

Муравьёв В.И., Бахматов П.В., Мелкоступов К.А.  
V.I. Muravyev, P.V. Bakhmatov, K.A. Melkostupov

**К ВОПРОСУ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ  
С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**ON THE ISSUE OF USING FRICTION STIR WELDING (FSW) TECHNOLOGY  
FOR WELDING OF HIGH DUTY ALUMINUM ALLOYS**

**Муравьёв Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ГОУВПО «КнАГТУ» (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.

**Mr. Vassily I. Muravyev** – Doctor in Engineering, Professor, Chief Researcher at Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент ГОУВПО «КнАГТУ» (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.

**Mr. Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru

**Мелкоступов Константин Александрович** – аспирант ГОУВПО «КнАГТУ» (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.

**Mr. Konstantine A. Melkostupov**, PhD candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

**Аннотация:** Проведен анализ литературных источников промышленного применения сварки трением с перемешиванием (СТП), технологических схем, материала и конфигурации рабочих инструментов, оборудования и оснастки. Показано, что СТП находит применение во всех отраслях машиностроения (судо-, авиа-, ракетостроение и др.). Установлено, что при всем многообразии публикаций отсутствуют фундаментальные работы, позволяющие в полной мере охарактеризовать физическую сущность процесса, и носят преимущественно прикладной характер решения задачи изготовления конкретной конструкции. Определены заслуживающие внимания направления исследований.

**Summary:** Relevant literature is reviewed on such issues as FSW in industrial use, process design, operating tools' material and configuration, equipment and tooling. It was shown that the FSW technology is used in all engineering fields (shipbuilding, aviation and aerospace engineering, etc.) It is revealed that fundamental works fully characterizing the physical nature of the FSW processes are lacking despite the abundance of publications on the matter, and they mainly present some of the applied aspects of the technology like solutions for welding of particular structures. Most promising research trends in this area are identified.

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, сварные соединения и конструкции, рабочий инструмент, режимы сварки, сварочное оборудование.

**Keywords:** friction Stir Welding, aluminum alloy, welded joints and structures, operating tools, welding regimes, welding equipment.

УДК 621.791.1

Конструкция цельносварного фюзеляжа пассажирского самолета из алюминиевых сплавов имеет значительные преимущества по сравнению с традиционной клепанной: более низкие трудоемкость и цикл изготовления, массу, статическую и циклическую прочность, ресурс, а также более высокие показатели герметичности и коррозионной стойкости [1, 2].

Фрезерование – единственный технологический процесс создания оребренных панелей летательных аппаратов, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов. В процессе фрезерования основная масса металла заготовки преобразуется в стружку (процент использования металла – 2-3).

Оребренные панели после фрезерования подвергаются формообразованию путем натяжки на специальные эталоны. На эту операцию также даются значительные технологические припуски. С целью уменьшения материалоемкости используют приваренные контактной сваркой технологические пластины, которые зачастую не выдерживают прилагаемых нагрузок.

Переход к сварке панелей позволил бы не только значительно уменьшить материалоемкость производства, но и снизить энерго- и трудозатраты при их изготовлении.

Известно [3], что свариваемость высокопрочных алюминиевых сплавов при сварке плавлением неудовлетворительная из-за склонности образования горячих трещин. Кроме того, сварное соединение обладает повышенной хрупкостью и пониженной коррозионной стойкостью.

Наиболее перспективным методом для решения указанной проблемы является способ СТП [4]. В базовом процессе (см. рис. 1) СТП, известном в России с 1967 г. и реализованном за рубежом в 90-х гг., вращающийся инструмент, содержащий корпус 1, рабочий стержень 2 с различным рельефом поверхности и опорный бурт 3, медленно погружают в стык деталей 4 и 5 на глубину, примерно равную толщине соединяемых кромок; при этом опорный бурт (запечник) опирается на поверхность кромок. Материал кромок за счет теплоты, выделяющейся при трении, нагревается до пластичного состояния, вследствие чего уменьшается усилие, действующее на инструмент. При поступательном перемещении вращающегося инструмента по стыку пластическое течение выносит материал в зону, освобождающуюся позади движущегося инструмента. При этом образуется шов.

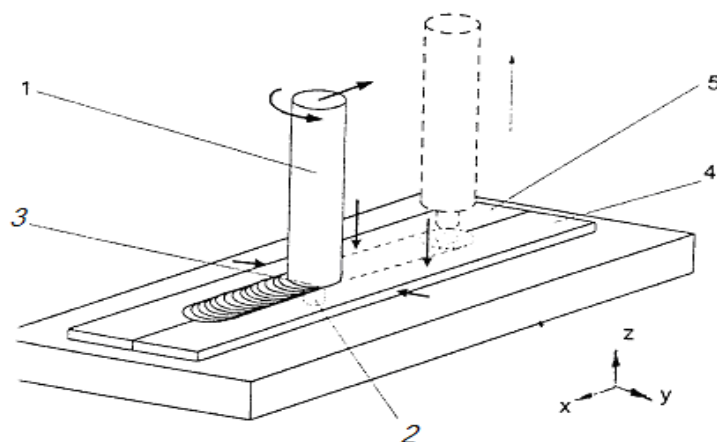


Рис. 1. Схема процесса СТП: 1 – корпус инструмента;  
2 – рабочий стержень; 3 – опорный бурт (запечник); 4, 5 – детали

По данным литературных источников основными преимуществами СТП по сравнению со способами сварки плавлением являются следующие:

- возможность получения бездефектных швов на сплавах, склонных в процессе сварки к образованию горячих трещин и пористости в металле шва;
- сохранение в значительной мере свойств основного металла в зоне сварки;
- отсутствие необходимости в присадочном металле, применении защитного газа; удалении поверхностных оксидов на свариваемых кромках перед сваркой, шлака и брызг после сварки;
- малый расход энергии;
- отсутствие потерь легирующих элементов в металле шва;

- отсутствие особых требований к процессу сварки;
- практически полное отсутствие коробления и термической деформации;
- отсутствие вредных испарений и ультрафиолетового излучения в процессе сварки;
- возможность сварки практически всех типов сварных соединений во всех пространственных положениях (см. рис. 2).

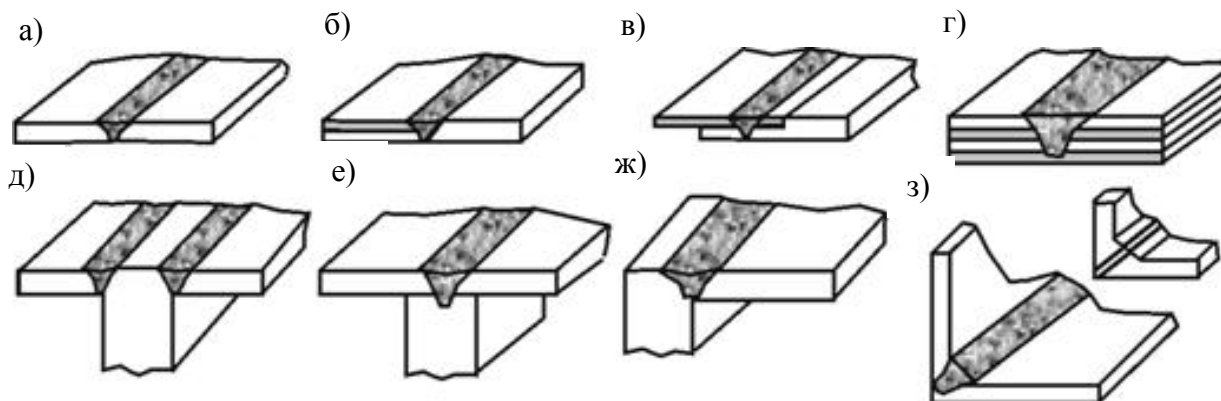


Рис. 2. Типы сварных соединений, выполняемых СТП: а – стыковое; б – нахлесточно-стыковое; в – нахлесточное; г – многослойное нахлесточное; д – двухпроходное тавровое; е – тавровое прорезное; ж, з – угловое

Работы по перемешивающей и другим технологиям сварки трением выполняются и курируются The Welding Institute in UK (TWI) (Великобритания), NASA, Lockheed-Martin Corp., Boeing, Wisconsin Center for Space Automation & Robotics, Oak Ridge National Laboratory MTS Systems Corporation, Thompson Friction Welding (США), Imhof Hartchrom GmbH и Klaus Raiser GmbH (Германия), Hidetoshi Fujii и исследовательским центром JWRI при Osaka University (Япония), Shanghai puda friction welder co., ltd. (Китай) и другими корпорациями и компаниями.

В РФ и Украине разработками по СТП занимаются Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины; ГКНПЦ им. М.В. Хруничева; ОАО «НИАТ»; Тульский государственный университет; КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева; РКЗ ГК НПЦ им. М.В. Хруничева; НТУУ «Киевский политехнический институт»; ФГУП «РСК МиГ»; ОАО «ОКБ Сухого».

### Инструмент

Одним из важнейших факторов, наиболее заметно влияющих на структуру шва и формирование соединения при СТП, является конструкция инструмента, особенно геометрия таких его элементов, как рабочий стержень и опорный бурт. Они контактируют с материалом, нагретым за счет работы сил трения до пластичного состояния, и формируют потоки пластического течения. При этом сам инструмент и особенно его рабочий стержень подвергаются высоким термомеханическим нагрузкам. На разогретый рабочий стержень одновременно действуют крутящий момент и знакопеременные циклические изгибающие силы.

На сегодняшний день по способу СТП получено более 500 патентов, из них практически 80 % составляют патенты, выданные применительно к конфигурации самого инструмента. Поэтому перечислять разновидности рабочего инструмента можно бесконечно.

Из заявленных вариантов можно выделить основные признаки: конусную форму стержня; разную форму его поперечного сечения; наличие на конусной поверхности стержня, по меньшей мере, одного среза, выступа, витка спиральной нарезки или каких-либо других фрагментов, интенсифицирующих процессы перемешивания и пластического течения материала.

**Муравьев В.И., Бахматов П.В., Мелкоступов К.А.**

**К ВОПРОСУ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ (СТП)  
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

ла (см. рис. 3). Длина стержня зависит от толщины соединяемых деталей, а отношение его диаметра в зоне опорного бурта к длине составляет примерно от 4:1 при толщине кромок 3 – 6 мм и до 1:1 – при толщине кромок 15 – 25 мм. Наиболее полное описание применяемых рабочих инструментов (РИ) приведено в работе [5].

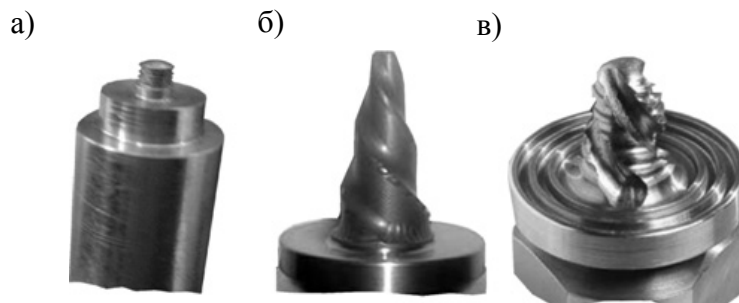


Рис. 3. Рабочие части инструментов, используемых при СТП:  
а – традиционная конструкция инструмента; б – инструмент для получения глубоких швов; в – инструмент со специальной формой торца

Инструменты для СТП изготавливают из инструментальных сталей (сварка пластиков и легкоплавких металлов), быстрорежущих сталей (сварка алюминиевых и магниевых сплавов), металлокерамических твердых сплавов и минералокерамик, специальных композиционных материалов (сварка алюминиевых сплавов, сталей, сплавов на никелевой и титановой основах). При выборе инструментального материала стремятся избежать намазывания отсеченного металла на поверхности инструмента. Для этих целей могут быть использованы специальные покрытия.

При СТП достигается высокое качество сварки. Деформация и перемешивание металла в твердой фазе иногда создают микроструктуры более прочные, чем основной материал. Обычно прочность на растяжение и усталостная прочность сварного шва составляет 90 % от этих характеристик для основного материала. Сварка может выполняться в различных позициях (вертикальной, горизонтальной, под наклоном, снизу вверх и т.д.), поскольку силы гравитации в данном случае не играют никакой роли. Перемещение инструмента или детали может производиться в различных направлениях и по программе.

### **Режимы**

Основными параметрами режима СТП являются:

- скорость вращения инструмента;
- характер вращения инструмента (вращательный, возвратно-вращательный, направление и скорости вращения наружных и внутренних частей инструмента);
- скорость сварки;
- конструкция, форма и геометрические характеристики рабочей части инструмента;
- угол наклона инструмента к поверхности детали.

Поскольку основные исследования СТП носят коммерческий характер и финансируются так называемыми Group Sponsored Project, то технологическая информация в публикациях ограничена и главным образом касается скоростей сварки и вращения инструмента.

Как видно из рис. 4, сплавы серии 6000 можно сваривать в более широком диапазоне режимов, чем сплавы серии 5000.

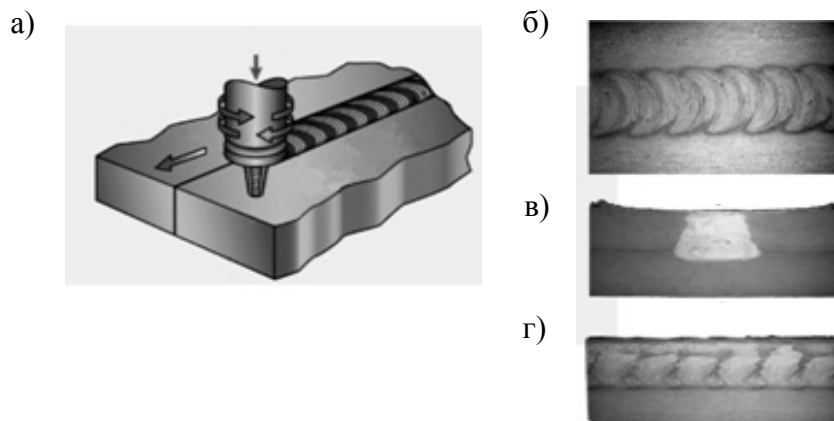


Рис. 4. СТП с возвратно-вращательным движением инструмента: а – схема сварки; б – вид сварного шва; в – сечение, перпендикулярное направлению шва; г – сечение вдоль шва

### Оборудование

СТП может быть осуществлено на модернизированном вертикальном фрезерном станке (см. рис. 5, г), но конфигурация его рабочей зоны ограничена для создания сварных конструкций протяженных габаритов, поэтому в настоящее время большое число фирм в разных странах производят оборудование для СТП, которое может быть классифицировано по конфигурации на три типа: консольный (см. рис. 5, а), порталный (см. рис. 5, б), орбитальный (см. рис. 5, в).

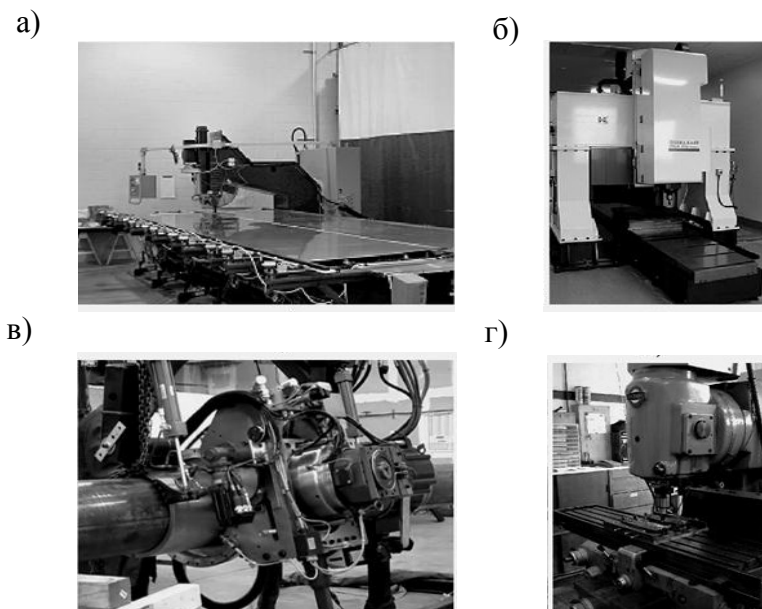


Рис. 5. Оборудование для сварки трением с перемешиванием: а – консольного типа; б – порталного типа; в – устройство для сварки труб; г – установка на базе модернизированного фрезерного станка

**Муравьев В.И., Бахматов П.В., Мелкоступов К.А.**

## К ВОПРОСУ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ (СТП) КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Британский институт сварки (TWI) разработал серию машин типа FW для СТП деталей размером до  $3,4 \times 4$  м, толщиной до 15 мм (односторонняя сварка) и до 50 мм (двусторонняя). В Галифаксе (Великобритания) компания Crawford Swif изготовила для компании BAE System в Филтоне трехкоординатную установку Power Stir™-360, рассчитанную на усилие 100 кН. Эта установка предназначалась для СТП экспериментальных конструкций крыльев и обшивки фюзеляжа больших самолетов, в частности AIRBUS A3xxx и других самолетов.

Американская фирма NOVA-TECH Engineering производит промышленные и экспериментальные установки типа H10K, C10K, G10K, V10K, V30K, P30K, H30K для СТП кольцевых и продольных соединений емкостей. Установки рассчитаны на усилие до 45 кН по оси шпинделя и до 22 кН по нормали к оси шпинделя. Имеется система компьютерного цифрового контроля по CNC-программе усилий для регулирования положения инструмента относительно поверхности деталей с регистрацией данных.

MTS System Co (США) в сотрудничестве с другими компаниями получила несколько патентов по конструкции сварочной головки и инструментов, а также разработала систему управления положением инструмента относительно поверхности стыка, применение которой обеспечило возможность соединения элементов двойной кривизны.

В последние годы в КНР так же расширяется разработка и применение СТП. Создан специализированный Центр СТП, в котором изготавливаются установки разных типов.

### **Промышленное применение**

Основные области применения СТП [5, 8] – это судостроение (палубные надстройки, переборки, элементы корпуса); аэрокосмическая промышленность (элементы фюзеляжа, крыльев, топливные и баки криогенных жидкостей, корпуса ракет); железнодорожный транспорт и метро (корпуса вагонов, рамы и основания поездов метро); автомобильная промышленность (узлы крепления двигателя, диски колес, рамы автомобилей); электротехническая промышленность (корпуса электромоторов, токоподводы, параболические антенны, шины); строительная индустрия (алюминиевые мосты, алюминиевые трубопроводы, теплообменники и кондиционеры); пищевая промышленность (ёмкости для пива, упаковка) и пр. Этот перечень можно продолжать бесконечно. Особенно эффективна СТП при массовом производстве деталей.

Примером успешного применения СТП могут быть следующие:

В 1999 г., используя достижения фундаментальной науки и новых технологий обработки алюминия, была предложена концепция «A-train» для изготовления пассажирского электроподвижного состава, которая основывалась на идее использования двусторонних крупногабаритных несущих панелей, изготовленных из алюминия, и модульной конструкции самого корпуса вагона. За счет технологических нововведений повысилось качество изготовления при уменьшении затрат, снизился уровень шума внутри вагона, повысилась стойкость к ударным нагрузкам и увеличилась жесткость конструкции.

Концепция A-train была бы трудноосуществима без развития эффективной технологии сварки крупногабаритных алюминиевых конструкций.

До недавнего времени для сборки корпусов вагонов применялась технология дуговой сварки (MIG, MAG и др.). Но все эти технологии основываются на нагреве материала выше точки плавления, что приводит к деформации готовой конструкции после остывания шва. В 1993 г. Институтом сварки Великобритании (TWI) была предложена и запатентована технология сварки трением FSW (friction stir welding) (см. рис. 6).

Ее доведение до промышленных образцов было выполнено международным консорциумом, в состав которого входила и компания «Hitachi», а часть работ выполнялась в корпоративной исследовательской лаборатории. В 1998 г. на заводе Kasado компании Hitachi вступила в строй установка для сварки деталей длиной до 3 м, а в 1999 г. – для 25-метровых.

НАСА проявила большую заинтересованность в развитии процесса СТП в США применительно к производству аэрокосмических изделий. Компания «Боинг» первой в США приобрела опытную, а затем (в 1998 – 1999 гг.) три промышленные установки фирмы ESAB со встроенной компьютерной системой контроля и видеонаблюдения за процессом, предназначенные для изготовления баков ракет серии «Дельта» (см. рис. 7). Однако прежде чем приступить к промышленному использованию процесса СТП, в США проводят интенсивные исследования и разработки с целью «собственного понимания процесса». На исследования и приобретение оборудования компания «Боинг» израсходовала 15 млн долл.



Рис. 6. Сравнение скорости сварки и частоты вращения инструмента, позволяющие получать качественные соединения алюминиевых сплавов серии 5000 и 6000 толщиной 5 мм



Рис. 7. Закрепление панелей в установке для СТП продольных швов цилиндра бака ракеты «Дельта II – IV»

ЭСАБ Инжиниринг применила промышленную установку ESAB SuperStir для изготовления алюминиевых панелей размером 6 × 16 м (см. рис. 8) корпусов скоростных катеров и крупнокорпусных паромов.

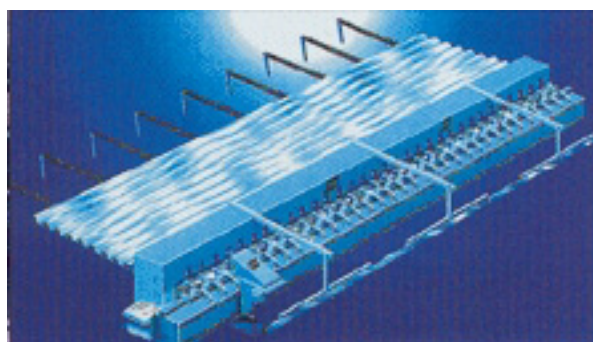


Рис. 8. Сварка панелей морских судов на установке ESAB

Одной из разновидностей СТП является точечная сварка трением. В частности, она получила применение для сварки алюминия взамен дуговой и контактной точечной сварки, при применении которых существуют технологические трудности, обусловленные высокой электро- и теплопроводностью алюминия. На заводе Mazda Motor Corp. задние двери из алюминия автомобиля Mazda-RX8 сваривают точечной сваркой трением (см. рис. 9, 10).

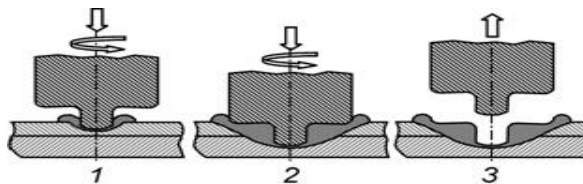


Рис. 9. Стадии формирования сварного соединения при точечной сварке трением: 1 – стадия ввода рабочего стержня; 2 – стадия формирования сварной точки; 3 – стадия вывода рабочего стержня из зоны сварки

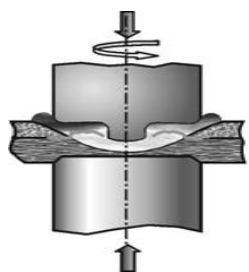


Рис. 10. Схема точечной сварки трением, используемая фирмой MAZDA, и устройство для ее выполнения

## Дефекты

Самый распространенный дефект сварных соединений, выполненных СТП, – это возникновение отверстий в месте выхода рабочего инструмента из стыка в конце шва. Для решения этой проблемы, в частности в кольцевых швах, отверстие может быть выведено за пределы шва использованием специальной клиновидной вставки (см. рис. 11). В дальнейшем эта вставка удаляется механической обработкой.

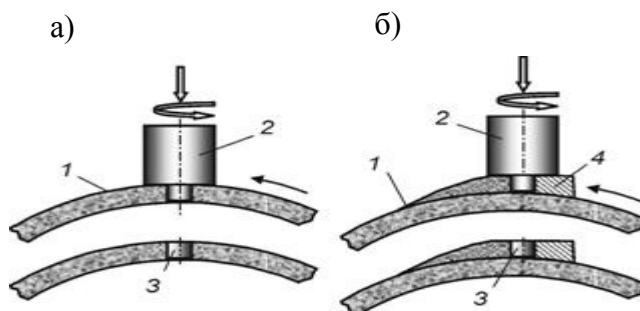


Рис. 11. Получение кольцевого шва без использования клиновидной вставки (а) и с вставкой (б): 1 – кольцевой шов; 2 – инструмент; 3 – отверстие, остающееся после отвода инструмента; 4 – клиновидная вставка

В работе [6] для решения этой проблемы авторы применили разработанный ими сварочный инструмент с подвижным рабочим стержнем. На рис. 12, а приведена схема внедрения стержня РИ и вывода из шва.



В начале процесса вращающийся РИ с убранным в корпус инструмента рабочим стержнем опускают до требуемого контакта опорного бурта с поверхностью соединяемых кромок; с этого момента начинают внедрять рабочий стержень в стык, а движение по вертикали корпуса с опорным буртом прекращают. При этом одновременно производят перемещение вращающегося инструмента вдоль линии стыка. После полного оборота и перекрытия начального участка шва на 40 – 50 мм рабочий стержень инструмента постепенно выводят из стыка, затем отводят РИ от поверхности детали, прекращают его перемещение по линии стыка и отключают вращение. На продольном микрошлифе (см. рис. 12, б) видно, что при этом конечный участок сварного шва формируется без дефектов.

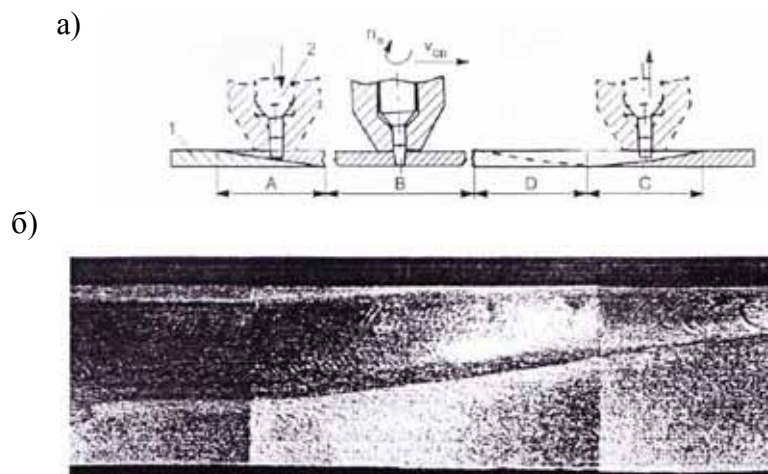


Рис. 12. Схема введения в стык и выведения из него рабочего стержня сварочного инструмента (а) (А, С – зоны ввода и вывода инструмента, В – зона шва без перекрытия, D – зона перекрытия начала шва): 1 – листовая заготовка ( $\delta = 4$  мм); 2 – инструмент, продольный макрошлиф конечного

Авторами работы [7] описан РИ (см. рис. 13), позволяющий выполнять сварку, не меняя инструмент для каждой толщины шва, а устанавливая вылет рабочего стержня относительно опорного бурта, соответствующего толщине детали. Благодаря этому появилась возможность сваривать детали переменного сечения соединяемых кромок. Кроме того, этот РИ позволяет вводить присадочный металл в шов вблизи рабочего стержня.

По мнению большинства исследователей, основным специфическим дефектом соединений, выполненных СТП, является несплавление в корне шва. Основными причинами возникновения этого дефекта является либо локальное увеличение толщины свариваемого металла, либо нарушение переноса металла в корневую часть соединения. Устранению этого дефекта способствует применение подкладок с канавкой, в которую вдавливаются металл, формируя небольшой валик. Затем он удаляется механической обработкой, обеспечивая высокое качество корневой части соединения.

Одним из небольших недостатков соединений, выполненных СТП, является образование незначительного уменьшения толщины металла в области соединения за счет контакта заплечника инструмента и поверхности заготовок. Обычно эта величина составляет 0,1 – 0,2 мм, однако в некоторых случаях это может оказать влияние на прочность соединений. Для устранения этого недостатка рекомендуется создавать в месте стыка утолщение, равное по ширине диаметру заплечника. Особенно эффективен этот способ при наличии зазора в стыке.

При СТП формируется шов, в структуре которого можно выделить несколько основных зон: «ядро» сварки, состоящее из термопластически деформированного материала, перенесенного выступом инструмента, зону термопластической деформации и зону термического влияния (ЗТВ).

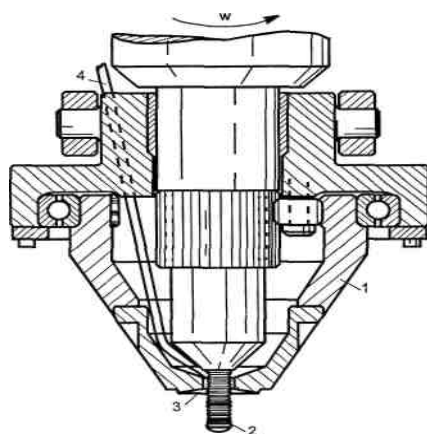


Рис. 13. Инструмент для СТП с регулируемым вылетом рабочего стержня относительно опорного бурта, вращением их в разных направлениях (от одного привода) и подачей в зону сварки присадки

При традиционной схеме СТП наблюдается асимметричная структура «ядра», связанная с однонаправленным перемещением материала. Для того чтобы избежать такой асимметрии, сварку выполняют с возвратно-вращательным движением инструмента (см. рис. 14). В этом случае реверс производится через один или несколько оборотов инструмента.

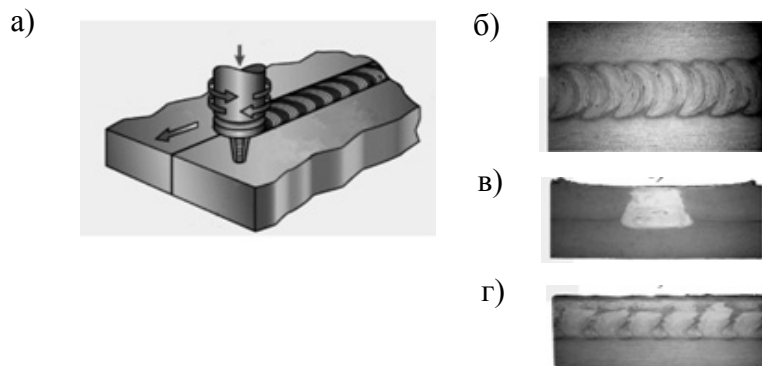


Рис. 14. СТП с возвратно-вращательным движением инструмента: а – схема сварки; б – вид сварного шва; в – сечение перпендикулярное направлению шва; г – сечение вдоль шва

Для управления структурой шва могут использоваться специальные инструменты, имеющие наружную и внутреннюю части (см. рис. 15). Вращение этих частей может выполняться с различными скоростями в одном или противоположных направлениях. Наружная часть может выполняться, например, из материала свариваемых деталей. В этом случае в процессе сварки она играет роль присадочного материала, переносимого на поверхность свариваемого изделия.

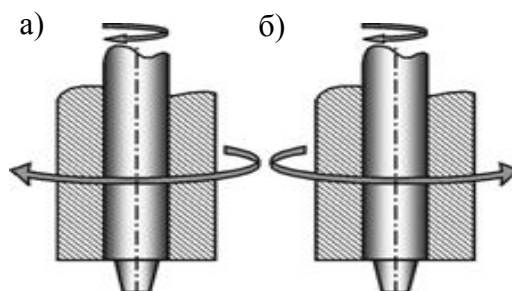


Рис. 15. Инструменты с наружной и внутренней частями, вращающимися в одном (а) и противоположных (б) направлениях

### Прочность сварных соединений

Сравнительные исследования свойств соединений СТП высокопрочных алюминиевых термически не упрочняемых и термически упрочняемых сплавов, например сплавов 5083 (группы Al-Mg) и 6082 (группы Al-Si-Mg), показали, что по пределу прочности соединение сплава 5083 близко к основному металлу (коэффициент прочности  $\sigma_{\text{в соедин}} / \sigma_{0,2 \text{ осн}} \geq 0,9$ ). Для соединения сплава 6082 коэффициент прочности снижается до 0,65 вследствие разупрочнения ЗТВ, по которой при испытании идет разрушение. У сварных образцов сплава 5083 разрушение происходит в зоне ядра шва.

### Исследования пластического течения металла при СТП

В табл. 1 приведена классификация методик проведенных исследований пластического течения материала в процессе СТП.

Приведенные методики исследования пластического течения материала при СТП позволяют наблюдать перемещение материала лишь после окончания процесса сварки либо проследить расположение потоков дискретно, фиксируя текущее положение процесса остановами на «месте». По-видимому, правильнее вести речь о результатах экспериментального исследования не пластического течения, а массопереноса.

Анализ публикаций позволяет представить следующую феноменологическую связь в процессе СТП: режим сварки (частота вращения инструмента, скорость сварки) – термомеханические процессы (температура нагрева, усилия на инструменте) – пластическое течение (тепломассоперенос) – формирование структуры соединения (ядро, ЗТВ) – свойства соединения (прочность, плотность и др.). Однако не всегда указывается, инструментом какой конструкции выполнялась сварка экспериментальных образцов. Детали конструкции инструмента не учитываются также при моделировании процесса, тогда как конструкция инструмента является параметром, не менее значимым по влиянию на термомеханические процессы, чем параметры режима сварки. Поэтому результаты таких сообщений справедливы лишь для конструкции конкретного инструмента.

Основными факторами, ограничивающими применение СТП, в настоящее время являются:

- необходимость жесткого закрепления свариваемых деталей;
- необходимость проектирования и изготовления специальных инструментов;
- невозможность формирования швов, требующих нанесения дополнительного металла;
- невозможность сварки материалов, имеющих низкую пластичность даже при высоких температурах или теряющих требуемые механические свойства в результате термопластической деформации.

Методики, использованные для определения характера пластического течения металла в процессе СТП

Таблица 1

№ п.п.	Характер	Специфика	Содержание	Результат	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	Методы исследования для выявления течения материала в зоне перемешивания	Методики, основанные на размещении в процессе сборки под СТП различных маркеров, по перемещению которых стыка судят о перемещении материала в зоне сварки; наблюдаются после сварки на рентгенограммах	Техника остановки потока «на месте» Роль маркеров выполняют стальные шарики диаметром 0,38 мм, помещенные в канавках торцов соединяемых кромок Маркеры – медные шпильки, размещенные в кромках соединяемых алюминиевых пластин	Примерное представление о перемещении материала	Методики дают качественную картину массопереноса, а не детализируют процесс пластического течения
2					
3					
4			Для маркирования применяют медную фольгу, размещенную в стыке между соединяемыми кромками пластин		
5	Методы исследования для выявления течения материала в зоне, прилегающей к вращающемуся инструменту		В качестве маркера использован композиционный материал Al-SiC, который в виде прокладок толщиной 0,6 мм размещали между верти-кально установленными пластинами из алюминиевого сплава 7050-T7 толщиной 6,35 мм (см. рис. 16)	Частицы композита SiC микронного размера хорошо видны на непрозрачной поверхности шлифов, изготовленных с сохранением в них остановленного «на месте» рабочего стержня инструмента	Показано, что материал перемещается в направлении его вращения, а также из корневых зон в верхние

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
6		Для анализа течения материала в процессе СТП построены томографические модели. Для этого с помощью двумерных изображений, получаемых рентгеновским просвечиванием под разными углами (360 градусов через 1° относительно оси вращения), строили трехмерную модель, которой можно манипулировать в реальном времени на мониторе компьютера	В качестве материала маркера использована медная отожженная фольга толщиной 0,1 мм, размещенная в стыке	На приведенных зависимостях (см. рис. 19) видно, что при использовании в качестве маркера медной фольги толщиной 0,1 мм при СТП сплавов 2024-T3 + 2024-T3 (кривая 1) маркер практически не влияет на термомеханику процесса, в то время как при СТП сплавов 6082-T6 + 2024-T3 (кривая 2) с таким же маркером влияет заметно, снижая достоверность результатов	Метод не всегда позволяет выявить детали пластического течения из-за недостаточной разрешающей способности оборудования, а также вследствие разрушения медного маркера вблизи инструмента на мелкие частицы, которые не выявляются при рентгенографии. Поэтому в качестве дополнительного эффективного средства авторы привлекают металлографию; частицы маркера четко наблюдаются на негравлированных шлифах
7	Исследования пластического течения при СТП различных алюминиевых сплавов		Исследовано формирование соединений различных алюминиевых сплавов в результате пластического течения материала с четким изобращением участков каждого из сплавов, что обусловлено разной их травимостью (см. рис. 17)	Участки имеют форму, вытянутую в направлении вращения инструмента и соответственно в направлении пластического течения материала	В работах отмечено существенное влияние параметров сварки на течение металла и его перемешивание. Приведенная методика позволяет наблюдать за массопереносом, однако, при менее детальном исследовании кинетики процесса пластического течения
8		Исследования поведения оксидных частиц при пластическом течения материала в процессе СТП	Мелкие оксиды, полученные измельчением и перемешиванием поверхности оксидной пленки, осаждаются на алюминиевых частицах микронного размера, обволакивают их, увеличивая их объем и травимости	Расположение частиц хорошо видно на шлифах, как и при использовании медных маркеров (см. рис. 18)	

Кроме того, до настоящего момента отсутствуют:

1. Фундаментальный подход к оценке механизма образования сварного соединения при СТП:

- нет однозначного понимания физики образования сварного соединения;
  - отсутствует трактовка условий образования сварных соединений;
  - нет увязки формообразования сварного соединения с теплофизическими свойствами свариваемых изделий и распределением теплового потока, образующегося в процессе трения;
  - не произведены исследования, оценивающие влияние формы РИ, его свойств и состояния на формообразование сварного соединения;
  - практически отсутствуют работы, в которых учитывалось влияние первоначального состояния основного металла и последующей термообработки сварного соединения на его структуру и свойства;
  - отсутствует информация по исследованию угловых швов в тавровых, угловых и нахлесточных соединениях;
- нет учета влияния подготовки свариваемых кромок на качество сварных соединений, их структуру и свойства.

2. Методология выбора РИ, параметров режима сварки, дополнительных мероприятий (ультразвуковые (УЗ) колебания, подогрев и т.п.) различных металлов с сечениями сварных швов разной конфигурации.

3. Информация о СТП сложных ребренных панелей ответственного назначения.

4. Рекомендации по разработке оснастки для СТП (используемые материалы, расчет прижимов и т.п.).

5. Данные по оценке деформаций и остаточных напряжений сварных соединений.

6. Работы, связанные с испытаниями на циклическую прочность сварных соединений, что недопустимо при разработке технологических процессов СТП и создании ответственных конструкций.

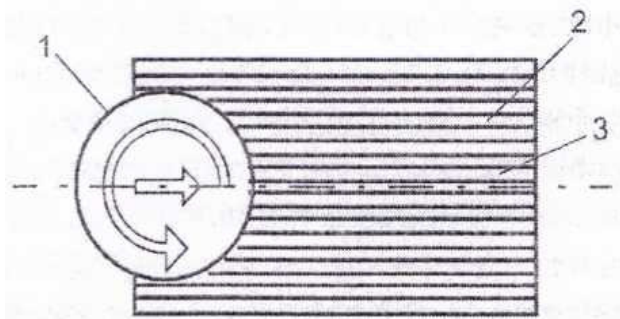


Рис. 16. Схема СТП с поступательным перемещением вращающегося инструмента 1, погруженного в пакет пластин 2 из сплава 7075 с прокладками 3 из композитного материала Al – SiC (ось инструмента параллельна плоскости пластин)

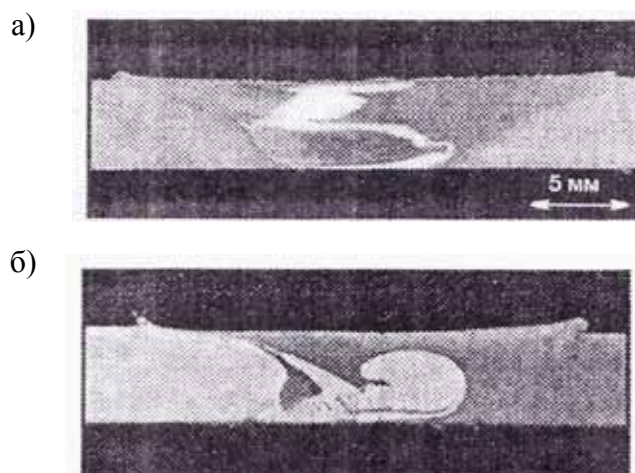


Рис. 17. Макроструктура швов, выполненных СТП алюминиевых сплавов 6082 + 5083 (а) и 6082 + 6082 (б) со вставкой из сплава 5063

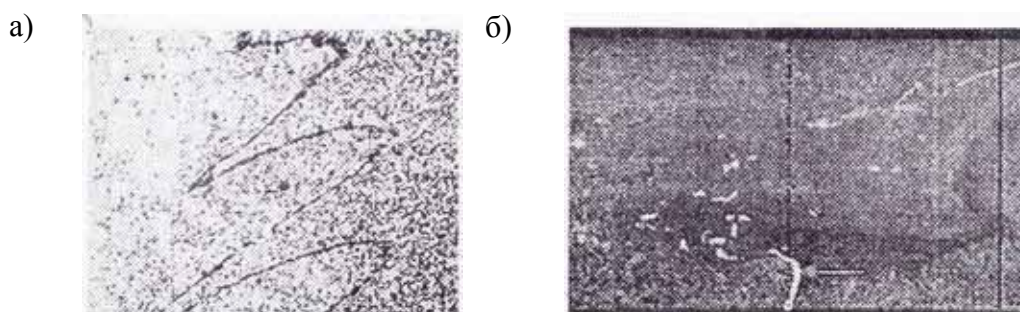


Рис. 18. Расположение на протравленном шлифе (x250) в горизонтальном сечении шва частиц оксида (СТП алюминия Al 99,95) (а) и меди (СТП сплава 2024-T3) (б)

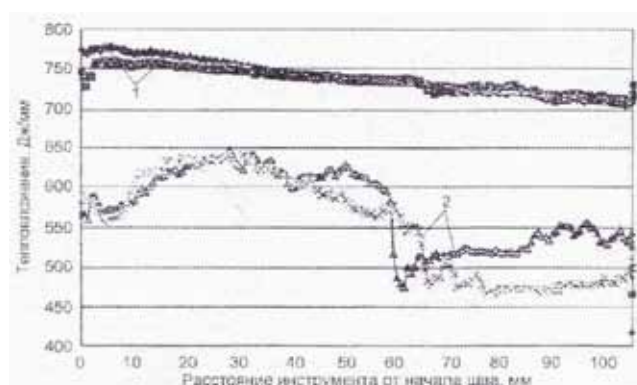


Рис. 19. Зависимость тепловложения в шов от расстояния инструмента от начала шва при СТП (по два образца толщиной 3 мм на каждое сочетание сплавов, маркер расположен в стыке, начиная с 65 мм от начала шва и до 105 мм (конец шва))

### **Выводы**

1. Большое количество публикаций, как зарубежных, так и отечественных, характеризует огромный интерес к процессу СТП как наиболее актуальный при разработке технологических процессов создания изделий из конструкционных материалов, ограниченно свариваемых или не свариваемых сваркой плавлением.

2. Публикации не дают исчерпывающей информации по объяснению феномена образования структуры ядра в центре сварного соединения. Для этой цели необходимо проводить всесторонние фундаментальные исследования механизма формирования сварного соединения при СТП.

3. Большинство авторов описаны технологические схемы СТП с использованием определенной конфигурации РИ и режимов сварки, выбранных либо инстинктивно, либо по опыту предыдущих исследователей. Тем самым можно умозаключить факт отсутствия методологии выбора взаимосвязанных формы РИ и параметров режима СТП применительно к конкретной конфигурации поперечного сечения шва и физико-механических свойств свариваемого металла. Решением этой проблемы могут стать лишь исследования этих взаимосвязей как экспериментальные, так и анализ результатов уже опубликованных данных.

4. Очень ограничена информация по промышленному применению СТП в РФ.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Рязанцев, В.И. Технологические аспекты сборки-сварки цельносварного пассажирского самолета из алюминиевых сплавов / В.И. Рязанцев, В.А. Федосеев, В.Н. Мацнев // Технология машиностроения. – 2001. – № 6. – С. 23-26.
2. Приоритеты авиационных технологий: В 2 кн. / науч. ред. А.Г. Братухин. – М.: МАИ, 2004. – Кн. 1. Гл. 1-12. – 696 с.
3. Металловедение в сварке плавлением / В.Ф. Грабин. – Киев: Наук. Думка, 1982. – 416 с.
4. International Patent Application no. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application no. 9125978.9 / Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Church M.G., Templesmith P., Dawes C.J. (1991).
5. Третьяк, Н.Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) / Н.Г. Третьяк // Автоматическая сварка. – 2002. – № 7. – С. 12-21.
6. Половцев, В.А. Фрикционная сварка алюминиевых лайнеров металлокомпозитных баллонов высокого давления / В.А. Половцев, Н.В. Макаров, Г.В. Шило [и др.] // Сварочное производство. – 2007. – № 12. – С. 24-27.
7. Штрикман, М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений: в 3 ч. Ч. 2. Совершенствование инструмента и технологических схем сварки / М.М. Штрикман // Сварочное производство. – 2007. – № 10. – С. 25-32.
8. Штрикман, М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений: в 3 ч. Ч. 3. Промышленное применение процесса СТП / М.М. Штрикман // Технология машиностроения. – 2007. – № 11. – С. 36-45.
9. Штрикман, М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (аналитический обзор) Ч. 1 / М.М. Штрикман // Сварочное производство. – 2007. – № 9. – С. 35-40.