

**ЯКОВЛЕВ Алексей Борисович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение».  
 SPIN-код: 8194-5800  
 AuthorID (РИНЦ): 488687  
 ORCID: 0000-0002-1987-2138  
 AuthorID (SCOPUS): 56503089200  
 ResearcherID: E-7451-2014

Адрес для переписки: yakovlev@omgtu.ru

УДК 621.791.14

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-21-25

Для цитирования

Кузьменко И. А., Яковлев А. Б. Исследование свойств системы автоматического регулирования жидкостной ракетной двигательной установки с интегрирующим регулятором // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 17–21. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-17-21.

Статья поступила в редакцию 21.12.2018 г.

© И. А. Кузьменко, А. Б. Яковлев

**И. К. ЧЕРНЫХ  
 Е. В. ВАСИЛЬЕВ  
 Р. В. ДЫЛЬЧЕНКО  
 Ю. Е. ЖДАНОВА  
 Б. К. ИГИСЕНОВ**

Омский государственный  
 технический университет,  
 г. Омск

## ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

В статье представлены некоторые особенности образования сварных соединений различных систем металлов для стыковых и нахлесточных соединений. Рассмотрена схема образования стыкового соединения алюминиевых сплавов со сталью со смещением инструмента. Проведен анализ качества и структуры швов, полученных согласно данной схеме. Исследован микрошлиф полученного образца сварного шва алюминиевого сплава АМГ6 с нержавеющей сталью 12Х18Н10Т толщиной 2 мм при частоте вращения инструмента 500 об/мин и подаче 50 мм/мин со смещением инструмента на 0,2 мм в стальную заготовку. В ядре шва наблюдается взаимное проникновение металлов на глубину до 3,2 мм и стальные включения в алюминиевом сплаве размером до 0,3 мм.

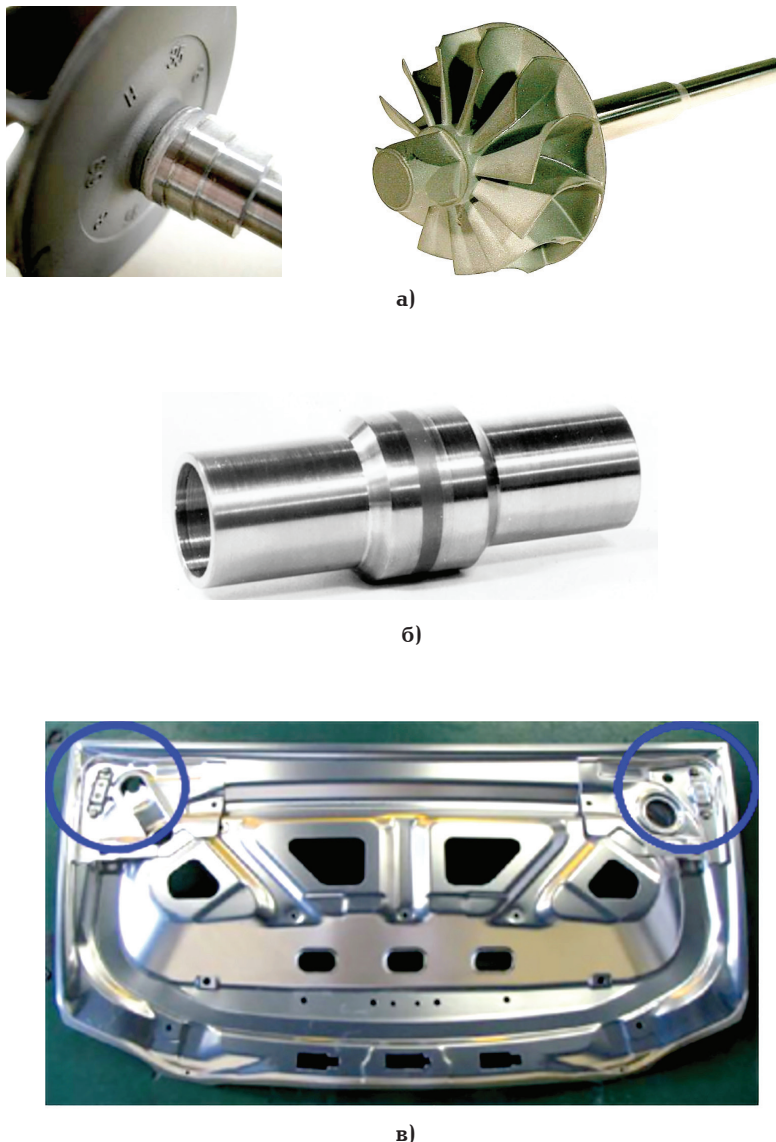
**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, фрикционная сварка, сварка разнородных металлов, алюминиевые сплавы, нержавеющая сталь, структура сварного шва.

Сварка разнородных металлов позволяет создавать цельные конструкции, в которых отдельные поверхности будут обладать различными физико-механическими свойствами и, соответственно, выполнять различные функции. Биметаллические соединения широко используются в тех случаях, когда невыгодно изготавливать из дорогого материала изделие целиком — вместо этого предусматривается отдельный участок из отличающегося материала, который испытывает воздействие определенных нагрузок. При этом существует ряд сложностей в изготовлении данных сварных соединений, а номенклатура свариваемых металлов охватывает всевозможные сплавы и чистые металлы. Из сложностей

соединения разнородных металлов можно выделить следующие: различие температур плавления свариваемых металлов, различие в коэффициентах линейного расширения, различие свойств теплопроводности, образование интерметаллидов. Примеры биметаллических соединений различных конструкций представлены на рис. 1 [1–3].

Целью данного исследования является оценка возможности сваривания разнородных металлов методом сварки трением с перемешиванием и анализ структуры стыкового соединения алюминиевого сплава с нержавеющей сталью.

Сварка разнородных металлов, таких как сталь и титан, имеет свои особенности. Титан с легирующими компонентами стали образует



**Рис. 1. Примеры биметаллических соединений в промышленности:**  
**а** — соединение импеллера из инконеля с хвостовиком из углеродистой стали;  
**б** — трубный биметаллический переходник из стали 12X18H10T и титанового сплава ВТ6С с использованием кольцевых проставок из бронзы Бр.Х и ниобиевого сплава 5В2МЦ;  
**в** — соединение стальных держателей с алюминиевым багажником для Mazda, изготовленное методом сварки трением с перемешиванием

химические соединения двух и более металлов, а с углеродом — образует карбиды. Например, для осуществления сварки переходника из хромоникелевой стали 12X18H10T и титанового сплава ВТ6С можно использовать проставки из бронзы (Бр.Х) и ниобиевых сплавов (5В2МЦ, НбЦ) [1]. Сварка данных переходников осуществляется в несколько этапов. На первом этапе производится сварка трубной заготовки из стали 12X18H10T с заготовкой из бронзы Бр.Х. Торец бронзовой проставки нагревается до температуры, при которой на поверхности образуется тонкий слой расплавленного металла, а стальная заготовка нагревается до такой температуры, при которой возможно надёжное смачивание расплавленной бронзой. На втором этапе производится сварка трубной заготовки из титанового сплава ВТ6С с заготовкой из ниобиевого сплава по принципу первого этапа данной технологии.

На третьем этапе две части 12X18H10T + Бр.Х и ВТ6С + 5В2МЦ свариваются между собой по аналогичной технологии. Сварные соединения формируются по схеме сварки-пайки, поэтому необходимым условием отсутствия непрочности в соединениях является оплавление торца из бронзы и титана, смачивание и растекание расплавленного металла по торцу стали и ниобиевого сплава. При испытании на статическое растяжение прочность соединения соответствует уровню прочности бронзы Бр.Х. При наличии утолщения в месте сварки прочность равняется прочности сварного соединения трубы из стали 12X18H10T.

Современные исследователи [1–6] демонстрируют высокий интерес к процессу сварки разнородных металлов методом сварки трением с перемешиванием (СТП), который в настоящее время находит всё более широкое применение

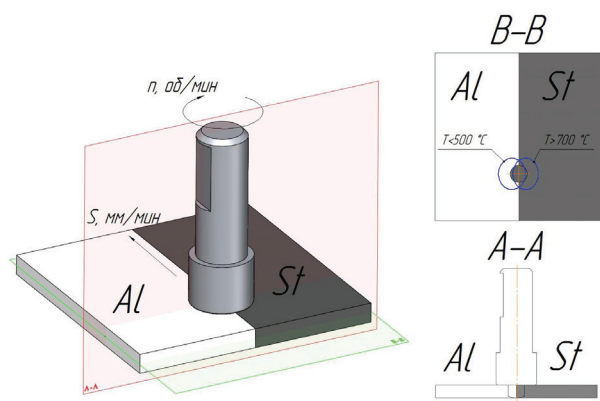


Рис. 2. Стандартная схема сварки трением с перемешиванием применительно к сварке разнородных металлов

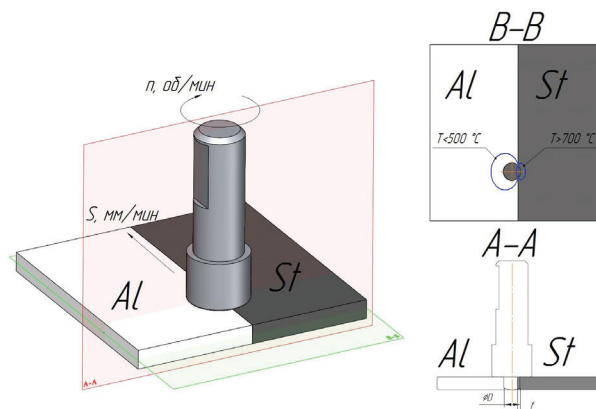


Рис. 3. Схема получения соединений сталь-алюминий со смещением инструмента

в промышленности. Данный метод сварки позволяет осуществлять соединение металлов без их расплавления, в твёрдой фазе, и часто без использования дополнительных проставок, хотя их наличие также является темой исследований [5, 7].

Рассматривая сварку других систем, таких как медь с алюминиевым сплавом, алюминиевый сплав с нержавеющей сталью, алюминиевый сплав с титановым сплавом, стоит выделить исследование [8]. Исследование проводилось на листовых образцах меди М1, алюминиевого сплава АД1, титанового сплава ОТ4-1 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Сварка осуществлялась методом СТП. Перед сваркой образцы из меди были термически обработаны, а остальные подготавливались удалением оксидной пленки. Сварка производилась на вертикальном фрезерном станке со скоростью вращения инструмента от 600 до 1200 об/мин, скорость сварки варьировалась от 25 до 60 мм/мин. Во время сварки материалов с различными температурами плавления был использован технологический приём, приведённый в данной статье ниже, а именно смещение оси инструмента в сторону более легкоплавкого материала.

Также исследовались различные варианты конструктивного оформления кромок деталей: «пила» (стык представляет собой не прилегающие друг к другу плоскости, а волнообразные поверхности, заходящие друг в друга), «скос 60 °», «замок», «шип» и «скос 30 °». Последние представляют собой изменения стыка в плоскости поперечного сечения. Результаты исследования показали, что повышение площади контактирования деталей приводит к лучшим показателям прочности (схемы «пила», «шип» и скосы). Металлографическое исследование показало, что соединения выполнены с полным проваром корневой части шва.

Ещё одним примером применения соединений разнородных металлов являются токоведущие шины из алюминия и медных сплавов. В промышленности для их изготовления часто используют нахлесточное болтовое соединение, которое приводит к уменьшению сечения детали и окислению мест контакта. Применение СТП позволяет исключить данные проблемы [4].

Исследование макрошлифов показывает отсутствие непроваров, а механические испытания подтверждают высокий уровень прочности разнородных соединений. Исследование структуры нахлесточных соединений таких систем, как Ni-Cu, Cu-сталь и Al-Fe, показало, что метод СТП позволяет создать соединение с взаимным проникновением одного металла в другой на глубину от 2 мм (для пластин толщиной от 3 мм). При этом образуются твердые растворы, интерметаллидные соединения и эвтектики, а роль диффузионных процессов менее значительна. Также происходит измельчение структуры сварного шва [9]. Несмотря на то, что данные системы имеют различную растворимость, биметаллические соединения не имеют непроваров в поперечном сечении.

Особенность образования соединений алюминий – сталь заключается в том, что эти металлы имеют различные температуры плавления. При изготовлении соединений Al – Al методом СТП температуры, возникающие в зоне сварки, не превышают 500 °С. Проведённые ранее эксперименты показали, что температура в месте контакта опорного буртика с поверхностью свариваемых изделий не превышает 400 °С при сварке пластин толщиной 2 мм и при оптимальных режимах сварки [10].

При сварке же стальных сплавов температура может достигать 800 °С [11]. При использовании стандартной схемы сварки трением с перемешиванием (рис. 2), когда ось инструмента располагается в плоскости стыка деталей, площади контакта инструмента с пластинами по обе стороны стыка равны, что приводит к неравномерному нагреву (в стальной детали выше 700 °С, а в алюминиевой ниже 500 °С) который вызван различными физико-механическими свойствами деталей. Нагрев стыка выше 660 °С приведёт к плавлению алюминиевой детали. По этой причине для получения соединения алюминиевого сплава со сталью ось инструмента смещают в сторону алюминиевого сплава, при этом обеспечивается перемешивание с образованием качественного шва, а температура не достигает температуры плавления алюминия. Схема получения соединений сталь – алюминий представлена на рис. 3.

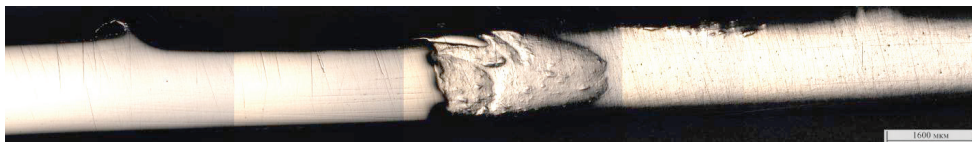


Рис. 4. Микрошлиф поперечного сечения сварного соединения АМГ6 (справа) и 12Х18Н10Т (слева) без травления

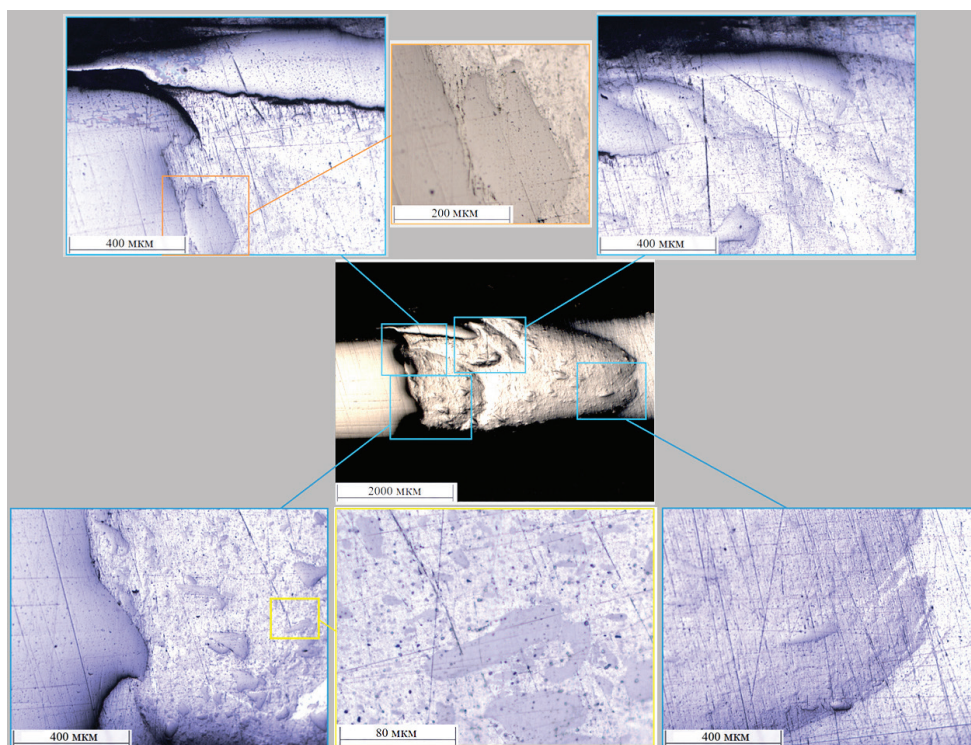


Рис. 5. Укрупненное изображение ядра шва и отдельных его участков

Здесь величина смещения в стальной сплав  $f$  зависит от конкретных условий. На рисунке показана схема получения соединения, в которой направление подачи и направление перемешивания алюминия сонаправлены. Возможно также использование схемы, где данные направления противоположны. Использование данной схемы позволило оценить влияние нанопорошка на механические свойства соединения сталь–алюминий [6], в этом исследовании была достигнута прочность, равная 94 % прочности алюминиевого сплава после 6 проходов.

Использование такой схемы при сварке сплавов SS400 и A5083 толщиной 2 мм с диаметром рабочего стержня 2 мм и длиной 1,9 мм позволило получить шов прочностью, равной примерно 86 % прочности сплава A5083 при величине  $f=0,2$  мм [12]. При других значениях данной величины прочность шва уменьшалась (при  $f=0,4$  прочность 70 %, при  $f=0,6$  прочность 10 %).

Исследование, проведенное авторами данной статьи, показало, что получение качественного разнородного сварного соединения для пластин толщиной 8 мм из сплава АМГ6 и 12Х18Н10Т с использованием инструмента с коническим пином невозможно. Причиной этого является неодинаковая величина смещения  $f$  по всей длине пина, что обусловлено его формой. При величине смещения от 0,1 до 1 мм сварное соединение наблюдалось либо на участке лице-

вой стороны шва, либо на тыльной стороне, но никогда по всей глубине стыка. Следовательно, для сварки с использованием данной схемы необходимо использование инструмента либо с меньшей конусностью, либо цилиндрической формы. Для проверки этой гипотезы был проведён эксперимент по сварке пластин из сплава АМГ6 и 12Х18Н10Т толщиной 2 мм инструментом с меньшей конусностью при  $f=0,2$  мм, частоте вращения  $n=500$  об/мин и величине подачи  $s=50$  мм/мин. Внешние дефекты и дефекты в поперечном сечении, наблюдаемые невооружённым глазом, отсутствуют. Видна чёткая граница между двумя металлами с участками взаимного проникновения металлов на 3,2 мм, при этом соединение наблюдается как в верхней части шва, так и в донной.

На рис. 4–5 представлено изображение микрошлифа данного соединения без травления. В ядре шва преобладает алюминиевый сплав, в нём наблюдаются стальные включения размером до 0,3 мм. Граница перехода между металлами видна чётко, но возле границы наблюдаются включения больших размеров и граница представляет собой ломаную линию. Включения стали отличаются от алюминиевого сплава характерным отличием поверхности (на рис. 4–5 более темные).

По результатам исследования установлено, что метод сварки трением с перемешиванием по-

зволяет получить качественные сварные соединения разнородных металлов, в частности сплава АМГ6 и 12Х18Н10Т.

В ядре шва наблюдается взаимное проникновение частиц металла друг в друга.

Для образования данного соединения важную роль играет механическое перемешивание металлов и подбор величины смещения инструмента  $f$  относительно плоскости стыка, а также режимы сварки.

#### Библиографический список

1. Сидякин В. А., Пономарев К. Е., Хаустов В. С., Арбузов В. М. Некоторые особенности стыковой сварки трубных переходников сталь – титан электрической дугой в инертной среде низкого давления // Вестник НПО имени С. А. Лавочкина. 2011. № 1. С. 49 – 54.

2. Mazda Develops World's First Steel and Aluminum Joining Technology Using Friction Heat. URL: <http://www2.mazda.com/en/publicity/release/archive/2005/200506/050602.html> (дата обращения: 19.12.2018).

3. Automotive Electron Beam Welding (EBW). URL: <https://www.ptreb.com/electron-beam-welding-applications/automotive-welding> (дата обращения: 19.12.2018).

4. Бубенок Е. С. Соединение разнородных металлов сваркой трением с перемешиванием (Cu-Al) // Вестник ДГТУ. 2013. №7/8 (75). С. 42 – 48.

5. Fallahi A. A., Shokuhfar A., Ostovari Moghaddam A. [et al.]. Analysis of SiC nano-powder effects on friction stir welding of dissimilar Al-Mg alloy to A316L stainless steel // Journal of Manufacturing Processes. 2017. Vol. 30. P. 418 – 430. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.09.027.

6. Чуларис А. А., Людмирский Ю. Г., Рзаев Р. А. [и др.]. О возможности диспергирования в условиях сварки трением с перемешиванием // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 7-2. С. 97 – 102.

7. Almar Kar, Sounak K. Choudhury, Satyam Suwas [et al.]. Kailas Effect of niobium interlayer in dissimilar friction stir welding of aluminum to titanium // Materials Characterization. 2018. № 142. P. 402 – 412 DOI: 10.1016/j.matchar.2018.09.007.

8. Рзаев Р. А., Чуларис А. А., Досимов А. С., Наумов А. А., Зотов О.Г. Использование технологических приемов для повышения прочности разнородных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием // Вектор науки ТГУ. 2018. №1 (43). С. 67 – 76.

9. Григоренко Г. М., Адеева Л. И., Туник А. Ю. [и др.]. Особенности структуры сварных соединений металлов с различной растворимостью элементов в твердой фазе, полученных сваркой трением с перемешиванием // Автоматическая сварка. 2014. № 4. С. 13 – 23.

10. Черных И. К., Кривонос Е. В., Матушко Е. Н., Васильев Е. В. Исследование процесса сварки трением с перемешиванием пластин из алюминиевого сплава АМГ6 // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли: материалы XI Всерос. науч. конф., посвящ. памяти гл. конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова, 30–31 мая 2017 г. Омск, 2017. С. 126 – 134. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

11. Cunha P. H., Lemos G. B., Bergmann L. [et al.]. Effect of welding speed on friction stir welds of GL E36 shipbuilding steel // Journal of Materials Research and Technology. 2018. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.014.

12. Kimapong K., Watanabe T. Friction stir welding of aluminum alloy to steel // Welding Journal. 2004. 83 (10). P. 277S – 282S.

**ЧЕРНЫХ Иван Константинович**, инженер кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»; магистрант гр. КТОМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 2858-5441

ORCID: 0000-0003-1239-5647

AuthorID (SCOPUS): 57200720534

**ВАСИЛЬЕВ Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

SPIN-код: 6546-3741

ORCID: 0000-0001-5986-8873

AuthorID (SCOPUS): 56503710300

ResearcherID: L-8864-2014

**ДЫЛЬЧЕНКО Роман Валерьевич**, студент гр. КТО-163 машиностроительного института.

**ЖДАНОВА Юлия Евгеньевна**, аспирантка гр. Ма-182 машиностроительного института.

**ИГИСЕНОВ Базарбай Каирбаевич**, магистрант гр. КТОМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: vnchrnk@gmail.com

#### Для цитирования

Черных И. К., Васильев Е. В., Дыльченко Р. В., Жданова Ю. Е., Игисенов Б. К. Особенности сварки разнородных металлов методом сварки трением с перемешиванием // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 21 – 25. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-21-25.

Статья поступила в редакцию 24.12.2018 г.

© И. К. Черных, Е. В. Васильев, Р. В. Дыльченко, Ю. Е. Жданова, Б. К. Игисенов