

*Григорян А.А., Будыльский И.С. Прогрессирующее разрушение и изменения свойств конструкций в условии пожара // Академия педагогических идей «Новация». Серия: Научный поиск. – 2018. – №4 (апрель). – АРТ 29-эл. – 0,7 п.л. - URL: <http://akademnova.ru/series-scientific-search>*

**РУБРИКА: АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО**

УДК 69

**Григорян Ара Артурович**  
Магистрант 2 курс,  
Факультет «Безопасность Жизнедеятельности и Инженерная Экология»  
**Будыльский Игорь Сергеевич**  
Доцент  
*Научный руководитель:* Будыльский Игорь Сергеевич  
Кандидат технических наук, доцент  
Донской Государственный Технический Университет  
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация  
[Ara\\_94@mail.ru](mailto:Ara_94@mail.ru)

**ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ РАЗРУШЕНИЕ И ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ  
КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИИ ПОЖАРА**

*Аннотация:* В статье рассмотрены причиной возникновения прогрессирующего обрушения строительных конструкций зданий и сооружений. А также рассмотрены особенности прогрессирующее разрушение в условиях пожара и изменения свойств строительных конструкций при воздействии температурных напряжений.

*Ключевые слова:* прогрессирующее обрушение, строительные конструкции, нагрев материала, температурные напряжения, потеря устойчивости, ползучесть, внутренние напряжения, деформация растяжения, изгиба, сечения, релаксация напряжения.

**Grigorian Ara Arturovic**  
Master of 2 course,  
Faculty "Safety of Life Activity and Engineering Ecology"  
**Budytsky Igor Sergeevich**  
Assistant professor  
*Scientific adviser:* Budytsky Igor Sergeevich  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Don State Technical University  
G. Rostov-on-Don, Russian Federation  
[Ara\\_94@mail.ru](mailto:Ara_94@mail.ru)

## **PROGRESSIVE DESTRUCTION AND CHANGES IN THE PROPERTIES OF STRUCTURES IN A FIRE CONDITION**

*Annotation:* In article the reason of occurrence of a progressing collapse of building designs of buildings and constructions is considered. And also the features of progressive destruction in conditions of fire and changes in the properties of building structures under the influence of temperature stresses are considered.

*Key words:* progressive collapse, building structures, material heating, temperature stresses, loss of stability, creep, internal stresses, deformation of stretching, bending, cross sections, stress relaxation.

Прогрессирующее обрушение — это последовательное разрушение несущих строительных конструкций здания или сооружения, обусловленное начальным локальным повреждением отдельных несущих конструктивных элементов и приводящее к обрушению всего здания или его значительной части.

Причиной возникновения начального локального повреждения конструктивных элементов здания может быть любая из множества аварийных ситуаций, создающих нагрузки и воздействия, не предусмотренные условиями нормальной эксплуатации здания или сооружения. В конструктивной системе

здания, при аварийной ситуации, допускается разрушение отдельных несущих конструктивных элементов, но эти разрушения не должны приводить к обрушению смежных конструктивных элементов, на которые передается нагрузка, воспринимаемая ранее элементами, разрушенными в результате аварийной ситуации.

Поскольку причиной прогрессирующего обрушения всегда является аварийная ситуация, то расчёт на прогрессирующее обрушение, согласно СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*» [2], должен выполняться на особое сочетание нагрузок. В связи с этим, определим те случаи, в которых необходим расчёт на прогрессирующее обрушение:

1. Расчёт на прогрессирующее обрушение целесообразен для статически неопределимых систем, так как в статически определимых системах аварийный выход из строя любого элемента ведёт к обрушению всей системы в целом. Чем выше степень статической неопределимости системы, тем больше у неё возможностей для перераспределения усилий между уцелевшими элементами и для устойчивости к общему лавинообразному обрушению.

2. Целесообразность расчёта на лавинообразное или прогрессирующее разрушение, согласно СП XXX.XXXXX.2017 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования» [3], также обуславливается классом и уровнем ответственности здания или сооружения, определяемым в соответствии с Федеральным Законом №384-ФЗ от 30 декабря 2009 года «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений РФ» [1] и ГОСТ 27751-2014 «Надёжность строительных конструкций и оснований» [4]. Требованиями строительных норм определены случаи, когда необходим учёт прогрессирующего обрушения строительных конструкций зданий и сооружений. Согласно п. 5.2.6 [4], расчёт на прогрессирующее обрушение необходимо выполнять для зданий и сооружений класса КСЗ (повышенный уровень ответственности), а

также зданий и сооружений класса КС-2 (нормальный уровень ответственности) с массовым нахождением людей (приложение Б). При этом согласно п. 3.2, класс сооружения устанавливается в задании на проектирование генпроектировщиком по согласованию с заказчиком в соответствии с классификацией, приведенной в Приложении А ГОСТ 27751-2014. К таковым объектам, согласно СТО-008-02495342-2009 «Предотвращение прогрессирующего разрушения железобетонных монолитных конструкций здания» [5], относятся здания и сооружения, разрушение которых может привести к большим социальным, экологическим и экономическим потерям, а именно:

- здания жилые высотой более 10 этажей;
- здания общественные с пребыванием 200 чел. и более в пределах блока, ограниченного деформационными швами;
- здания производственные и вспомогательные с пребыванием 200 чел. и более в пределах блока, ограниченного деформационными швами.

3. Расчёт на прогрессирующее обрушение выполняется как при новом строительстве указанных выше объектов, так и при их реконструкции или капитальном ремонте. При реконструкции расчет на прогрессирующее обрушение следует выполнять только для того блока здания или сооружения, где производится реконструкция, или для пристраиваемого блока.

4. Расчёт на прогрессирующее обрушение также необходим для вторичных конструктивных систем зданий и сооружений, возникающих вследствие выключения из статической работы элементов, разрушенных в результате аварийного воздействия.

Рассмотрим, каковы особенности прогрессирующего обрушения для зданий и сооружений в условиях пожара.

Прогрессирующее обрушение при пожарах представляет собой вид цепного обрушения, наступающего вследствие аварийного воздействия высоких температур при наступлении одного из предельных состояний по огнестойкости — по несущей способности — для одного или группы элементов несущих конструкций, вызывающего перераспределение усилий между уцелевшими элементами системы и приводящее к дальнейшему обрушению части конструкций, здания или сооружения в целом.

Характерными особенностями этого вида прогрессирующего разрушения является изменение свойств материалов конструкций во времени в связи с изменением во времени температуры нагревающей среды. Основными из них являются:

- изменение геометрии элементов (формы, объёма);
- снижение прочности и упругости, развитие пластических деформаций и деформаций ползучести в металлах;
- образования температурных напряжений.

В условиях сохранения постоянного уровня усилий от внешних постоянных и временных нагрузок и воздействий, а также изменяющихся во времени с ростом температуры физико-механических характеристик (прочности, упругости), наступает момент, когда несущая способность одного или группы элементов утрачивается, что приводит к разрушению части конструкций или, в случае цепного разрушения, к обрушению всего здания (сооружения).

Рассмотрим влияние нагрева на напряжённо-деформированное состояние элементов стержневых систем, как наиболее распространённых среди несущих металлических конструкций зданий и сооружений, основное внимание уделив вопросам потери несущей способности элемента при равномерном нагреве в условиях пожара и определению существующих предельных температур.

При нагреве однородного стержня по всему периметру появление в нём внутренних напряжений исключено, так как изменение геометрических размеров происходит в результате равномерного нагрева, не встречая никакого сопротивления, то же относится и к статически определимому стержню, заземленному одним концом (исключение составит лишь часть стержня вблизи заделки, где возникает сложное напряженное состояние, но согласно принципу Сен-Венана в большей части стержня напряжение отсутствует.

Для статически неопределимого стержня, заземленного обоими концами, картина будет иной. Опоры препятствуют его удлинению, в результате в стержне возникают продольные сжимающие усилия и соответствующие им напряжения — температурные напряжения.

Рассмотрим теперь свободный стержень кольцевого сечения. При равномерном нагреве стержня материал его свободно расширяется, и внутренние напряжения не возникают. Если же нагрев неравномерен, например, когда температура внутренней поверхности больше температуры наружной поверхности, то тепловое расширение внутренних цилиндрических слоев материала будет встречать препятствие со стороны внешних слоев. Возникает внутреннее напряжение, растягивающие внешние и сжимающие внутренние цилиндрические слои.

Эти примеры показывают, что при неравномерном и равномерном нагреве статически неопределимых систем возможно появление внутренних температурных напряжений.

При растяжении-сжатии стержня закон Гука устанавливает связь между нормальным напряжением  $\sigma$  и продольной деформацией  $\varepsilon$ :

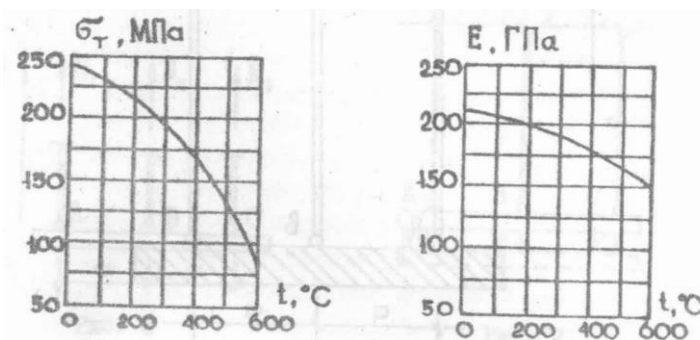
$$\varepsilon = \sigma / E, \text{ где } E \text{ модуль упругости.}$$

При повышении температуры стержня на  $T$  °С и отсутствии внутренних напряжений, полагают, что его деформация увеличивается по линейному закону  $\varepsilon = \alpha T$ , где  $\alpha$  — коэффициент температурного расширения материала.

Если же нагрев сопровождается растяжением или сжатием, то можно принять:

$$\varepsilon = \sigma/E + \alpha T - \text{соотношение Драмеля–Неймана.}$$

С увлечением температуры нагрева, границы применимости формулы в большинстве случаев сужаются. Для сталей напряжения, при которых справедливо соотношение Драмеля–Неймана, не должно превышать предела текучести  $\sigma_T$ . Предел текучести при нагревании сталей уменьшается. В то же время при нагреве происходят изменения физико-химических характеристик материалов, даже если



деформации чисто упруги.

Рис. 1. Зависимости предела текучести и модуля упругости строительной малоуглеродистой стали 18пс от температуры для растяжения и сжатия

Рассмотрим особенности поведения стальных конструкций в условиях высокотемпературного воздействия пожара при растяжении, сжатии, кручении, изгибе, а также при ползучести и релаксации напряжений.

### РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

Соотношение Драмеля–Неймана позволяет определять температурные напряжения при равномерном нагреве статистически неопределимых стержневых систем. Схема решения таких задач ничем не отличается от общей схемы расчета на действие нагрузки.

В стержневых системах температурные напряжения, как правило, не представляют большой опасности, так как наступающая пластичность ограничивает рост напряжений, а температурные деформации остаются во много раз меньше тех деформаций, при которых происходит разрушение. Исключения составляют лишь весьма хрупкие материалы, а также случаи потери устойчивости равновесия. Однако наличие температурных напряжений может существенно повлиять на картину распределения усилий в системе.

Большую опасность при нагреве в условиях пожара представляет снижение прочностных свойств материалов.

Определим предельную температуру нагрева стального стержня при пожаре (рис. 2 слева).

Эта система статически определима, поэтому равномерный нагрев не оказывает влияния на внутренние напряжения стержня. Предельной температурой будет температура нагрева, при которой снизившийся предел текучести стали станет равным максимальному напряжению в стержне, т.е.  $\sigma_T(T) = F/A = 200 \text{ МПа}$ . Зная зависимость  $\sigma_T(T)$ , можно теперь определить предельную температуру нагрева  $T_{пр}$ . Например, для стали 18пс она составляет  $270 \text{ }^\circ\text{C}$ . При предельной температуре верхняя часть стержня перейдет в состояние текучести, сопровождаемая значительными деформациями.

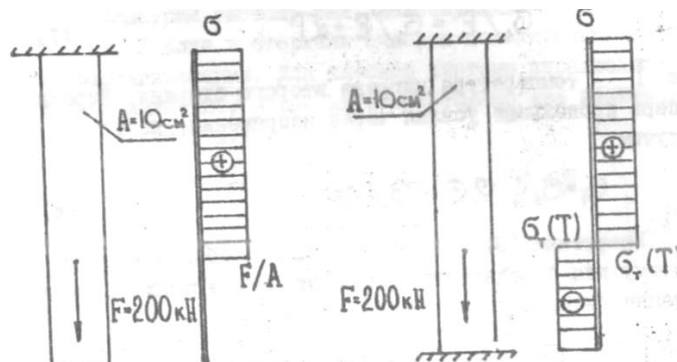


Рис. 2. Расчётные схемы консольно заделанного и двусторонне заделанного стальных стержней, подвергнутых высокотемпературному воздействию пожара



Рассмотрим теперь один раз статически неопределимую систему (рис. 2 справа). При нагреве этого стержня будет достигнуто состояние текучести сначала в той части, где напряжение по абсолютной величине больше. Однако это не означает потери несущей способности всей системы, так как другая часть стержня, оставаясь упругой, будет препятствовать пластическим деформациям. И только при дальнейшем нагреве, когда обе части стержня будут находиться в состоянии текучести, сопротивление системы будет полностью исчерпано. Соответствующую температуру нагрева и следует считать предельной. Для ее определения воспользуемся идеализированной диаграммой растяжения (сжатия), в которой площадка текучести распространяется неограниченно (рис. 3).

Выделим участок стержня двумя сечениями выше и ниже точки приложения силы  $F$ . Из равновесия этого участка получается:  $\sum F_z = 0$ ,  $2\sigma_T A - F = 0 \Rightarrow \sigma_T = F/2A = 100 \text{ МПа}$ .

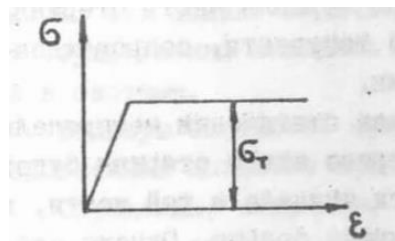


Рис. 3. Идеализированная диаграмма растяжения-сжатия малоуглеродистой стали 18пс с неограниченной площадкой текучести

Для рассмотренной стали, согласно диаграмме, изображенной слева на рис. 1, при  $\sigma_T = 100 \text{ МПа}$  имеем  $T_{\text{пр}} = 570^\circ\text{C}$ . Предельная температура, как и следовало ожидать, оказалась гораздо выше, чем в предыдущем примере. Таким образом, благодаря дополнительным связям, статически неопределимая система оказалась надежнее.

## ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ

Для сжатых элементов при пожаре потеря несущей способности может возникать не только из-за потери прочности, обусловленной переходом стали в состояние текучести, но и значительно раньше □ из-за потери устойчивости, обусловленной переходом в состоянии неустойчивого равновесия.

Критические напряжения  $\sigma_{кр}$ , при которых происходит потеря несущей способности сжатого стержня, зависят от гибкости  $\lambda$  стержня, где  $\lambda = \mu l / i$ ;  $l$  - длина стержня,  $i$  - минимальный радиус инерции поперечного сечения;  $\mu$  — коэффициент, учитывающий характер закрепления концов стержня. Зависимость  $\sigma_{кр}(\lambda)$  показана на рис. 4 слева. При больших гибкостях зависимость  $\sigma_{кр}(\lambda)$  совпадает с теоретической формулой Эйлера  $\sigma_{кр} = \pi^2 E / \lambda^2$ , полученной в предположении упругих деформаций. При малых гибкостях потеря несущей способности стержня связана уже с переходом в пластическое состояние, поэтому критические напряжения близки к пределу текучести  $\sigma_T$ . С ростом температуры нагрева вследствие изменения примем для простоты условную зависимость  $\sigma_{кр}(\lambda)$  в виде:

$$\sigma_{кр} = \pi^2 E(T) / \lambda^2 \text{ при } \lambda = \lambda_0,$$

$$\sigma_{кр} = \sigma_T(T) \text{ при } \lambda < \lambda_0,$$

$$\text{где } \lambda_0 = \pi \sqrt{E(T) / \sigma_T(T)}$$

Первая формула соответствует потере устойчивости стержня при упругих деформациях, вторая — переходу в состояние текучести. Изменение функции  $\sigma_{кр}(\lambda)$  при нагреве стержня будет определяться только зависимостями  $E(T)$ ,  $\sigma(T)$ . Так в результате уменьшения модуля упругости и предела текучести при нагреве, для сталей условный график будет меняться с ростом температуры (рис. 4 справа), то есть в целом критические напряжения при нагреве будут уменьшаться. После их снижения до уровня рабочих напряжений, стержень либо потеряет устойчивость, либо перейдет в состояние текучести.

## КРУЧЕНИЕ

При кручении круглого сечения, деформации которого линейно-упруги, касательные напряжения в его поперечных сечениях распределены неравномерно. Если система статически определима, то величина максимального крутящего момента в опасном сечении при нагреве изменяться не будет, однако нагрев будет приводить к перераспределению касательных напряжений в нём. Это происходит в результате снижения предела текучести материала при сдвиге и переходе стержня в состояние текучести.

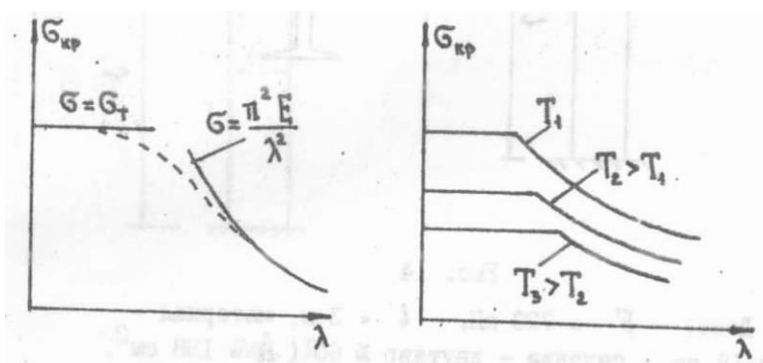


Рис. 4. Графики зависимости критических напряжений от гибкости

Предельная температура равномерного нагрева стержня, испытывающего прямой изгиб, в случае статически определимой системы, находится аналогично.

В поперечном сечении при линейно-упругих деформациях нормальные напряжения распределены по высоте сечения линейно. При пожаре по мере нагрева опасного сечения, в котором возникает максимальный изгибающий момент, в результате снижения предела текучести и перехода материала в пластическое состояние происходит перераспределение напряжений. Распределение изгибающего момента по длине балки остается при этом постоянным.

Сначала в состояние текучести переходят самые напряженные точки поперечного сечения. Центральная часть сечения остается упругой, здесь напряжения меняются по линейному закону. При дальнейшем нагреве вследствие снижения предела текучести наступает предельное состояние: текучесть распространяется на все сечение, и оно уже не сопротивляется изгибу. По этой причине говорят о появлении в опасном сечении «пластического шарнира». Нормальные напряжения в этом случае, всюду по абсолютной величине равны пределу текучести, положительны в растянутой зоне и отрицательны в сжатой. Предел опасного сечения соответствует пределу текучести.

Неравномерный нагрев материала, встречающийся часто на практике, приводит к возникновению внутренних напряжений. Неравномерный нагрев приводит к деформациям растяжение и изгиба.

Изменения температуры материала оказывает существенное влияние и на такие явления, встречающиеся при деформации твердых тел как ползучесть и релаксация напряжений.

Для суждения о прочности в условиях ползучести достаточно бывает определить время до разрыва при заданном напряжении и температуре.

С повышением температуры нагрева наблюдается увлечение скорости ползучести и снижение длительной прочности.

При кручении круглого сечения (рис. 5), деформации которого линейно-упруги, касательные напряжения  $\tau$  в его поперечных сечениях распределены неравномерно. Если система статически определима, то величина максимального крутящего момента  $|M_{\max}|$  в опасном сечении при нагреве изменяться не будет, однако нагрев будет приводить к перераспределению касательных напряжений в этом сечении. Это происходит в результате снижения предела текучести  $\sigma_T$  материала при сдвиге и переходе стержня в состояние текучести.

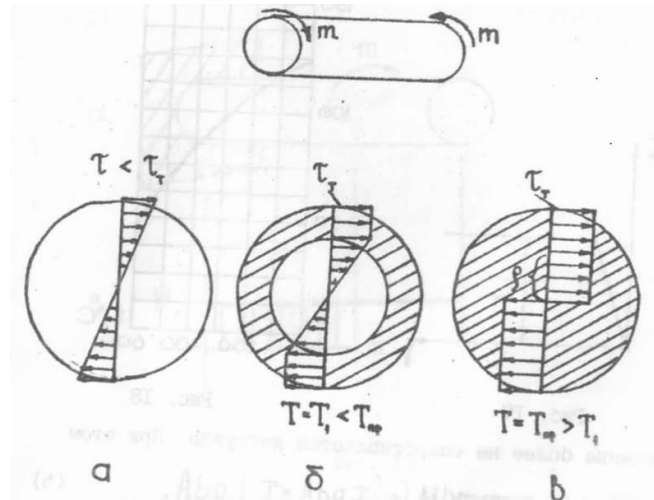


Рис. 5. Кручение круглого из малоуглеродистой стали 18пс: а — в сплошном стержне при касательных напряжениях менее предела текучести; б — в стержне кольцевого сечения (труба) при величине касательных напряжений равной пределу текучести в периферийных точках, но менее предела текучести в глубине сечения; в — при величине касательных напряжений равной пределу текучести во всех точках сечения

Сначала это состояние возникает в периферийных наиболее напряженных точках сечения, а по мере нагрева, область пластических деформаций проникает вглубь сечения. Примем условную диаграмму зависимости касательных напряжений  $\tau$  от угла сдвига  $\gamma$ , соответствующую модели идеального упруго пластичного материала (рис. 5). Тогда в зоне пластических деформаций (рис. 5 б) касательные напряжения будут распределены равномерно и равны  $\tau_t$ . Остальная часть сечения остаётся упругой. Предельным будет состояние, при котором текучесть распространяется на все сечение (рис. 5 в). В этом состоянии сечение стержня более не сопротивляется нагрузке. При этом

$$|M_{\max}| = \int_A \tau r \rho dA = \tau_t \int_A \rho dA.$$

Геометрическая характеристика сечения  $W_{p=А}^{\Pi A} = \int_A \sigma dA$  называется полярным пластическим моментом сопротивления. Для круга  $W_{p=А}^{\Pi A} = \pi d^3 / 12$ , где  $d$  – диаметр.

Из формулы выше можно определить предел текучести  $\tau_t = |M_{\max}| / W_{p=А}^{\Pi A}$

соответствующий предельному состоянию, а зная зависимость  $\tau_r(T)$ , найти предельную температуру равномерного нагрева стержня.

### ИЗГИБ

Предельная температура равномерного нагрева стержня, испытывающего прямой изгиб, в случае статически определимой системы, находится аналогично.

В поперечном сечении при линейно-упругих деформациях нормальные напряжения,  $\sigma$ , распределены по высоте сечения линейно. При пожаре по мере нагрева опасного сечения в результате снижения предела текучести и перехода материала в пластическое состояние происходит перераспределение напряжений. Распределение изгибающего момента по длине балки остается при этом постоянным.

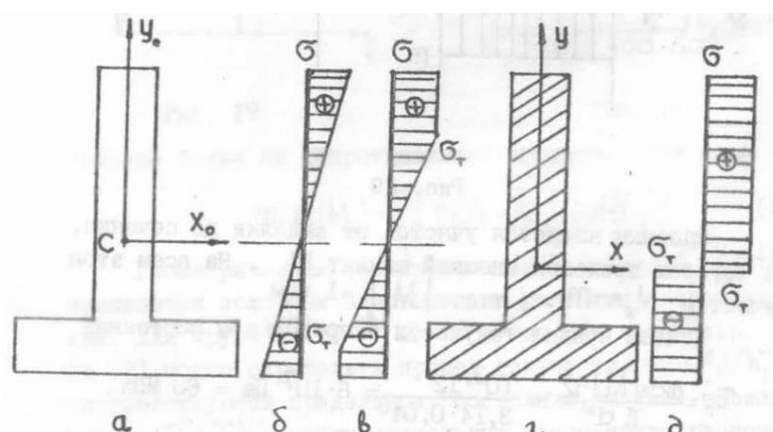


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений в сечении изгибаемой тавровой балки при линейно-упругих деформациях: а – сечение балки; б – до нагрева; в – после достижения нормальными напряжениями в верхних и нижних волокнах уровня предела текучести, но при сохранении упругости средней частью балки; г, д – сечение и распределение напряжений в нём при образовании пластического шарнира

Сначала в состояние текучести переходят самые напряженные точки поперечного сечения. Для идеального упруго-пластического материала напряжения  $\sigma$  будут при этом распределены так, как показано на рис. 6 в. В крайних удаленных от нейтральной оси участках сечения напряжения по абсолютной величине одинаковы и равны  $\sigma_r$ .

Центральная часть сечения остается упругой, здесь напряжения меняются по линейному закону. При дальнейшем нагреве вследствие снижения предела текучести наступает предельное состояние: текучесть распространена на все сечение, и оно уже не сопротивляется изгибу. По этой причине говорят о появлении в опасном сечении «пластического шарнира». Нормальные напряжения в этом случае всюду по абсолютной величине равны пределу текучести, положительны в растянутой зоне и отрицательны в сжатой (рисунок г) . Отметим, что в предельном состоянии нейтральная ось  $X$  (рис. 6 д) может не совпадать с центральной осью сечения  $X_0$ , являющейся нейтральной для изгиба при упругих деформациях (рис 6 а). Положение оси  $X$  можно найти из условия равенства нулю продольной силы.

$$N = A^+ \int \sigma dA = A^+ \int \sigma dA + A^- \int \sigma dA = \sigma_T A^+ - \sigma_T A^- = 0$$

Где  $A^+$  и  $A^-$  — площадь растянутой и сжатой частей сечения соответственно.

Из этого условия и определяется положение нейтральной оси в сечении пластического шарнира, она делит площадь сечения пополам.

Для изгибающего момента в критическом состоянии опасного сечения можем записать.

$$|M_{\max}| = \left| A^+ \int \sigma_y dA \right| = \left| A^+ \int \sigma_y dA + A^- \int \sigma_y dA \right| = \left| \sigma_T A^+ \int y dA - \sigma_T A^- \int y dA \right| = \sigma_T \left( |S_x^+| + |S_x^-| \right) = \sigma_T \left( |S_x^+| + |S_x^-| \right),$$

где  $S_x^+$  и  $S_x^-$  — статические моменты растянутой и сжатой частей сечения относительно оси  $X$

Величина  $W_x^{pl} = |S_x^+| + |S_x^-|$  носит название пластического момента сопротивления сечения относительно оси  $X$ . Для симметричного относительно оси  $X$  сечения  $|S_x^+| = |S_x^-| = S_x^{A/2}$

Предел опасного сечения соответствует пределу текучести.

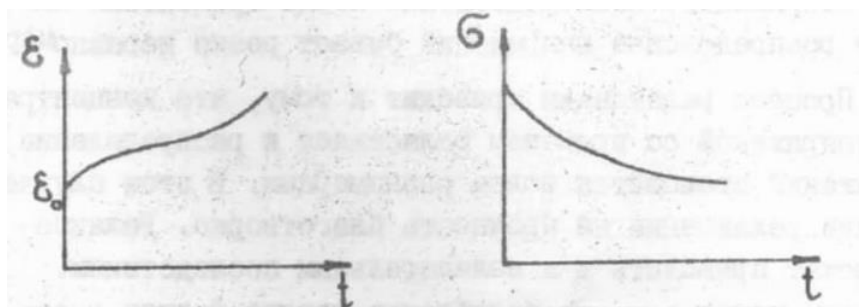
Неравномерный нагрев материала, встречающийся часто на практике, может приводить к возникновению внутренних напряжений. Неравномерный нагрев приводит к деформации растяжение и изгиба.

## ПОЛЗУЧЕСТЬ И РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Изменения температуры материала оказывает существенное влияние и на такие явления, встречающиеся при деформации твердых тел как ползучесть и релаксация напряжений.

Ползучесть называют явлением медленного роста деформаций материала при постоянной, даже малой нагрузке. Большинство материалов обнаруживает ползучесть только при высоких температурах, однако некоторые «ползут» и при комнатных температурах (свинец, асфальт, некоторые полимеры).

Если рассмотреть стержень, подверженный действию растягивающей нагрузки, то кривая зависимости продольной деформации от времени будет подобна



приведенной на

Рис. 7. Кривые зависимости продольной деформации (слева) и длительной прочности (справа) от времени. Где  $\epsilon_0$  - «мгновенная» деформация.

В зависимости от материала, нагрузки и температуры масштаб и характер этой кривой могут быть самыми различными. Заканчивается ползучесть разрушением.

При расчетах на ползучесть для одних конструкций важно обеспечить отсутствие больших деформаций на заданном интервале времени, для других — прочность в прямом смысле слова. Соответственно говорят о «пределе ползучести» и «пределе длительной прочности».

Для суждения о прочности в условиях ползучести достаточно бывает определить время до разрыва при заданном напряжении и температуре. Повторяя испытания при различных напряжениях, можно построить кривую длительной



прочности для данной температуры.

С повышением температуры нагрева наблюдается увлечение скорости ползучести и снижение длительной прочности.

Одним из проявлений ползучести является релаксация напряжений — процесс медленного падения напряжений в материале при неизменных деформациях. В элементах конструкций, имеющих концентраторы напряжений, непосредственно после приложения нагрузки распределение напряжений бывает резко неравномерными.

Процесс релаксации с течением времени приводит к ослаблению концентрации напряжений, и распределение напряжений становится более равномерным. В этом случае влияние релаксации на прочность благотворно.

Релаксация также может приводить к таким нежелательным последствиям, как ослабление натяжения болтов во фланцевых, фрикционных соединениях и в соединениях на высокопрочных болтах. Нагрев конструкций при пожаре может значительно ускорить процесс релаксации.

Для работников пожарной охраны необходимо знать время, по истечению которого строительные конструкции здания или сооружения в условиях пожара потеряют несущую или ограждающую способность. Это время называется пределом огнестойкости. Оно зависит не только от вида, геометрии и материала самой конструкции и материала огнезащиты, но и от условий ее обогрева. Если обогрев не равномерный, то даже при незначительном увеличении температуры в материале строительных конструкций могут развиваться опасные напряжения, способные привести к прогрессирующему разрушению, влекущему за собой значительный материальный ущерб и даже гибель людей.

Недопущения прогрессирующего обрушения зданий и сооружений, согласно [3], следует обеспечивать:

- рациональными конструктивными и объемно-планировочными решениями здания с учетом вероятности возникновения аварийной ситуации;
- конструктивными мерами, увеличивающими статическую неопределимость системы;
- применением конструктивных решений, обеспечивающих развитие в несущих конструктивных элементах и их соединениях пластических (неупругих) деформаций;
- необходимой прочностью несущих конструктивных элементов и устойчивостью системы для условий нормальной эксплуатации здания и для случаев локального разрушения отдельных конструктивных элементов здания.

Помимо указанных выше решений, для недопущения прогрессирующего обрушения металлических конструкций зданий и сооружений при пожарах рекомендуется предусматривать следующие мероприятия:

- применение эффективных способов и средств огнезащиты;
- применение автоматических систем пожарной сигнализации, пожаротушения и оповещения при пожаре;
- применение автоматизированных систем мониторинга за состоянием строительных конструкций.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основании анализа выполненного исследования, резюмируя материалы данной статьи, составлено следующее заключение:

1. Причиной возникновения прогрессирующего обрушения строительных конструкций зданий и сооружений может служить любая из особых нагрузок, предусмотренных п. 5.6. [2].

2. Расчёт строительных конструкций зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение, согласно [3, 4], целесообразен при новом строительстве, реконструкции, капитальном ремонте, а также после аварий (расчёт

вторичных конструктивных схем) для зданий и сооружений классов КС3 (повышенный уровень ответственности) и КС-2 (нормальный уровень ответственности) с массовым нахождением людей, а именно:

- здания жилые высотой более 10 этажей;
- здания общественные с пребыванием 200 чел. и более в пределах блока, ограниченного деформационными швами;
- здания производственные и вспомогательные с пребыванием 200 чел. и более в пределах блока, ограниченного деформационными швами.

3. Основные требования к расчёту строительных конструкций на прогрессирующее обрушение регламентированы [3]. Для зданий и сооружений с несущим стальным каркасом в качестве локального разрушения следует рассматривать разрушение (удаление) ниже перечисленных несущих конструкций одного (любого) этажа на участке, ограниченном кругом площадью не менее 40 м<sup>2</sup> для зданий и сооружений высотой до 100 м, не менее 80 м<sup>2</sup> для зданий и сооружений высотой от 100 м до 200 м и не менее 100 м<sup>2</sup> для зданий и сооружений высотой более 200 м:

- Колонн;
- Ригелей;
- Связей между элементами;
- Стропильных и подстропильных ферм.

Локальное разрушение может располагаться в любом месте сооружения.

Для оценки устойчивости зданий и сооружений против прогрессирующего обрушения допускается рассматривать наиболее опасные локальные разрушения.

Для большепролетных конструкций покрытий в качестве локального разрушения следует рассматривать разрушение (удаление) одного из несущих элементов. В других случаях – согласно заданию на проектирование в зависимости от типа сооружения.

4. Острой проблемой является прогрессирующее разрушение в условиях пожара. При пожаре часть выделяющего тепла передается конструкциям сооружений и зданий, что приводит к их высокотемпературному нагреву, к деформациям, снижению прочности и упругости, образованию температурных напряжений. В результате может быть частично или полностью потеряна несущая способность строительных конструкций.

5. В стержневых системах температурные напряжения, как правило, не представляют большой опасности, так как наступающая пластичность ограничивает рост напряжений, а температурные деформации остаются во много раз меньше тех деформаций, при которых происходит разрушение. Однако наличие температурных напряжений существенно влияет на картину распределения усилий в системе.

6. Потеря несущей способности сжатых элементов металлических конструкций при нагреве может происходить до перехода материала в состоянии текучести, вследствие перехода в состоянии неустойчивого равновесия □ потеря устойчивости. Уровень критических напряжений при нагреве уменьшается. После их снижения до уровня рабочих напряжений стержня, стержень либо потеряет устойчивость, либо перейдет в состояние текучести.

7. При кручении круглых стержней, деформации которых линейно-упруги, касательные напряжения в их поперечных сечениях распределены неравномерно. Если система статически определима, то величина максимального крутящего момента в опасном сечении при нагреве изменяться не будет, однако нагрев будет приводить к перераспределению касательных напряжений в этом сечении. Это происходит в результате снижения предела текучести материала при сдвиге и переходе стержня в состояние текучести.

8. В изгибаемых системах при пожаре по мере нагрева сечения, в котором возникает максимальный изгибающий момент, в результате снижения предела текучести и перехода материала в пластическое состояние происходит

перераспределение напряжений. Распределение изгибающего момента по длине изгибаемого элемента остается при этом постоянным. Сначала в состоянии текучести переходят самые напряженные точки поперечного сечения. Центральная часть сечения остается упругой, здесь напряжения меняются по линейному закону. При дальнейшем нагреве, вследствие снижения предела текучести, наступает предельное состояние: текучесть распространена на все сечение, и оно уже не сопротивляется изгибу, то есть в опасном сечении образуется «пластический шарнир». Нормальные напряжения в этом случае всюду по абсолютной величине равны пределу текучести, положительны в растянутой зоне и отрицательны в сжатой. Предел опасного сечения соответствует пределу текучести.

9. Неравномерный нагрев материала приводит к возникновению внутренних напряжений и деформациям растяжения и изгиба.

10. Изменения температуры материала существенно влияют на ползучесть и релаксацию напряжений. При этом, проектируя металлоконструкции, для одних конструкций важно обеспечить отсутствие больших деформаций на заданном интервале времени, для других — прочность в прямом смысле слова. Соответственно говорят о «пределе ползучести» и «пределе длительной прочности».

С повышением температуры нагрева наблюдается увлечение скорости ползучести и снижение длительной прочности.

11. Одним из проявлений ползучести является релаксация напряжений. Процесс релаксации с течением времени приводит к ослабеванию концентрации напряжений, и распределение напряжений становится более равномерным. В этом случае влияние релаксации на прочность благотворно. Релаксация также может приводить к нежелательным последствиям — ослаблению натяжения болтов во фланцевых, фрикционных соединениях и в соединениях на высокопрочных болтах.

Нагрев конструкций при пожаре значительно ускоряет процесс релаксации.

**Список использованной литературы:**

1. Федеральный Закон №384-ФЗ от 30 декабря 2009 года «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений РФ»
2. СП XXX.XXXXXX.2017 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования».
3. СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*».
4. ГОСТ 27751-2014 «Надёжность строительных конструкций и оснований»
5. СТО-008-02495342-2009. Предотвращение прогрессирующего разрушения железобетонных монолитных конструкций здания.
6. М.Я. Ройтман. Противопожарное нормирование в строительстве
7. А.Ф. Смирнов и др. Сопротивление материалов.
8. И.А. Биргер и др. Термопрочность деталей машин.
9. Н.Н. Малинин. Прикладная теория пластичности и ползучести.
10. В.В. Парцевский, Б.В.Путянин. Прочность элементов конструкций при повышении температуры в условиях пожара.

*Дата поступления в редакцию: 26.04.2018 г.*

*Опубликовано: 27.04.2018 г.*

*© Академия педагогических идей «Новация». Серия: «Научный поиск»,  
электронный журнал, 2018*

*© Григорян А.А., Будыльский И.С., 2018*