

*Исаков Е.Г., Корольков А.О. Инструмент для фрикционной сварки с перемешиванием (обзорная)// Академия педагогических идей «Новация». Серия: Студенческий научный вестник. – 2019. – №1 (январь). – АРТ 142-эл. – 0,2 п.л. - URL: <http://akademnova.ru/page/875550>*

**РУБРИКА: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**УДК 621.791.14**

**Исаков Евгений Григорьевич**

студент 3 курса, факультет машиностроение и транспорта  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

г. Пенза, Российская Федерация  
e-mail: [evgeny.isakov1@yandex.ru](mailto:evgeny.isakov1@yandex.ru)

**Корольков Андрей Олегович**

студент 3 курса, факультет машиностроение и транспорта  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

г. Пенза, Российская Федерация  
e-mail: [andreykorolkovracer@yandex.ru](mailto:andreykorolkovracer@yandex.ru)

**ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФРИКЦИОННОЙ СВАРКИ С  
ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ (обзорная)**

*Аннотация:* Фрикционная сварка с перемешиванием широко используется в промышленности и является востребованным методом в самолетостроении и ракетостроении, который целесообразно использовать как технологически, так и экономически. В данной статье рассмотрено назначение и функция инструмента, его конструкция и геометрия, материал из которого он изготавливается и их влияние на качество, размеры и форму сварного шва.

*Ключевые слова:* фрикционная сварка с перемешиванием, инструмент, штифт, буртик.

**Isakov Evgeny Grigorievich**

3rd year student, faculty of mechanical engineering and transport  
FGBOU VO "Penza State University"  
Penza, Russian Federation

**Korolkov Andrey Olegovich**

3rd year student, faculty of mechanical engineering and transport  
FGBOU VO "Penza State University"  
Penza, Russian Federation

**TOOL FOR FRICTIONAL WELDING WITH MIXING (survey)**

*Abstract:* Friction welding with mixing is widely used in industry and is a popular method in shipbuilding, aircraft construction, rocket production, and other branches of mechanical engineering, which is expedient to use both technologically and economically. This article describes the purpose and function of the tool, its design and geometry, the material from which it is made and their impact on the quality, size and shape of the weld.

*Keywords:* friction stir welding, tool, pin, shoulder.

Фрикционная сварка с перемешиванием (ФСП) – это твердотельный процесс, который означает, что объекты соединяются без плавления основных металлов. Это открывает совершенно новые области в технологии сварки.

В ФСП цилиндрический инструмент вращается и погружается в область соединения между двумя кромками заготовок металла. Стыкуемые кромки должны быть надежно зажаты, чтобы не допустить разрыва соединительных поверхностей. Инструмент состоит из штифта и буртика (рис. 1). Контакт штифта с заготовкой при сварке создает фрикционный и

деформационный нагрев и размягчает материал заготовки. Контакт плеча с заготовкой увеличивает нагрев заготовки, расширяет зону размягчения материала и ограничивает деформируемый металл. Тепло от трения между износостойким сварочным инструментом и кромками заготовок заставляет последние размягчаться, не достигая точки плавления, что позволяет инструменту перемещаться вдоль линии сварки. При охлаждении между заготовками создается твердофазная связь, называемая сварным швом [1].

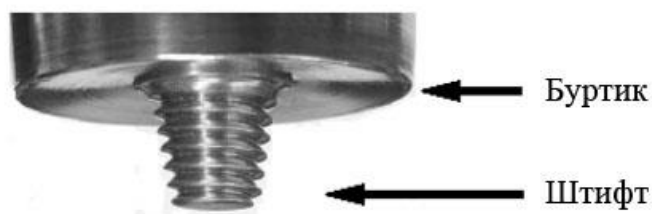


Рисунок 1 – Конструкция инструмента для сварки трением с перемешиванием

### **Материал инструмента**

ФСП – это термомеханический процесс деформации, при котором температура инструмента приближается к температуре солидуса основного металла без его расплавления. Производство качественного сварного шва требует правильного выбора материала инструмента для получения качественного сварного соединения. Таким образом, нежелательно иметь инструмент, который теряет стабильность размеров, конструктивные особенности или, что еще хуже, преждевременно разрушается от действующих нагрузок (кручения и знакопеременного изгиба) и нагрева [2].

При ФСП на продолжительность работы инструмента влияет абразивный износ, высокая температура и динамические воздействия.

Следовательно, при выборе материала для создания инструмента необходимо, чтобы он обладал следующими свойствами:

- износостойкостью;
- высокой термостойкостью;
- хорошей ударной вязкостью;
- прочностью при повышенных температурах;
- высоким коэффициентом теплового расширения;
- обрабатываемостью.

В зависимости от свариваемого материала, инструмент может быть изготовлен инструментальных сталей и твердых сплавов [3]:

- инструментальных сталей для горячей обработки – наиболее часто используемый материал, легкая доступность и обрабатываемость, термостойкость, износостойкость особенно для алюминия и меди;

- сплавов на основе *Ni* и *Co* – высокая прочность, отличная пластичность, стабильность твердости, сопротивление ползучести. Эти сплавы получают свою прочность при добавлении в *Ni* присадок *Mn* и *W* [4]. Рабочая температура такого инструмента лежит в пределах 600-800 °С;

- тугоплавких металлов (*W*, *Mo*) – высокотемпературная прочность. Диапазон рабочих температур инструмента 1000-1500 °С; дорогая, сложная обработка;

- сплавов на основе *W* – хорошая прочность, высокая рабочая температура (1000-1100 °С), высокая стоимость материала и обработки;

- металлических композитов, армированных твердосплавными частицами (*WC*, *WC-Co*, *TiC*) – превосходная износостойкость, вязкость при разрушении; низкая стоимость по сравнению с тугоплавкими металлами и сплавами на их основе;

- сталей с поликристаллическим покрытием из кубического нитрида бора (*PCBN*) – высокая рабочая температура, высокая износостойкость, низкая вязкость разрушения, высокая стоимость инструмента.[2].

## **Геометрия инструмента**

Каждая из частей инструмента (штифт и буртик) выполняет разные функции. Поэтому при разработке нового инструмента для улучшения качества и повышения технологичности конструкции инструмента, буртик и штифт целесообразно изготавливать из разных материалов.

При разработке инструмента необходимо учитывать материалы свариваемых заготовок, конфигурацию соединения и параметры сварки (скорость вращения, скорость перемещения, заглубление, угол наклона инструмента).

Очень важным фактором конструкции инструмента является то, что поток металла имеет упорядоченное направление и количество во время сварки. Как правило, чем больше объем металла для перемешивания, тем лучше качество сварного шва, но он тесно связан с другими технологическими параметрами (скорость вращения, скорость сварки). В процессе сварки возникает горизонтальный поток металла (рис. 2а), если на поверхности основного металла возникает некоторое количество оксида, то вертикальный поток (рис. 2б) металла будет очень значительным (при нахлесточном сварном соединении). Если вертикальный поток не возникает во время сварки, поверхностный оксид останется в сварном шве и не выходит на поверхность шва.

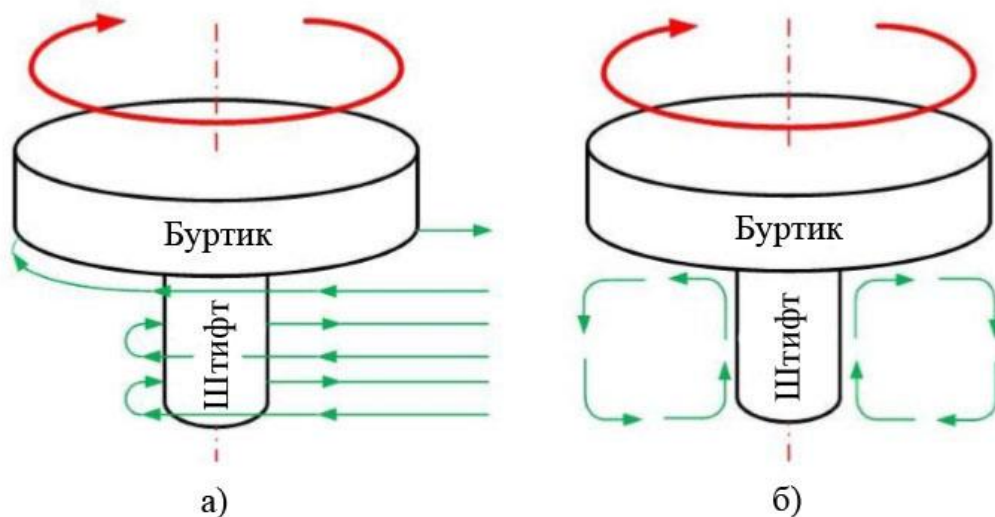


Рисунок 2 – Направление потока металла во время сварки, а) горизонтальный поток металла; б) вертикальный поток металла

### Конструкция штифтов

Фрикционные штифты производят деформационный и фрикционный нагрев поверхностей соединений. Штифт предназначен для разрушения соприкасающихся или контактирующих поверхностей заготовки, среза металла перед инструментом и перемещения его за инструментом. Кроме того, глубина деформации и скорость перемещения инструмента определяются конструкцией штифта. Обычно используются следующие конструкции штифтов:

- цилиндрический штифт с круглым дном (Рис 3а) – закругленный конец инструмента для штифта снижает износ инструмента при врезании и улучшает качество сварного шва непосредственно под дном штифта, при этом, торец штифта должен иметь некий радиус закругления. При уменьшении радиуса закругления увеличивается вероятность некачественного сварного шва, особенно непосредственно под штифтом. Обработка радиуса в нижней части резьбы увеличит срок службы

инструмента за счет устранения концентрации напряжений в корне резьбы [5];

- цилиндрический штифт с плоским дном (рис. 3б) – скорость трения вращающегося цилиндра увеличивается от нуля в центре цилиндра до максимального значения на краю цилиндра. Локальная скорость, связанная с коэффициентом трения между штифтом и металлом, определяет деформацию во время перемешивания при трении. Самая низкая точка штифта с плоским дном, наклоненная под небольшим углом к нормальной оси – край штифта, где скорость является наибольшей. Применяются для сварки алюминиевых листов толщиной до 12 мм. Для сварки более толстых листов свыше 12 мм при более высоких скоростях сварки используется простая модификация цилиндрического штифта – усеченный конус. Усеченные конические штифты имеют меньшие поперечные нагрузки (по сравнению с цилиндрическим штифтом), и наибольшую моментную нагрузку на основание конуса, где он является самым прочным [2].

На основании ранее описанных базовых геометрий штифтов разработка инструментов продолжалась, и появились необычные геометрии штифтов:

- типа *mx triflute<sup>TM</sup>* (рис. 3в) – содержит три канавки, врезанные в спиральный гребень. Такая форма штыря имеет большую по сравнению с цилиндрическим штырем поверхность, которая создает дополнительную деформацию на линии сварки, а также увеличивают скорость перемещения инструмента при меньшем количестве перемещаемого металла. Его преимущественно используют для сварки алюминиевых сплавов толщиной 50 мм за один проход [4];

- типа *a-skew<sup>TM</sup>* (рис. 3г) – особенности этой геометрии штифта аналогичны *mx triflute<sup>TM</sup>*. Инструмент располагают под углом по отношению

к шпинделю машины в зависимости от заданных режимов сварки и свойств свариваемых материалов. Это увеличивает скорость сварки, увеличивает ширину и уменьшает асимметрию сварного шва, обеспечивает формирование более прочных нахлесточных соединений [5];

- типа *trivex* (рис. 3д) – конструкция позволяет снизить на 18-25% движущих сил и на 12% кузнечных (нормальных) усилий на инструмент по сравнению со штифтом типа *mx triflute<sup>TM</sup>* сопоставимых размеров [2];

- безрезьбовые (рис. 3е) – применяются при определенных условиях сварки, где резьбовые штифты разрушаются под действием сильного износа. Резьбовые штифты, работающие в агрессивной среде, не могут сохранять требуемые характеристики инструмента без чрезмерного износа штифта. Штыри для этих условий обычно состоят из простых конструкций с надежными функциями [4];

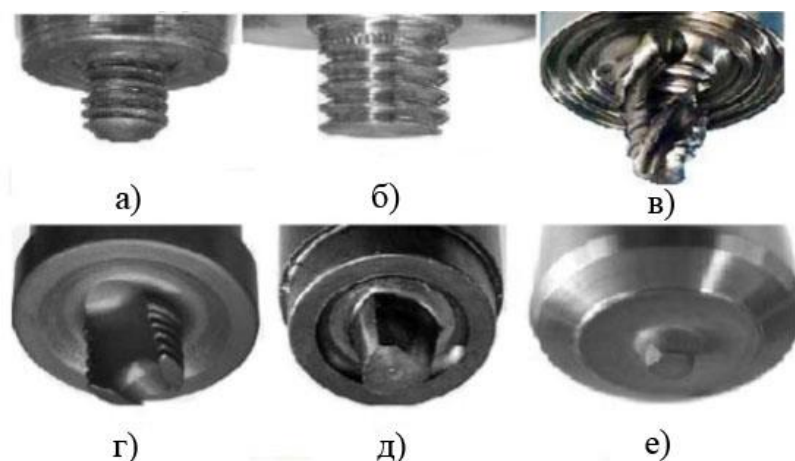


Рисунок 3– Геометрия штифтов, а) цилиндрический с круглым дном, б) цилиндрический с плоским дном, в) типа *mx triflute<sup>TM</sup>*, г) типа *a-skew<sup>TM</sup>*, д) типа *trivex*, е) безрезьбовые

- выдвижные (рис. 4) – инструмент с выдвижным штифтом предназначен для обеспечения возможности регулировки длины штифта во время сварки. Обычный режим работы этих инструментов состоит в том,



чтобы втягивать штифт с заданной скоростью, когда инструмент перемещается вперед. Конструкция данного инструмента позволила избежать выходного отверстия в кольцевых сварных швах [4];

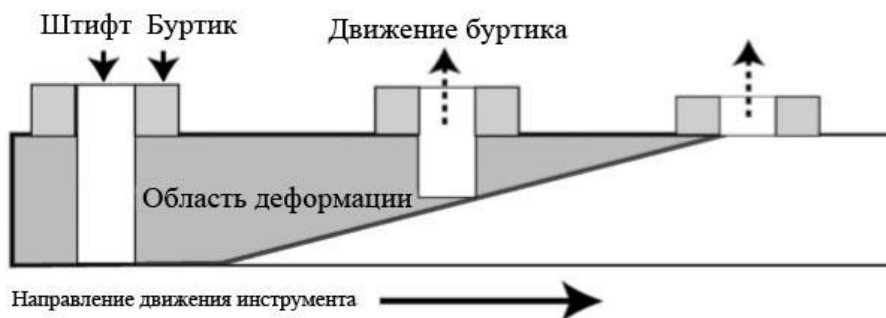


Рисунок 4 – Работа выдвигного пальца

- типа *bobbin tools* (рис. 5) – инструмент состоит из двух буртиков, соединенных шпилькой, полностью находящейся внутри заготовки. Данный тип инструмента работает путем помещения нижнего саморегулирующегося буртика на конец выдвигного штифта. Обычно это делается путем предварительного сверления отверстия в заготовке, вставки резьбового штифта и крепления второго буртика к штифту. Во время сварки нижний буртик тянется к верхнему буртику, пока не будет достигнута желаемая сила. Поскольку эти два буртика взаимодействуют друг с другом, изменяя длину штыря в зависимости от сил, действующих на него, то такой инструмент относят к саморегулирующему типу. Основными преимуществами таких инструментов являются простота фиксации, устранение неполного проникновения в корень шва и увеличенная скорость перемещения инструмента из-за нагрева с обоих буртиков. Данным инструментом сваривают преимущественно швы переменной толщины [6].



Рисунок 5 – Саморегулирующийся инструмент типа *bobbin tools*

### **Конструкция буртика инструмента**

Буртик инструмента производит большую часть деформационного и фрикционного нагрева по сравнению со штифтом. Таким образом, одним из наиболее важных параметров буртика является диаметр, поскольку он оказывает существенное влияние на количество тепла при трении.

Большой диаметр буртика увеличивает силу давления и изменяет форму шва, что снижает механические свойства швов. Кроме того, форма плеча влияет на качество сварного соединения в целом. Рассмотрим основные виды форм буртиков:

- вогнутая (рис. 6) – один из первых буртиков стандартного типа. Вогнутые буртики производят качественные сварные швы, а простота конструкции буртика позволяет легко обрабатываться резанием при изготовлении. Вогнутость формы создается небольшим углом между краем буртика и штифтом (6-10°). Во время погружения инструмента металл, вытесненный штифтом, подается в полость в буртике инструмента. Этот металл служит началом деформационного давления буртика на участок шва. Движение инструмента вперед направляет новый металл в полость буртика, выталкивая существующий металл в поток штифта. Для правильной работы

конструкции с буртиком необходимо наклонить инструмент на 2–4° от нормали заготовки от направления движения [2];



Рисунок 6 – Буртик с выгнутой формой

• выпуклая (рис. 7) – инструмент с выпуклым буртиком значительно уступает по качеству сварного шва инструменту с вогнутым буртиком, так выпуклая форма отталкивает металл от штифта в процессе сварки. Инструмент с выпуклым буртиком с добавлением спирали нашел свое применение для сварки толстого металла. Спираль перемещает металл от внешней стороны буртика к булавке. Такая конструкция буртика обеспечивает большую гибкость в области контакта между буртиком и заготовкой, улучшает допуск на несоответствие стыков, повышает легкость соединения заготовок различной толщины и улучшает способность к сварке швов различной кривизны [2].



Рисунок 7 – Буртик с выпуклой формой со спиралью

Таким образом, буртик инструмента ФСП также может содержать элементы, которые увеличивают деформацию материала, создаваемую буртиком, что приводит к увеличению перемешивания металла и повышению качества сварных швов. Эти элементы могут состоять из спиралей, ребер или накатки, канавок или концентрических окружностей (рис. 8 а-д). Спирали применяются наиболее часто по сравнению с другими элементами благодаря своей форме. Спиральные каналы направляют деформированный металл от края буртика к штифту, тем самым устраняя необходимость в наклоне инструмента [2].

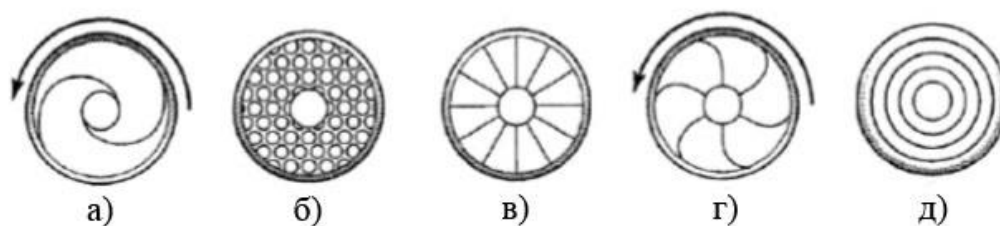


Рисунок 8 – Элементы, увеличивающие деформацию металла буртиком, а) спираль, б) накатка, в) ребра, г) канавки, д) концентрические круги

Все рассмотренные геометрические формы, конструкции штифтов и буртиков, и их назначение необходимо учитывать при проектировании инструмента для фрикционной сварки с перемешиванием, в зависимости от марки свариваемого материала, типа соединения и режимов сварки. С 1991 года геометрия инструмента заметно изменилась, появились новые формы, изменился материал самого инструмента. Все чаще стали изготавливать материал инструмента из композиционных материалов, которые позволили повысить долговечность инструмента и качество сварных соединений. Но эволюция не закончена, дальнейшие улучшения необходимы в этой области. Существует растущий спрос на сварные изделия с высокой

температурой плавления, высокой прочностью, в особенности в авиастроении и космической промышленности, поэтому ключевым моментом во фрикционной сварке трением с перемешиванием является конструкция инструмента и ее дальнейшее совершенствование.

**Список использованной литературы:**

1. ESAB Co.: Friction Stir Welding - The ESAB Way, 2004. – P. 8-11.
2. Rajiv S. Misra, Murray W., Mahoney: Friction stir welding and processing, 2007. – P. 6-19.
3. Christian B. Fuller: Tool geometry for friction stir welding – Optimum shoulder diameter, 2011. – P. 6-20.
4. Большая энциклопедия нефти и газа [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ngpedia.ru/id347121p1.html> (дата обращения 27.01.2019).
5. Eur. Ing. C.E.D. Rowe, Eur. Ing. Wayne Thomas: Advances in tooling materials for friction stir welding, 2006. – P. 1-6.
6. Tracy W. Nelson: Friction stir welding – A brief review and perspective for the future, 2005. – P. 10-13.
7. Jakob Hilgert: Knowledge based process development of bobbin tool friction stir welding, 2012. – P.2-4.

*Дата поступления в редакцию: 29.01.2019 г.*

*Опубликовано: 29.01.2019 г.*

*© Академия педагогических идей «Новация». Серия «Студенческий научный вестник», электронный журнал, 2019*

*© Исаков Е.Г., Корольков А.О., 2019*