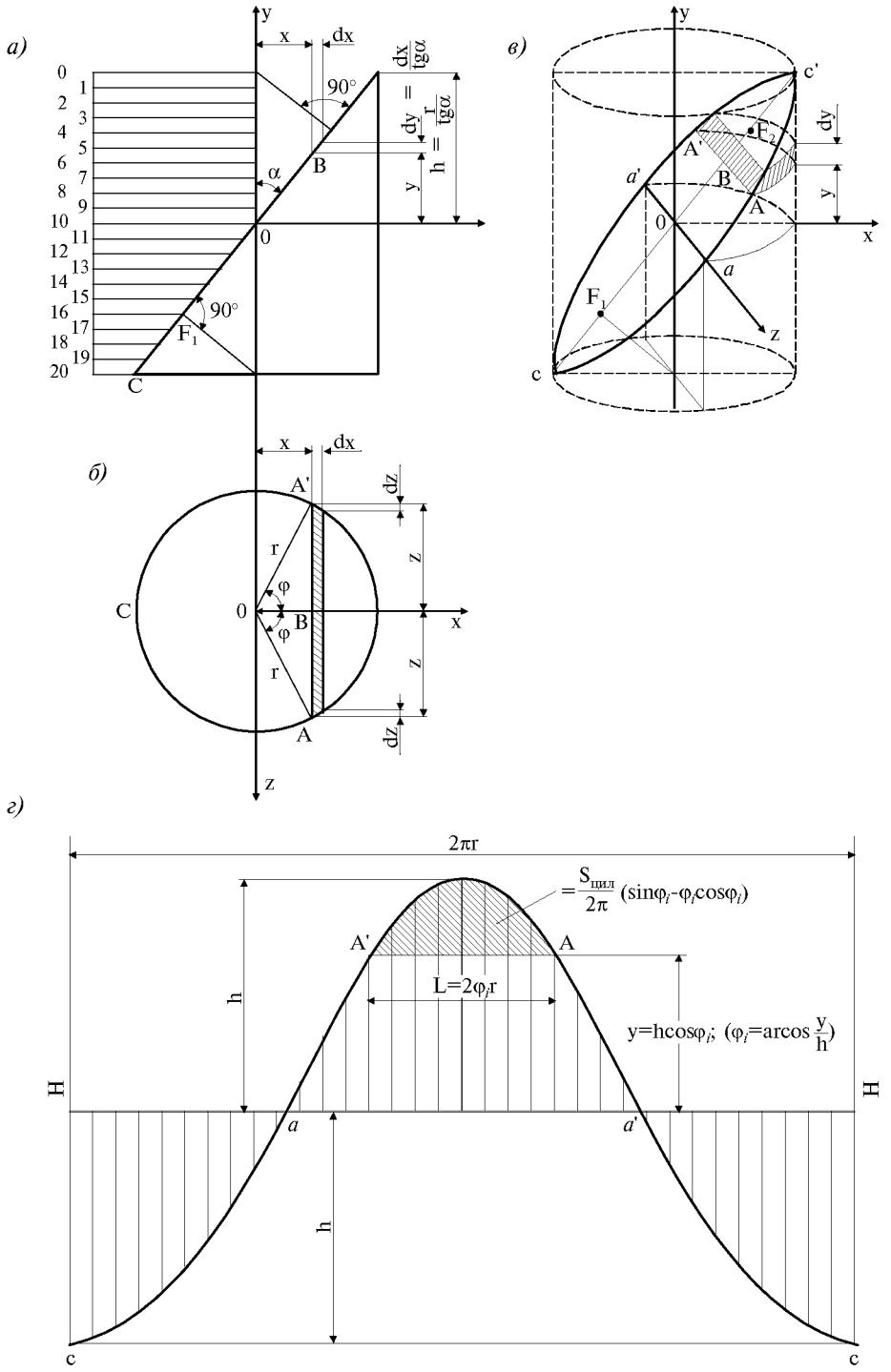


Рис.19.2. Развертка цилиндрического копыта

а – сечение плоскостью *y*0x; *б* – сечение плоскостью, нормальной оси 0*y*; *в* – сечение плоскостью, проходящей через 0z, наклоненной к *y*0z под углом α; *г* – развертка

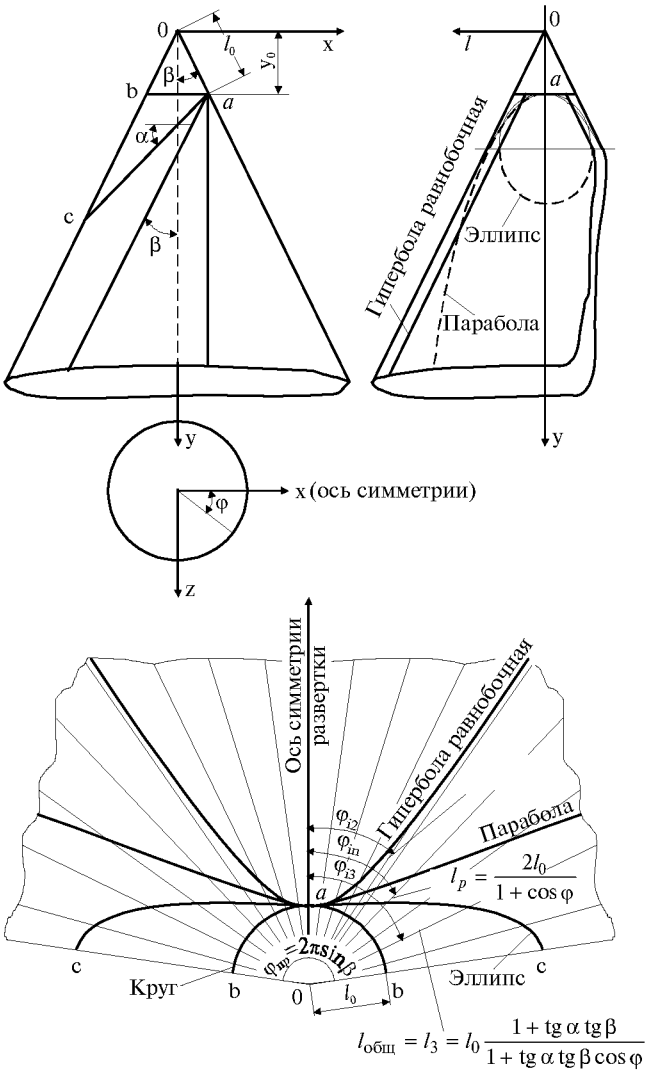


Рис.19.3. Развертка конических сечений

19.2.3. Пересечение двух поверхностей. Пересечение двух конусов можно рассматривать как общий случай пересечения различных разворачивающихся поверхностей - двух цилиндров, цилиндра и конуса. Для удобства развертки длина образующей в местах пересечения выражается через центральный угол φ. При пересечении конусов каждому данному углу φ будут соответствовать два значения образующей l_{i1} и l_{i2}. На рис.19.4 приведены обозначения. За центры координат приняты вершины конусов.

Решение системы уравнений поверхностей конусов дает выражение

$$l_1^2 \frac{\cos^2\beta_2 - (\sin\varphi_1 \sin\alpha \sin\beta_1 + \cos\alpha\cos\beta_1)^2}{\cos^2\beta_2} + \qquad (19.8)$$

$$+2l_1\left[\sin\varphi_1 \sin\alpha \sin\beta_1\left(\frac{a_1\cos\alpha}{\cos^2\beta_2} - a_2\operatorname{tg}^2\beta_2\right)\right] -$$

$$-\cos\varphi_1 e\sin\beta_1 - a_1\cos\beta_1\left(1-\frac{\cos^2\alpha}{\cos^2\beta_2}\right) - a_2\cos\alpha\cos\beta_1\,\mathrm{tg}^2\,\beta_2\Big] +$$

$$+\Big[a_1^2\sin^2\alpha + e^2 - \left(a_1\cos\alpha - a_2\right)^2\mathrm{tg}^2\,\beta_2\Big] = 0\ .$$

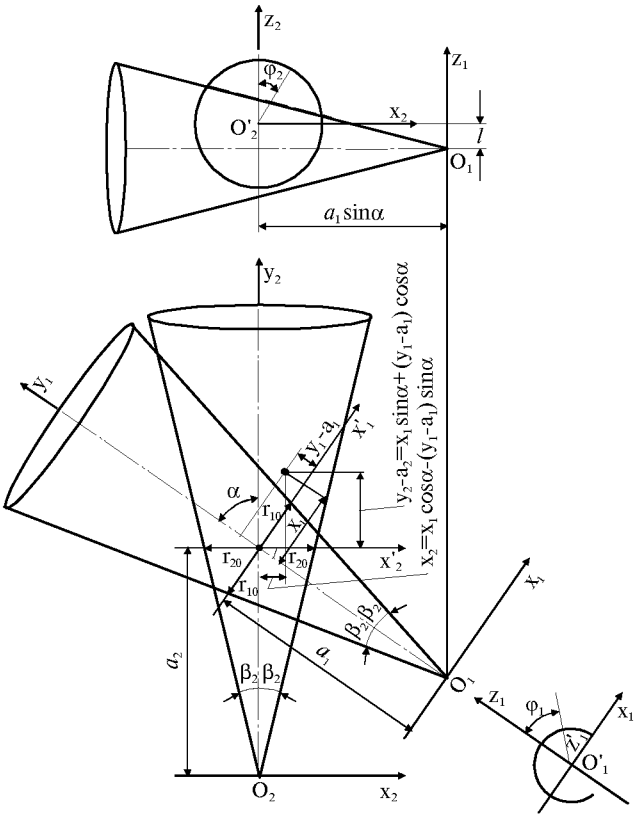


Рис.19.4. Пересечение двух круглых конусов

Обозначив в формуле (19.8) коэффициент при l_1^2 через A, при l_1 через B, свободный член - C, получим значение

$$l_1 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}\ . \tag{19.9}$$

В зависимости от значений угла φ_1 получают различное значение l_1.

В табл.19.1 приведены формулы подсчета коэффициентов A, B, C для пересечения двух конусов, конуса и цилиндра, двух цилиндров: даны как общие случаи пересечения, так и частные при $e = 0$, $\alpha = 0$, $\alpha_1 = \pi / 2$.

После определения значения l_1 вычисляют:

$$x^2 = l_1(\sin\varphi_1\sin\beta_1\cos\alpha - \cos\beta_1\sin\alpha) + a_1\sin\alpha\ . \tag{19.10}$$

$$y^2 = l_1(\sin\varphi_1\sin\beta_1\sin\alpha + \cos\beta_1\cos\alpha) - a_1\cos\alpha + a_2\ . \tag{19.11}$$

$$z_2 = l_1\cos\varphi_1\sin\beta_1\ . \tag{19.12}$$

$$l_2 = \frac{y_2}{\cos\beta_2} \text{ или } l_2 = \frac{x_2}{\sin\varphi_2\sin\beta_2}\ . \tag{19.13}$$

Таблица 19.1

Фигуры пересечения	Случай	Значение коэффициента		
		A	B	C
1	2	3	4	5
Два конуса	Общий	$\frac{\cos^2\beta_2 - (\sin\varphi_1 \sin\alpha \sin\beta_1 + \cos\alpha\cos\beta_1)^2}{\cos^2\beta_2}$	$2[\sin\varphi_1 \sin\alpha \sin\beta_1 \left(\frac{\alpha_1 \cos\alpha}{\cos^2\beta_2} - \right.$ $\left. - \alpha_2 \operatorname{tg}^2\beta_2\right) - \cos\varphi_1 e \sin\beta_1 -$ $- \alpha_1 \cos\beta_1 \left(1 - \frac{\cos^2\alpha}{\cos^2\beta_2}\right) -$ $- \alpha_2 \cos\alpha \cos\beta_1 \operatorname{tg}^2\beta_2]$	$\alpha_1^2 \sin^2\alpha + e^2 -$ $- (\alpha_1 \cos\alpha - \alpha_2)^2 \times \operatorname{tg}^2\beta_2$
	Общий, $e = 0$	То же	$2\left[\sin\varphi_1 \sin\alpha \sin\beta_1 \left(\frac{\alpha_1 \cos\alpha}{\cos^2\beta_2} - \right.\right.$ $\left.\left. - \alpha_2 \operatorname{tg}^2\beta_2\right) - \alpha_1 \cos\beta_1 \left(1 - \frac{\cos^2\alpha}{\cos^2\beta_2}\right) -\right.$ $\left. - \alpha_2 \cos\alpha \cos\beta_1 \operatorname{tg}^2\beta_2\right]$	$\alpha_1^2 \sin^2\alpha - (\alpha_1 \cos\alpha -$ $- a_2)^2 \times \operatorname{tg}^2\beta_2$
	Общий, $\alpha = 0$	$\frac{\cos^2\beta_2 - \cos^2\beta_1}{\cos^2\beta_2} = 1 - \frac{\cos^2\beta_1}{\cos^2\beta_2}$	$2(-\cos\varphi_1 e \sin\beta_1 + \alpha_1 \cos\beta_1 \operatorname{tg}^2\beta_2 -$ $- \alpha_2 \cos\beta_1 \operatorname{tg}^2\beta_2)$	$e^2 - (\alpha_1 - \alpha_2)^2 \operatorname{tg}^2\beta_2$
	Общий, $\alpha = \pi/2$	$\frac{\cos^2\beta_2 - \sin^2\varphi_1 \sin^2\beta_1}{\cos^2\beta_2}$	$-2(\sin\varphi_1 \alpha_2 \sin\beta_1 \operatorname{tg}^2\beta_2 +$ $+ \cos\varphi_1 e \sin\beta_1 + \alpha_1 \cos\beta_1)$	$\alpha_1^2 + e^2 - \alpha_2^2 \operatorname{tg}^2\beta_2$

1	2	3	4	5
Два конуса	$e = 0,\ \alpha = 0$	$\frac{\cos^2\beta_2 - \cos^2\beta_1}{\cos^2\beta_2} = 1 - \frac{\cos^2\beta_1}{\cos^2\beta_2}$	$2(\alpha_1 \cos\beta_1 \operatorname{tg}^2\beta_2 - \alpha_2 \cos\beta_1 \operatorname{tg}\beta_2) =$ $= 2\cos\beta_1 \operatorname{tg}^2\beta_2(\alpha_1 - \alpha_2)$	$-(\alpha_1 - \alpha_2)^2 \operatorname{tg}^2\beta_2$
	$e = 0,\ \alpha = 0$	$\sin^2\beta_1$	0	$-r_{20}^2$
	$e = 0,\ \alpha = \pi/2$	$1 - \sin^2\varphi_1 \sin^2\beta_1$	$-2\alpha_1 \cos\beta_1$	$a_1^2 - r_{20}^2$
	$e = 0$, касательная общая	$1 - (\sin\varphi_1 \sin\alpha \sin\beta_1 + \cos\alpha \cos\beta_1)^2$	$2\alpha_1 \sin\alpha(\sin\varphi_1 \cos\alpha \sin\beta_1 - \sin\alpha\cos\beta_1)$	$\frac{\alpha_1^2 \sin^4\alpha}{\sin^2\alpha + \operatorname{tg}^2\beta_1}$
	$e = 0,\ \alpha = \pi/2$ касательная общая	$1 - \sin^2\varphi_1 \sin^2\beta_1$	$-2\alpha_1 \cos\beta_1$	$\frac{\alpha_1^2}{1 + \operatorname{tg}^2\beta_1} = \alpha_1^2 \cos^2\beta_1$
Конус и цилиндр	Общий	—	$y_1 - z_1 =$ $= \frac{r_{10}\sin\varphi_1 \cos\alpha \pm \sqrt{r_{20}^2 - (r_{10}\cos\varphi_1 - e)^2}}{\sin\alpha}$	—
	Общий, $e = 0$	—	$y_1 - z_1 =$ $= \frac{r_{10}\sin\varphi_1 \cos\alpha \pm \sqrt{r_{20}^2 - r_{10}^2\cos^2\varphi_1}}{\sin\alpha}$	—
	Общий, $\alpha = 0$	—	$y_1 = l_1 = \infty$	—
	Общий, $\alpha = \pi/2$	—	$y_1 = l_1 = \pm\sqrt{r_{20}^2 - (r_{10}\cos\varphi_1 - e)^2}$	—
	$e = 0,\ \alpha = 0$	—	$y_1 = l_1 = \infty$	—

1	2	3	4	5
Конус и цилиндр	$e = 0$, $\alpha = \pi / 2$	$\dfrac{\cos^2\beta_2 - \sin^2\varphi_1 \sin^2\beta_1}{\cos^2\beta_2}$	$-2\left(\sin\varphi_1\alpha_2 \sin\beta_1 \operatorname{tg}^2\beta + \alpha_1\cos\beta_1\right)$	$\alpha_1 - \alpha_2^2 \operatorname{tg}^2\beta_2$
	$e = 0$; касательная общая	—	—	—
	$e = 0$, $\alpha = \pi / 2$ касательная общая	—	—	—
Два цилиндра	Общий	$1 - \left(\sin\varphi_1 \sin\alpha \sin\beta_1 + \cos\alpha \sin\beta_1\right)^2$	$2\left(\sin\varphi_1\alpha_1 \sin\alpha\cos\alpha\sin\beta_1 - \right.$ $\left. - \cos\varphi_1 e \sin\beta_1 - \alpha_1 \sin^2\alpha\cos\beta_1\right)$	$\alpha_1^2 \sin^2\alpha + e^2 - r_{20}^2$
	Общий, $e = 0$	То же	$2\left(\sin\varphi_1\alpha_1 \sin\alpha\cos\alpha\sin\beta_1 - \alpha_1 \sin^2\alpha\cos\beta_1\right) =$ $= 2\alpha_1 \sin\alpha\left(\sin\varphi_1 \cos\alpha \sin\beta_1 - \sin\alpha\cos\beta_1\right)$	$\alpha_1 \sin^2\alpha - r_{20}^2$
	Общий, $\alpha = 0$	$\sin^2\beta_1$	$2\cos\varphi_1 e \sin\beta_1$	$e^2 - r_{20}^2$
	Общий, $\alpha = \pi / 2$	$1 - \sin^2\varphi_1 \sin^2\beta_1$	$-2\left(\cos\varphi_1 e \sin\beta_1 + \alpha_1\cos\beta_1\right)$	$\alpha_1^2 + e^2 - r_{20}^2$
	$e = 0$, $\alpha = \pi / 2$	—	$y_1 = l_1 = \pm\sqrt{r_{20}^2 - r_{10}^2 \cos^2\varphi_1}$	—
	$e = 0$, касательная общая	—	$r_{10} = r_{20} = r_1 y_1 = l_1 = \dfrac{r \sin\varphi_1}{\sin\alpha}(\cos\alpha \pm 1)$	—
	$e = 0$, $\alpha = \pi / 2$ касательная общая	—	$r_{10} = r_{20} = r$ $y_1 = l_1 = \pm r \sin\varphi_1$	—

Угол φ_2, соответствующий углу φ_1, определяется по формуле

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg}\frac{x_2}{z_2}. \qquad (19.14)$$

Частным случаем пересечения является пересечение конусов и цилиндров, описанных вокруг общей шаровой поверхности. В данном случае поверхности пересекаются по эллипсам, расположенным в плоскостях *1-2*, *3-4*, перпендикулярных к плоскости, которая проходит через оси тел вращения (рис.19.5 - 19.7).

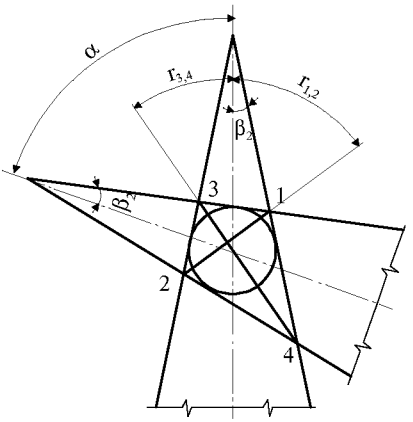


Рис.19.5. Пересечение двух конусов

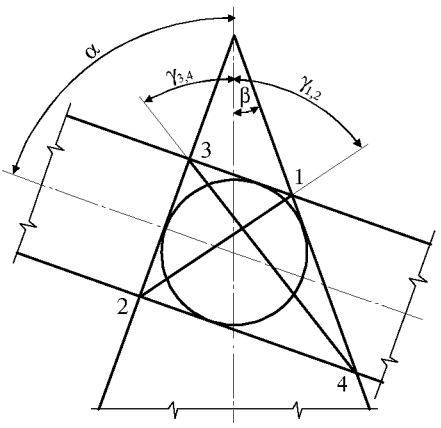


Рис.19.6. Пересечение конуса с цилиндром

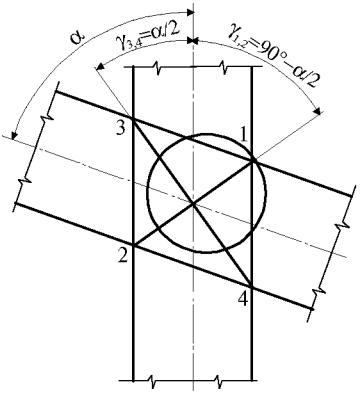


Рис.19.7. Пересечение двух цилиндров

Построение разверток поверхностей таких тел сводится к построению разверток поверхностей при сечении их плоскостями с наклоном γ_1. Угол γ определяется по формулам в зависимости от угла α пересечения осей поверхностей.

Для пересечения двух конусов (рис.19.5):

$$\operatorname{tg}\gamma_{1,2} = \frac{[\sin(\alpha+\beta_2)-\sin\beta_1]\sin(\alpha-\beta_2+\beta_1)+}{[\cos\beta_1-\cos(\alpha+\beta_2)]\sin(\alpha-\beta_2+\beta_1)+} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+[\sin(\alpha-\beta_2)+\sin\beta_1]\sin(\alpha+\beta_2-\beta_1)}{+[\cos\beta_1-\cos(\alpha-\beta_2)]\sin(\alpha+\beta_2-\beta_1)}; \qquad (19.15)$$

$$\operatorname{tg}\gamma_{3,4} = \frac{[\sin\beta_1-\sin(\alpha+\beta_2)]\sin(\alpha-\beta_1-\beta_2)-}{[\cos(\alpha+\beta_2)+\cos\beta_1]\sin(\alpha-\beta_1-\beta_2)+} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{-[\sin(\alpha-\beta_2)+\sin\beta_1]\sin(\alpha+\beta_2+\beta_1)}{+[\cos(\alpha-\beta_2)+\cos\beta_1]\sin(\alpha+\beta_2+\beta_1)}. \qquad (19.16)$$

Для пересечения конуса с цилиндром (рис.19.6):

$$\operatorname{tg}\gamma_{1,2} = \frac{1+\cos\alpha\cos\beta}{\sin\alpha\cos\beta};$$

$$\operatorname{tg}\gamma_{3,4} = \frac{1-\cos\alpha\cos\beta}{\sin\alpha\cos\beta}. \qquad (19.17)$$

Пересечение двух цилиндров одного диаметра показано выше (рис.19.7).

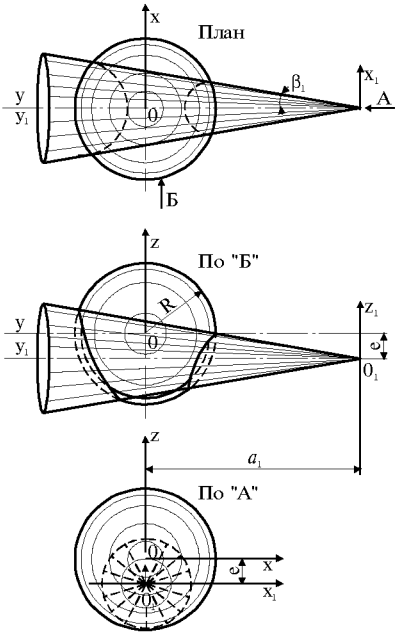


Рис.19.8. Пересечение конуса с шаром

Поверхности тел вращения с прямолинейными образующими, описанные вокруг общей шаровой поверхности, пересекаются по эллипсам, расположенным в плоскостях, перпендикулярных к плоскости, которая проходит через оси тел вращения (линии *1-2* и *3-4*).

Построение разверток поверхностей таких тел сводится к построению разверток поверхностей тех же тел, усеченных наклонными плоскостями. Значение углов наклона секущих плоскостей по отношению к осям тел вращения $\gamma_{1,2}$ и $\gamma_{3,4}$ даны около рисунков.

В случае пересечения конуса с шаром для упрощения рассматривается, что плоскости проходят через ось конуса и центр шара (рис.19.8).

Результаты решения системы уравнений формулы конуса и формулы поверхности шара приведены в табл.19.2.

Таблица 19.2

Фигуры, пересечения	Случай	Значение $l_1 = y_1$
Конус и шар	Общий	$\left(e\cos\varphi_1\sin\beta_1 + a_1\cos\beta_1\right) \pm$ $\pm\sqrt{\left(e\cos\varphi_1\sin\beta_1 + a_1\cos\beta_1\right)^2 - \left(e^2 + a_1^2 - R^2\right)}$
	Общий, e = 0	$a_1\cos\beta_1 \pm \sqrt{R^2 - a_1^2\sin^2\beta_1}$
	e = 0; касательная общая	$a_1\cos\beta_1;\ \left(R = a_1\sin\beta_1\right)$
Цилиндр и шар	Общий	$\pm\sqrt{R^2 + 2r_{10}e\cos\varphi_1 - e^2 - r_{10}^2}$
	Общий, e = 0	$\pm\sqrt{R^2 - r_{10}^2}$
	e = 0; касательная общая	0

19.3. Неразвертывающиеся поверхности

19.3.1. Сферические поверхности. Из неразвертывающихся поверхностей в практике наиболее часто встречаются сферические и торовые. Существует несколько приближенных способов их раскроя. Применение того или иного способа должно учитывать технологические и производственные возможности при изготовлении.

Наиболее часто применяемым способом раскроя (развертки) сферической поверхности является метод сечения ее меридиональными плоскостями, проходящими через одну общую ось вращения с шагом φ° на $2n$ равных частей (рис.19.9).

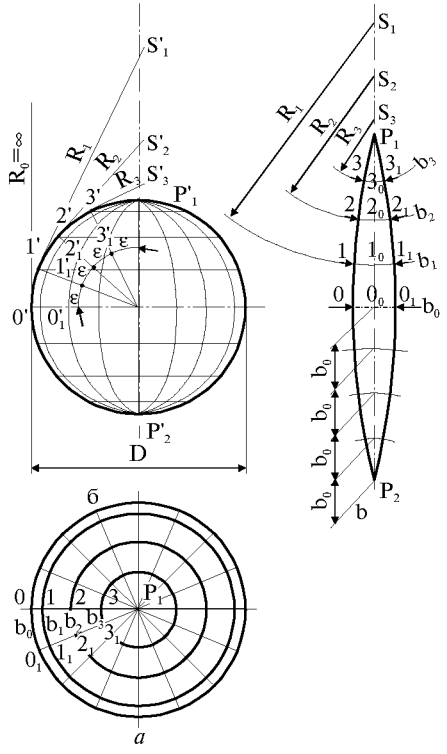


Рис.19.9. Развертка шаровой поверхности

В меридиональном направлении сечение делится на то же число равных частей. Через точки деления 0, 1, 2, 3...$n/2$ описываются дуги радиусом R_1, R_2, R_3...$R_{n/2}$, центры которых лежат на вертикальной прямой. На полученных дугах симметрично откладываются дуги $b_0 = 00_1$, $b_1 = 11_1$, $b_2 = 22_1$... $b_{n/2} = n/2 \cdot n/2$.

Полученные точки соединяются плавной кривой

$$b_k = (\pi / n)(D / 2)\sin k\varphi;$$

$$R_k = R \operatorname{tg} k\varphi . \qquad (19.19)$$

Практически сферические сосуды изготовляют с двумя, расположенными на полюсах сферическими сегментами с диаметром основания D_1, определяемым технологическими возможностями производства, требованиями размещения сварных швов примыкающих меридиональных элементов и др. Для сферических поверхностей большого диаметра меридиональные элементы могут делиться на две части и более (рис.19.10). В работе [2] даны практические методы построения разверток сферических поверхностей, приведены формулы их построения и таблицы, значительно упрощающие вычисления. Аналогичным способом строится развертка поверхности вращения, меридиональным сечением которой является овал или какая либо друга кривая (рис.19.11).

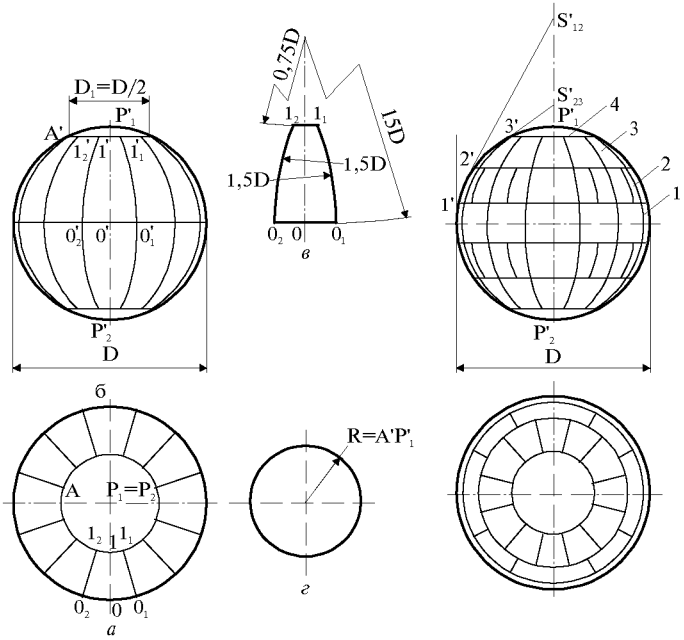


Рис.19.10. Развертка шаровой поверхности

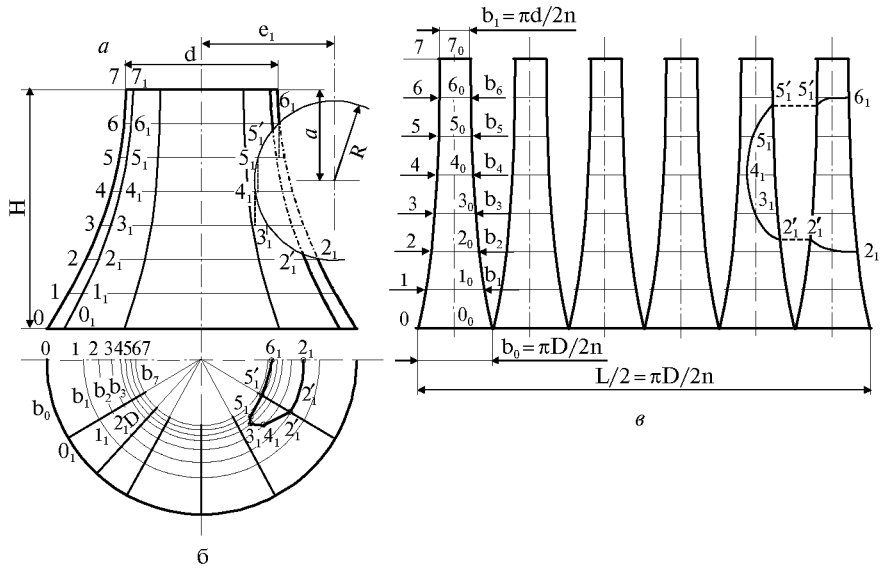


Рис.19.11. Развертка тела вращения

Существуют и другие методы развертки сферических поверхностей, например развертка сферической поверхности, составленной из поверхностей нескольких конусов и цилиндра. Горизонтальными плоскостями сферическая поверхность сечется на некоторое количество поясов, которые могут быть представлены поверхностями усеченных конусов. Получаемые шаровые сегменты можно заменить поверхностями конусов *2-4*, а экваториальный пояс можно представить в виде поверхности цилиндра *1* (рис. 19.12).

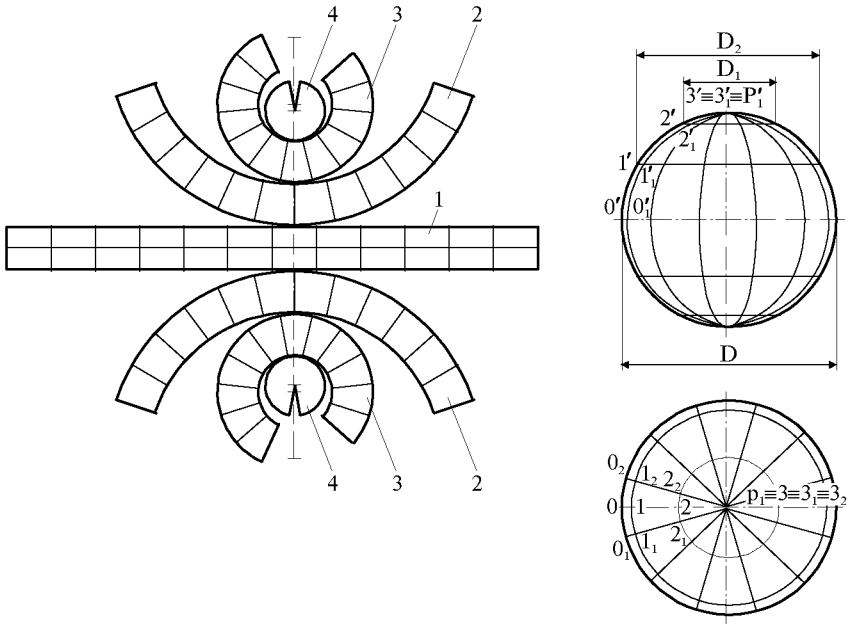


Рис.19.12. Развертка шаровой поверхности

По другому способу сферическая поверхность сечется плоскостями, находящимися в плоскостях, проходящих через ребра куба, вписанного в сферу. В этом случае в основе раскроя лежат шесть одинаковых квадратов, которые в свою очередь, могут быть изготовлены из нескольких одинаковых листов (рис.19.13).

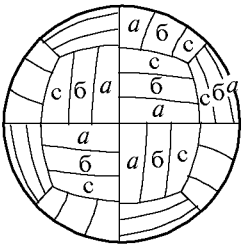


Рис.19.13. Развертка шаровой поверхности

19.3.2. Торовые поверхности. Развертки торовых поверхностей, как и сферических, приближенные. Для строительных металлоконструкций тор выполняют, как правило, из n участков цилиндрических поверхностей, сваренных между собой. Чем большее число n, тем правильней торовая поверхность. Обычно число n задается технологическими условиями, либо требованиями сварки. Развертка отдельных участков такой торовой поверхности не представляет сложности, так как является разверткой цилиндрической поверхности, усеченной наклонной плоскостью.

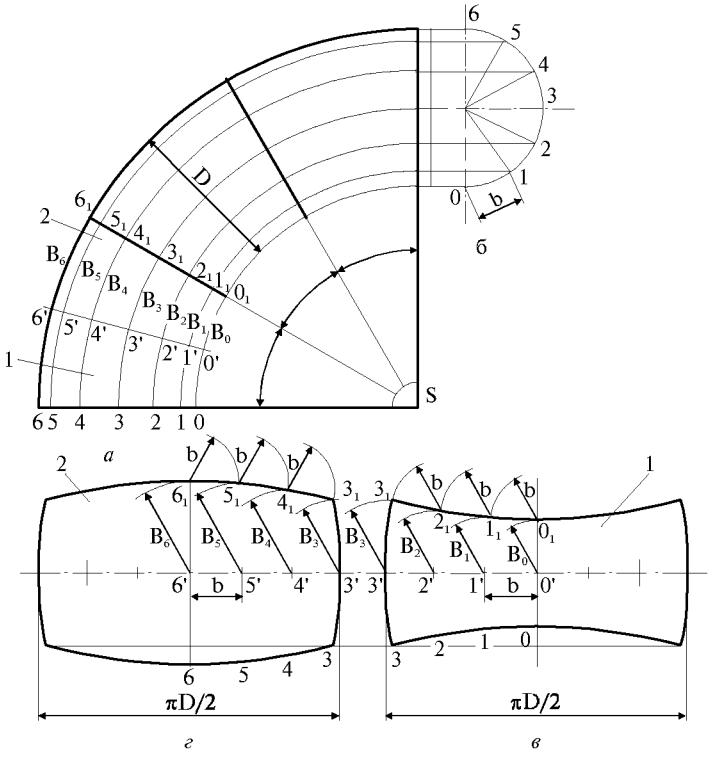


Рис.19.14. Развертка тора

Более точное построение развертки участка тора выполняется следующим образом: поперечное сечение делится на равное число частей (рис.19.14). Через точки деления проводятся окружности из центра S. При этом предполагается, что каждый сектор тора состоит из двух частей - *1* и *2*, а линия деления проходит по средней окружности (через точку 3). Построение показано на рис.19.14. Размер $b = \pi D / 2$ или $b = r\alpha$.

Для части *1*

$$B_{i1} = (R_{\text{ср}} - a_i)\gamma / 2 . \qquad (19.20)$$

Для части *2*

$$B_{i2} = (R_{\text{ср}} + a_i)\gamma / 2 , \qquad (19.21)$$

где

$$a_i = r \sin \alpha_i . \qquad (19.22)$$

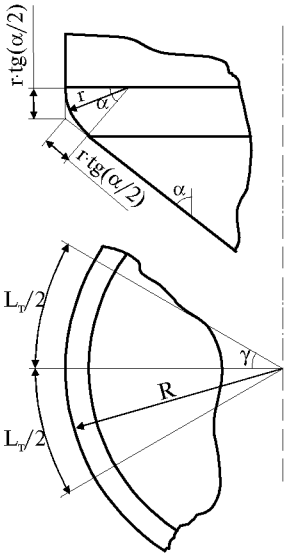


Рис.19.15. Торовый переход

На практике часто применяются торовые поверхности для обеспечения плавного перехода с цилиндрической поверхности к конической, между двумя коническими поверхностями, между цилиндрической и конусной поверхностями и плоскостью. На рис.19.15 показан торовый переход от цилиндрической к конусной поверхности. Приближенно торовый переход может быть развернут, как показано на рис.19.16. Значения размеров, указанных на рис.19.16, вычисляются по формулам:

$$R_p = \frac{4(R-r)\left(1-\cos\frac{\alpha}{4}\right)+r\alpha\sin\frac{\alpha}{2}}{4\sin\frac{\alpha}{2}}; \qquad (19.23)$$

$$B = r\alpha; \qquad (19.24)$$

$$A = R_p \sin\gamma_p; \qquad (19.25)$$

$$\gamma_p = \gamma\sin\frac{\alpha}{2}; \qquad (19.26)$$

$$H = R_p(1-\cos\gamma_p); \qquad (19.27)$$

$$L_T = 2R\gamma; \qquad (19.28)$$

$$a = (R_p - B)\sin\gamma_p; \qquad (19.29)$$

$$h = (R_p - B)(1-\cos\gamma_p); \qquad (19.30)$$

$$\left.\begin{aligned} C_1 &= R_p\gamma_p - R\gamma = r\gamma\left(\frac{\cos\frac{\alpha}{4}}{\cos\frac{\alpha}{2}}-1\right)\\ C_2 &= \left[R - r\left(1-\cos\frac{\alpha}{2}\right)\right]\gamma - \left(R_p - \frac{B}{2}\right)\gamma_p = r\gamma\cos\frac{\alpha}{2}\left(1-\cos\frac{\alpha}{4}\right)\\ C_3 &= (R_p - B)\gamma_p - [R - r(1-\cos\alpha)]\gamma = r\gamma\cos\alpha\left(\frac{\cos\frac{\alpha}{4}}{\cos\frac{\alpha}{2}}-1\right)\end{aligned}\right\} \qquad (19.31)$$

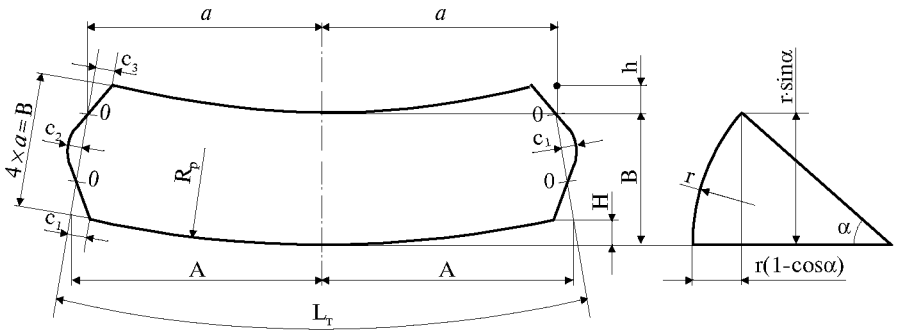


Рис.19.16. Развертка торового перехода

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лессиг Е.Н., Лилеев А.Ф., Соколов А.Г.** Листовые металлические конструкции. - М.: Стройиздат, 1970.
2. **Васильченко В.Т., Рутман А.Н., Лукьяненко Е.П.** Конструирование и изготовление рабочих чертежей строительных металлоконструкций. - Киев, Будівельник, 1977.
3. **Бунджулов В.С., Димовски Н.И., Петров Д.Н., Попов П.Г.** Справочник по разверткам листовых конструкций. - Киев: Техника, 1984.
4. **Залевский М.А.** Расчет разверток листовых металлических конструкций с применением микроЭВМ. - М.: Металлургия, 1991.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (канд.техн.наук *В.В.Кузнецов*) 3
Введение (канд.техн.наук *В.В.Кузнецов*) 5

Раздел I. Стали, профили, соединения

Глава 1. Стали для сварных строительных металлоконструкций
(д-р техн.наук *Л.И.Гладштейн,* кандидаты техн.наук *Е.М.Баско, М.Р.Урицкий, Д.Н.Стрелецкий*) 11
1.1. Требования к свойствам строительных сталей 12
1.1.1. Прочность 12
1.1.2. Свариваемость 12
1.1.3. Сопротивление хрупкому разрушению 15
1.1.4. Сопротивление вязкому разрушению 21
1.1.5. Технико-экономическая эффективность 23
1.2. Классификация сталей 26
1.3. Сталь углеродистая обыкновенного качества 32
1.4. Низколегированные стали повышенной прочности 40
1.5. Высокопрочные стали с карбонитридным упрочнением с феррито-перлитной микроструктурой 47
1.6. Закаленно-отпущенные экономно-легированные стали высокой прочности 51
1.7. Стали после контролируемой прокатки и термического упрочнения 55
1.7.1. Стали после контролируемой прокатки 55
1.7.2. Стали, термически упрочненные, с использованием специального нагрева 58
1.7.3. Сталь, термически упрочненная в потоке стана, с использованием тепла прокатного нагрева 59
1.8. Стали специального назначения 64
1.8.1. Сталь с гарантированными механическими свойствами в направлении толщины проката 64
1.8.2. Атмосферостойкие стали 69
1.8.3. Хладостойкие стали для конструкций, эксплуатирующихся при низкой (криогенной) температуре 72
1.9. Статистическое распределение характеристик прочности, нормативные и расчетные сопротивления 75
1.9.1. Статистическое распределение характеристик прочности 75
1.9.2. Параметры статистических распределений характеристик прочности 80
1.9.3. Нормативные и расчетные сопротивления 83
1.10. Выбор стали для строительных стальных конструкций 84
Список литературы 87

Глава 2. Сортаменты профилей, листового проката, труб и стальных канатов
(кандидаты техн.наук *Я.А.Каплун, Б.В.Остроумов,* инж. *М.М.Кравцов*) 89
2.1. Классификация металлопроката 89
2.2. Сортаменты 89
2.3. Критерии оценки экономичности профилей 89
2.4. Методика оценки экономичности профилей 91
2.5. Классификация профилей по способам изготовления 92
2.6. Общие правила использования профилей 93
2.7. Сортаменты горячекатаных профилей и листового горячекатаного и холоднокатаного проката общего назначения 94
2.8. Сортаменты гнутых и гнутосварных профилей общего назначения 118
2.9. Сортаменты горячекатаных профилей специального назначения 136
2.10. Сортаменты гофрированных профилей (профилированных листов) 141
2.11. Сортамент электросварных труб 146

2.12. Стальные канаты ... 148
2.12.1. Канатная проволока ... 148
2.12.2. Классификация канатов ... 148
2.12.3. Рекомендации по выбору типов канатов и их параметров ... 149
Перечень Государственных стандартов на стальные профили, листовой прокат и трубы ... 155
Перечень технических условий на металлопродукцию ... 156
Перечень стандартов и технических условий на стальные канаты, рекомендуемые для применения в металлических конструкциях ... 157
Список литературы ... 158

Глава 3. Соединения
(д-р техн.наук *В.В.Каленов*, кандидаты техн.наук *В.Г.Кравченко, А.Б.Павлов*, инженеры *В.П.Велихов, Ю.В.Корнеев*) ... 158
3.1. Виды соединений ... 158
3.2. Сварные соединения ... 160
3.2.1. Классификация и требования к сварным швам и соединениям ... 160
3.2.2. Обозначения швов сварных соединений ... 168
3.2.3. Рекомендации по выбору способов сварки и сварочных материалов ... 171
3.2.4. Расчет сварных соединений металлоконструкций ... 172
3.3. Болтовые соединения ... 175
3.3.1. Общие положения ... 175
3.3.2. Конструирование болтовых соединений ... 184
3.3.3. Расчет болтовых соединений ... 189
3.3.4. Основные требования к изготовлению и монтажной сборке конструкций с болтовыми соединениями ... 201
3.4. Фундаментные болты ... 204
3.4.1. Классификация ... 204
3.4.2. Марки стали и расчетные сопротивления ... 204
Список литературы ... 206

Раздел II. Расчет металлических конструкций

Глава 4. Общие требования расчета
(д-ра техн.наук *И.Д.Грудев, В.И.Моисеев*, кандидаты техн.наук *Х.М.Ханухов, А.И.Конаков*) ... 207
4.1. Основные положения ... 207
4.2. Расчет стержневых элементов конструкций ... 207
4.3. Центрально-растянутые элементы ... 207
4.4. Центрально-сжатые элементы ... 208
4.5. Сжато-изгибаемые элементы ... 208
4.6. Изгибаемые элементы ... 214
4.7. Геометрические характеристики элементов стальных конструкций ... 216
4.7.1. Расчетные длины элементов ... 216
4.7.2. Предельные гибкости и прогибы элементов конструкций ... 219
4.8. Проверка устойчивости стенок и поясных листов изгибаемых и сжатых элементов ... 220
4.8.1. Общие положения ... 220
4.8.2. Стенки балок ... 224
4.8.3. Стенки центрально- и внецентренно-сжатых элементов ... 225
4.8.4. Поясные листы (полки) центрально-, внецентренно-сжатых и изгибаемых элементов ... 226
4.9. Циклическая прочность сварных конструкций ... 227
4.9.1. Расчет малоцикловой прочности сварных конструкций на стадии образования трещины ... 227
4.9.2. Расчет циклической прочности сварных металлоконструкций на стадии распространения усталостной трещины ... 234
4.9.3. Пример расчета циклической прочности стыкового сварного соединения ... 241
Список основных обозначений ... 243
Список литературы ... 245

Глава 5. Расчет конструкций на динамические воздействия
(д-р техн.наук *В.А.Котляревский*, кандидаты техн.наук *А.А.Петров, В.И.Морозов*) ... 247
5.1. Динамические нагрузки и воздействия ... 247
5.1.1. Обзор динамических нагрузок на конструкции ... 247
5.1.2. Эксплуатационные нагрузки ... 248
5.1.3. Пульсационные ветровые нагрузки и их статистические характеристики ... 250
5.1.4. Сейсмические нагрузки и макросейсмические характеристики землетрясений ... 252
5.1.5. Импульсные воздействия при взрывах ... 254
5.1.6. Взрывные нагрузки при авариях на объектах химической и нефтехимической промышленности ... 259
5.2. Механические характеристики металлических материалов при динамических воздействиях ... 262
5.2.1. Экспериментальные методы определения динамических характеристик материалов ... 262
5.2.2. Динамический предел текучести и запаздывание текучести конструкционных сталей ... 264
5.2.3. Модели динамического поведения металлов в прочностных расчетах ... 265
5.3. Расчет конструкций. Общие принципы ... 269
5.3.1. Методы расчета по упругой стадии ... 269
5.3.2. Исчерпание упругого ресурса конструкций при интенсивных нагрузках ... 275
5.3.3. Упругопластический расчет конструкций ... 277
5.4. Расчет на пульсационные воздействия ветра ... 282
5.4.1. Динамический расчет сооружений на ветровые нагрузки ... 282
5.4.2. Определение реакции высотных и протяженных сооружений на пульсационные воздействия ветра ... 284
5.4.3. Проверка сооружений на ветровой резонанс ... 287
5.5. Расчет на сейсмические воздействия ... 288
5.5.1. Методы оценки сейсмической реакции сооружений ... 288
5.5.2. Статистическое моделирование сейсмических воздействий на здания и сооружения ... 290
5.5.3. Вероятностный метод расчета протяженных металлоконструкций ... 294
5.5.4. Расчет резервуаров с жидким продуктом ... 299
5.6. Расчет сооружений на действие аварийных нагрузок ... 301
Список литературы ... 301

РАЗДЕЛ III. УЧЕТ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРЕБОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТИРОВКИ, МОНТАЖА И ЭКОНОМИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Глава 6. Требования к конструкциям при изготовлении их на заводе
(канд.техн.наук *О.И.Пешковский*) ... 303
6.1. Общие понятия и условия технологичности ... 303
6.2. Показатели технологичности стальных конструкций ... 305
6.3. Методика определения трудоемкости изготовления конструкций ... 305
6.4. Дополнительные показатели технологичности стальных конструкций ... 311
6.5. Технологические возможности заводов строительных стальных конструкций ... 313
6.6. Обработка деталей стальных конструкций ... 313
6.6.1. Кислородная резка стали ... 313
6.6.2. Особенности конструирования деталей, изготовляемых холодной гибкой ... 314
6.7. Технологические возможности заводской сборки и сварки элементов стальных конструкций ... 317
6.7.1. Влияние конструктивной формы на технологию сборки отправочных элементов ... 317
6.7.2. Технологичность сварки конструкций ... 317
6.8. Конструирование элементов с фрезерованными торцами ... 318
6.9. Назначение общих и контрольных сборок ... 318
6.10. Требования к проектам конструкций, изготовляемых на автоматизированных поточных линиях ... 319
6.11. Отклонения и допуски в размерах стальных конструкций ... 320

Приложения ... 322
Список литературы ... 326

Глава 7. Требования к конструкциям при их транспортировке (инж. *Г.Е.Гофштейн*) ... 326
7.1. Перевозка конструкций железнодорожным транспортом ... 327
7.1.1. Габариты приближения строений и габариты подвижного состава. Габариты погрузки и степени негабаритности ... 327
7.1.2. Определение расчетной негабаритности груза на кривой железнодорожного пути ... 334
7.1.3. Рекомендации по членению стальных конструкций на отправочные элементы ... 339
7.2. Перевозка конструкций автомобильным транспортом ... 339
7.3. Перевозка конструкций морским транспортом ... 347
7.4. Перевозка конструкций речным транспортом ... 350
7.5. Перевозка конструкций воздушным транспортом ... 350
Список литературы ... 351

Глава 8. Требования к конструкциям при их монтаже (инженеры *В.Н.Иванко, А.Г.Петров, Р.И.Барон*) ... 352
8.1. Основные методы монтажных работ ... 352
8.2. Монтажное оборудование и его характеристики ... 361
8.3. Требования к методам монтажа и конструкциям ... 372
8.3.1. Требования к методам производства работ ... 372
8.3.2. Монтажные требования к конструкциям ... 374
Список литературы ... 377

Глава 9. Рекомендации по определению технико-экономических показателей металлических конструкций при проектировании (д-р техн.наук *И.С.Ковнер*) ... 378
9.1. Назначение технико-экономических показателей ... 378
9.2. Абсолютные технико-экономические показатели ... 379
9.2.1. Масса металлоконструкций ... 380
9.2.2. Затраты на материалы при изготовлении ... 380
9.2.3. Трудоемкость заводского изготовления ... 381
9.2.4. Технологическая себестоимость изготовления ... 381
9.2.5. Заводская себестоимость (полная себестоимость изготовления) ... 382
9.2.6. Цена конструкции. Прибыль завода-изготовителя ... 382
9.2.7. Транспортные затраты ... 382
9.2.8. Трудоемкость монтажа ... 382
9.2.9. Технологическая себестоимость монтажа (прямые затраты на монтаж без цены конструкции) ... 383
9.2.10. Себестоимость монтажа ... 383
9.2.11. Себестоимость в деле ... 383
9.2.12. Приведенные затраты ... 383
9.2.13. Сметная стоимость строительно-монтажных работ ... 384
9.2.14. Рекомендуемые показатели ... 384
9.3. Нормативная база расчета технико-экономических показателей ... 384
9.4. Методы расчета технико-экономических показателей ... 385
9.5. Калькуляционный метод расчета технико-экономических показателей металлоконструкций каркасов промышленных зданий ... 387
9.6. Аналитические (укрупненные) методы расчета технико-экономических показателей ... 388
Список литературы ... 388

Раздел IV. Защита металлических конструкций от коррозии

Глава 10. Классификация агрессивных сред и коррозионная стойкость материалов (д-р хим.наук *А.И.Голубев*) ... 389
10.1. Классификация агрессивных сред ... 389
10.2. Коррозионная стойкость строительных сталей ... 393
10.3. Влияние напряжений на коррозию стальных строительных конструкций ... 394
10.4. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов ... 396

Глава 11. Требования к конструктивной форме для зданий и сооружений в агрессивных средах и рекомендации по предотвращению контактной коррозии (д-р хим.наук *А.И.Голубев,* канд.техн.наук *И.А.Бойко*) 397

Глава 12. Защита металлических конструкций от коррозии
(д-р хим.наук *А.И.Голубев,* кандидаты техн.наук *И.А.Бойко, Г.В.Оносов*) 401
12.1. Защитные покрытия 401
12.2. Подготовка поверхности стальных конструкций перед нанесением защитных покрытий 401
12.3. Защита стальных строительных конструкций от коррозии металлическими покрытиями 403
12.3.1. Горячее цинкование и алюминирование 403
12.3.2. Металлизационные покрытия 403
12.3.3. Гальванические покрытия 404
12.4. Защита от коррозии стальных и алюминиевых конструкций лакокрасочными материалами 404
12.5. Защита стальных конструкций комбинированными металлизационно-лакокрасочными покрытиями 406
12.6. Электрохимическая защита стальных конструкций 406
12.7. Проектирование защиты стальных конструкций от коррозии 406
12.8. Защитно-декоративная отделка алюминия 408
Список литературы 411

Раздел V. Предварительное напряжение элементов и конструкций

Глава 13. Предварительно напряженные элементы и конструкции
(д-ра техн.наук *В.В.Бирюлев, А.Б.Пуховский,* канд.техн.наук *В.М.Фридкин*) 412
13.1. Понятие о предварительном напряжении конструкций и их классификация 412
13.2. Предварительно напряженные конструкции с высокопрочными элементами 418
13.2.1. Общие положения 418
13.2.2. Балки с высокопрочными затяжками 418
13.2.3. Фермы с предварительно напряженными затяжками 421
13.2.4. Кровельные панели, усиленные шпренгельными системами 423
13.2.5. Рамы, арки и своды с включением предварительно напряженных высокопрочных элементов 423
13.2.6. Висячие двухпоясные системы с натяжением стабилизирующих тросов и однопоясные системы с натяжением оттяжек 424
13.2.7. Многоэтажные здания с этажами на предварительно напряженных подвесках 425
13.2.8. Многоэтажные здания, усиленные предварительно напряженными высокопрочными элементами 425
13.2.9. Мачты и опоры на предварительно напряженных оттяжках 425
13.2.10. Предварительно напряженные шпренгельные мачты 425
13.2.11. Предварительно напряженные сетчатые башни 426
13.2.12. Листовые конструкции, предварительно напряженные навивкой высокопрочной проволокой или лентой 426
13.3. Предварительно напряженные конструкции без дополнительных высокопрочных элементов 427
13.3.1. Балки с предварительно изогнутыми элементами 427
13.3.2. Балки с предварительно вытянутыми стенкой или одним из поясов 428
13.3.3. Колонны с предварительно растянутыми стенками 430
13.3.4. Неразрезные конструкции со смещением уровня опор 430
13.3.5. Рамы и арки со смещением опор в горизонтальном направлении 433
13.3.6. Системы с введенными дополнительно опорами или шарнирами в процессе монтажа 433
13.3.7. Стягивание и расклинивание смежных сечений 433
13.2.8. Неразрезные, консольные, рамные конструкции с частичным пригрузом или разгрузкой 433
13.3.9. Плиты и оболочки с растянутыми тонкими листами 434
13.4. Использование предварительного напряжения при реконструкции 434

13.5. Общие положения по расчету предварительно напряженных конструкций 439
13.6. Методика расчета и оптимизации предварительно напряженных конструкций 441
13.6.1. Группа конструкций, у которых предварительное напряжение осуществляется с помощью натяжения высокопрочных элементов 441
13.6.2. Группа конструкций, у которых предварительное напряжение осуществляется без высокопрочных элементов 442
Список литературы 448

РАЗДЕЛ VI. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВЩИКА

Глава 14. Состав и общие правила оформления рабочих чертежей металлических конструкций марок КМ и КМД (инженеры *Г.А.Хохлова, В.Г.Дмитриев*) 450
14.1. Общие положения 450
14.2. Состав основного комплекта рабочих чертежей металлических конструкций марки КМ 451
14.3. Состав основного комплекта рабочих деталировочных чертежей металлических конструкций марки КМД 460
14.4. Общие правила оформления рабочих чертежей и текстовых документов 464
14.4.1. Форматы 464
14.4.2. Линии 464
14.4.3. Основные надписи 464
14.4.4. Шрифты 465
14.4.5. Масштабы 465
14.4.6. Условные изображения и обозначения 465
14.4.7. Сокращения слов 470
14.4.8. Изображения 471
14.4.9. Нанесение на чертежах размеров, надписей, технических требований и таблиц 473
14.4.10. Текстовые документы 477
14.4.11. Внесение изменений в рабочие чертежи марок КМ и КМД 477
Список литературы 477

Глава 15. Основы системы кодирования металлоконструкций (канд.техн.наук *Д.Н.Стрелецкий,* инж. *Т.П.Комарова*) 478
Список литературы 488

Глава 16. Вспомогательные материалы к расчету и подбору сечений элементов конструкций (канд.техн.наук *В.Ф.Беляев,* инж. *П.И.Суздалов*) 489
16.1. Расстояние между прокладками элементов составных сечений (табл.16.1) 489
16.2. Коэффициенты φ и φ_e для проверки на устойчивость центрально- и внецентренно-сжатых стержней 491
16.2.1. Пояснения к табл.16.2•16.4 491
16.2.2. Коэффициенты φ для проверки на устойчивость центрально-сжатых стержней (табл.16.2) 491
16.2.3. Коэффициенты φ_e для проверки на устойчивость внецентренно-сжатых сплошностенчатых стержней (табл.16.3) 494
16.2.4. Коэффициенты φ_e для проверки на устойчивость внецентренно-сжатых сквозных стержней (табл.16.4) 496
16.3. Коэффициент φ_b для проверки общей устойчивости изгибаемых элементов 498
16.3.1. Указания по определению коэффициентов с помощью табл.16.5•16.10 498
16.3.2. Вспомогательные коэффициенты φ'_1 для балок из нормальных двутавров по ГОСТ 26020-83* (табл.16.5) 499
16.3.3. Вспомогательные коэффициенты φ'_1 для балок из широкополочных двутавров по ГОСТ 26020-83* (табл.16.6) 503
16.3.4. Вспомогательные коэффициенты φ'_1 для балок из колонных двутавров по ГОСТ 26020-83* (табл.16.7) 505
16.3.5. Вспомогательные коэффициенты φ'_1 для балок из двутавров по ГОСТ 8239-89 (табл.16.8) 508

16.3.6. Вспомогательные коэффициенты φ'_1 для двутавров по ГОСТ 19425-74* (табл.16.9) ... 508
16.3.7. Вспомогательные коэффициенты φ'_1 для швеллеров по ГОСТ 8240-89 с уклоном внутренних граней полок (табл.16.10) ... 509

Глава 17. Нормали конструкций
(канд.техн.наук *В.Ф.Беляев,* инженеры *Л.К.Шувалов, П.И.Суздалов*) ... 511
17.1. Стыки элементов из прокатных профилей ... 511
17.1.1. Стыки элементов из одиночных уголков равнополочных по ГОСТ 8509-93 ... 511
17.1.2. Стыки элементов из одиночных уголков неравнополочных по ГОСТ 8510-86* ... 514
17.1.3. Стыки элементов из двутавров по ГОСТ 26020-83* и ГОСТ 8239-89 ... 516
17.1.4. Стыки элементов из швеллеров по ГОСТ 8240-89 ... 522
17.1.5. Стыки элементов из парных уголков равнополочных по ГОСТ 8509-93 ... 523
17.1.6. Стыки элементов из парных уголков неравнополочных по ГОСТ 8510-86* ... 526
17.2. Риски отверстий в прокатных профилях ... 528
17.2.1. Уголки стальные горячекатаные равнополочные по ГОСТ 8509-93 и уголки стальные горячекатаные неравнополочные по ГОСТ 8510-86* ... 528
17.2.2. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок по ГОСТ 26020-83* ... 529
17.2.3. Двутавры стальные горячекатаные по ГОСТ 8239-89 ... 529
17.2.4. Сталь горячекатаная. Швеллеры по ГОСТ 8240-89 ... 532

Глава 18. Некоторые сведения из математики для конструктора
(инж. *Л.Б.Музыкантская*) ... 534
18.1. Правильные многоугольники ... 534
18.2. Простейшие фигуры и кривые ... 535
18.3. Простейшие тела ... 537
18.4. Основные алгебраические формулы ... 541
18.5. Основные тригонометрические формулы ... 542
18.6. Решение треугольников ... 544
18.7. Перевод градусов в радианы ... 545
18.8. Ординаты и углы наклона касательных дуг параболы, окружности, эллипса ... 547
18.9. Площадь, ограниченная кривой и осью координат ... 548
18.10. Ординаты дуги окружности ... 549
18.11. Элементы окружности ... 552
18.12. Двугранные углы ... 553

Глава 19. Развертки поверхностей
(инженеры *В.Ф.Пецка, В.И.Киселев*) ... 554
19.1. Общие положения ... 554
19.2. Разворачивающиеся поверхности ... 556
19.2.1. Цилиндр ... 556
19.2.2. Конус ... 556
19.2.3. Пересечение двух поверхностей ... 558
19.3. Неразвертывающиеся поверхности ... 564
19.3.1. Сферические поверхности ... 564
19.3.2. Торовые поверхности ... 567
Список литературы ... 569