

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ РАЗНОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

© 2018

Р.А. Рзаев, старший преподаватель кафедры «Материаловедение и технология сварки»
Астраханский государственный университет, Астрахань (Россия)

А.А. Чуларис, доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства»
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону (Россия)

А.С. Досимов, магистрант
Астраханский государственный университет, Астрахань (Россия)

А.А. Наумов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и исследование материалов»
О.Г. Зотов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и исследование материалов»
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург (Россия)

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; разнородные материалы; стыко-нахлесточное соединение; биметаллические соединения; сварка в твердой фазе.

Аннотация: Технология получения разнородных соединений сопряжена с трудностями из-за различия их теплофизических и иных свойств, а также особенностей процесса образования соединений. Решением проблем свариваемости биметаллических соединений является использование сварки трением с перемешиванием (СТП). Работа посвящена изучению механических свойств стыковых, стыко-нахлесточных, нахлесточных (LAP) соединений алюминиевых АД1 и медных М1 сплавов, алюминиевых АД1 сплавов и легированных сталей (12Х18Н10Т), алюминиевых АД1 и ОТ4-1 сплавов.

Предметом анализа является конструктивное оформление кромок свариваемых деталей при СТП и поэтапный анализ процесса формирования стыковых, нахлесточных, тавровых, комбинированных соединений меди с алюминием с учетом параметров режимов сварки. Проанализированы факторы, влияющие на прочность разнородных соединений алюминиевого АД1 и медного М1 сплавов, выполненных с помощью СТП. Изучено влияние геометрии подготовленных кромок деталей на формирование бездефектных и прочных сварных соединений. Показаны перспективные направления конструктивного оформления различных вариантов стыковых соединений (стыко-нахлесточных: в скос 30...60°, в замок, в шип) за счет повышения фактической площади контактирования деталей, воспринимающих при нагружении нормальные или касательные напряжения, в отличие от традиционных, работающих в условиях чистого отрыва. Представлены результаты на статическое растяжение рекомендованных конструкторско-технологических приемов, направленных на улучшение условий и активацию процесса образования адгезионных разнородных соединений. Металлографические исследования макрошлифов сварных соединений показали возможность получения бездефектных сварных швов с полным проваром корневой части; механические испытания стыковых, комбинированных и нахлесточных соединений подтвердили высокий уровень прочности разнородных соединений.

ВВЕДЕНИЕ

Биметаллические соединения используются в элементах конструкции, в которых традиционные однородные материалы ограниченно удовлетворяют их функциональным требованиям [1; 2]. Получение сварного соединения разнородных материалов сопряжено с трудностями из-за различия их физических и иных свойств, а также особенностей процесса образования соединений при сварке трением с перемешиванием (СТП) [3; 4]. При сварке плавлением металлы для образования соединений расплавляют. При твердофазных способах сварки используют значительные удельные давления, формируя соединения под действием пластической деформации объемов приконтактных областей соединяемых металлов. В отличие от рассмотренных способов сварки, при СТП сварные соединения образуются благодаря переходу кромок в месте контакта соединяемых элементов в сверхпластическое состояние (СПС) и перемещению ограниченного объема металла в направлении, благоприятном для формирования сварного соединения. Однако разные металлы и сплавы имеют различные температуры перехода в СПС, и простое повышение температурного режима не решает

проблемы образования твердофазного адгезионного соединения. При анализе диаграмм состояния бинарных металлических систем из разнородных металлов установлено, что лишь 12–15 % известных конструкционных металлов могут образовывать твердые растворы. В остальных случаях при сварке разнородных металлов с ограниченной взаимной растворимостью могут образовываться хрупкие интерметаллиды, что приводит к снижению механических свойств разнородных сварных соединений.

Современные разработки в области технологии сварки позволяют соединять разнородные материалы с получением требуемых свойств по разным показателям часто без дефектов. Среди различных методов сварки разнородных металлов наиболее оптимальным признан процесс соединения металлов в твердом состоянии. Поэтому в последнее время активно используют способ СТП.

При классической схеме процесса сварки трением с перемешиванием (рис. 1) могут быть получены различные типы соединений: стыковые, нахлесточные (мультинахлесточные, нахлесточно-стыковые), угловые и даже тавровые (таврово-прорезные, двухпроходно-тавровые) соединения (рис. 2).

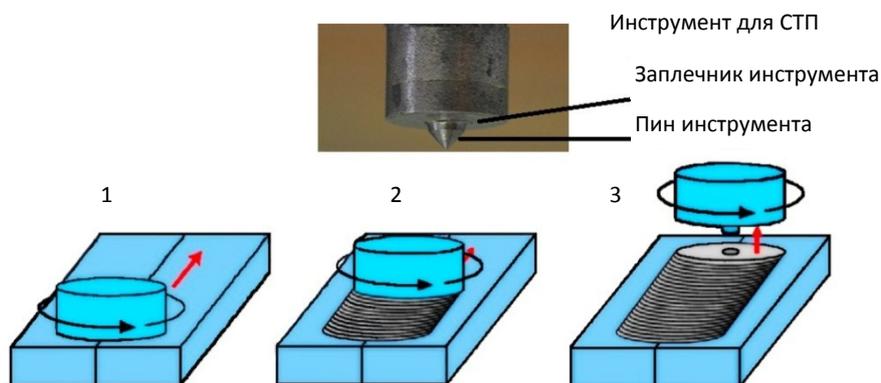


Рис. 1. Схема процесса СТП:

1 – ввод инструмента (создание физического контакта, создание распределенного источника тепла);
2 – перемещение инструмента вдоль свариваемых кромок; 3 – вывод инструмента

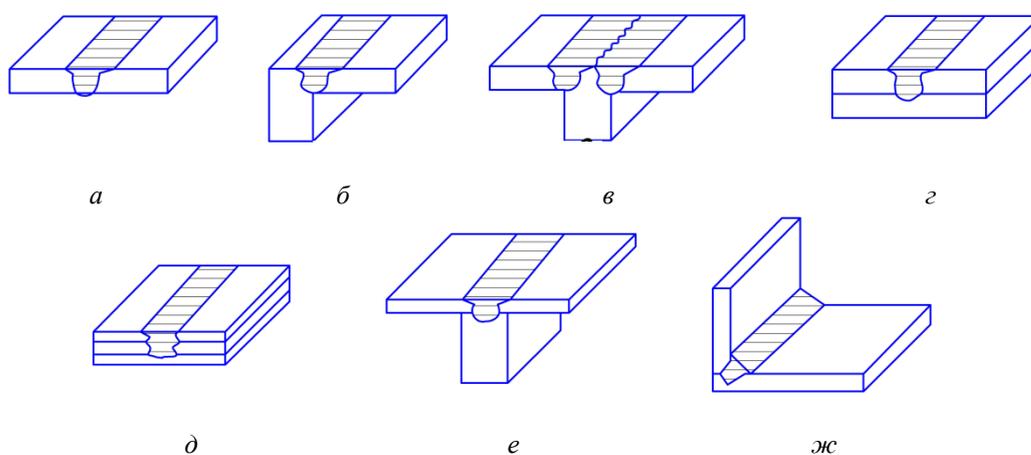


Рис. 2. Виды сварных соединений для СТП:

а – стыковое; б – тавровое; в – двухпроходно-тавровое; г – нахлесточное;
д – мультинахлесточное; е – таврово-прорезное; ж – угловое

Вероятность образования хрупких интерметаллических соединений снижается в процессе СТП благодаря низкой рабочей температуре, достигаемой в процессе фрикционного трения инструмента и свариваемого металла, участвующих в этом процессе, и интенсивного перемешивания пластически деформируемого металла.

Цель работы – исследование влияния технологических приемов на механические свойства разнородных биметаллических соединений при СТП.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В исследованиях использовали преимущественно листовые (толщиной 2–4 мм) образцы из алюминия и его сплавов (АД1 и др.), меди М1, Ti-сплав (ОТ 4-1), стали (Ст3, 12Х18Н10Т). Пластины разрезали на куски размером 250×250 мм. Медные листы отжигали при температуре около 650 °С, выдерживали в течение 1 часа и затем охлаждали на воздухе. Конструктивное оформление скоса кромок экспериментальных образцов было выполнено в виде скоса, шипа, замка. Поверхности листов очищали ацетоном для удаления оксидной пленки. Перед сваркой пластины были помещены на опорную плиту и жестко закреплены прижимами вдоль на-

правления сварки для предотвращения относительного перемещения.

Сварка проводилась на вертикальном фрезерном станке со скоростью вращения от 600 до 1200 об/мин и скоростью сварки от 25 до 60 мм/мин. Для стыковых, стыко-нахлесточных соединений был использован цилиндрический инструмент из твердого сплава ВК8 с заплечиком диаметром 14 мм и усеченным штифтом диаметром у основания 6 мм, а у усеченной части 4 мм и длиной 2,9 мм. Угол наклона составлял от 1 до 5° от нормальной поверхности пластин. Для нахлесточных (LAP) соединений был использован цилиндрический инструмент из твердого сплава ВК8 с заплечиком диаметром 16 мм и усеченным штифтом диаметром у основания 6 мм, а у усеченной части 3 мм и длиной 4,6 мм. Для исследования были сварены образцы стыковых и нахлесточных (LAP), а так же стыко-нахлесточных соединений с различными конструктивными подготовками кромок. В процессе сварки глубина погружения плеча контролировалась вручную, чтобы изменять качество сварного шва.

Вырезку поперечных шлифов осуществляли методом абразивной резки. Для этой цели использовали отрезной абразивный станок для влажной резки АТМ

BRILLANT 220. Для горячего прессования образцов перед полировкой использовали пресс ATM OPAL 460. Для удаления слоя с измененной структурой поверхности образцов шлифовали на машине ATMSAPHIR 560 с вращающимися кругами, армированными абразивными шкурками. Шлифовку осуществляли на абразивной бумаге с различной зернистостью абразива в интервале от P300 до P1200. Постепенный переход от грубой к более тонкой шлифовальной бумаге сочетали со сменной направлением шлифования путем поворота шлифа на 90°. Подготовку шлифов завершали полированием вручную либо механически на станках. Ручную полировку осуществляли на алмазных пастах, нанесенных на поверхность бильярдного сукна с размером абразивных частиц от 14/7 до 1/0 мкм. В процессе полирования шлифы очищали от крупных продуктов шлифовки и периодически промывали в воде.

Для травления рабочей поверхности подготовленных микрошлифов использовались:

– для Ti и его сплавов – водный раствор плавиковой кислоты (4 % HF);

– для аустенитной нержавеющей хромоникелевой стали – царская водка с добавками хлорида железа (HNO₃, HCl и FeCl₃) в пропорции 1:3;

– для меди и ее сплавов – водный раствор соляной кислоты и хлорида железа (III) (100 мл H₂O+25 мл HCl+8 гр. FeCl₃);

– для алюминия и его сплавов – водный раствор плавиковой кислоты (5 % HF).

Исследование микроструктуры проводилось с помощью оптической микроскопии. Металлографический анализ макро- и микроструктуры сварных образцов выполнялся по снимкам, полученным в световом микроскопе Leica DMI 5000 M, оснащенный фотокамерой при различных увеличениях (50, 100, 200, 500, 1000 крат).

Для исследования механических свойств сварных соединений были подготовлены образцы на растяжение по ГОСТ 6996-66. При испытании изготовленных экспериментальных образцов на статическое растяжение определяли временное сопротивление наиболее слабого участка. Временное сопротивление подсчитывали по ГОСТ 1497-84. При испытании определяли место разрушения образца (по шву, по основному металлу). Испытания проводились на испытательной машине Р-5 при скорости нагружения 10 мм/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для увеличения интенсивности перемешивания и создания условий для формирования сварного шва используют различные активирующие технологические приемы.

Один из таких приемов, используемый при создании сварных соединений способом СТП, заключается в перераспределении тепла путем смещения оси вращения инструмента относительно границы раздела в сторону материала, обладающего более высокими теплофизическими свойствами. Для сварки Al-Cu соединений инструмент смещают на медный сплав [5; 6], для Al-Steel соединений – на алюминий [7–9], для Al-Ti – также на алюминиевый сплав [10; 11]. Принимая во внимание различие в температурах перехода металлов в СПС, следует учитывать позиционирование свариваемых деталей относительно направления вращения инструмента. На макрошлифах сварных стыковых соединений, особенно из разнородных материалов, различают при СТП набегающую и отходящую стороны соединения. При исследованиях поперечных макрошлифов установлено, что металлы с высокой температурой плавления и температурой перехода в СПС чаще размещаются на набегающей стороне соединения [9; 12; 13]. Это можно объяснить, вероятно, созданием в этой зоне мгновенных повышенных удельных давлений. Эти давления способствуют установлению нарушенных металлических связей, и при этом наблюдается увеличение силы сцепления, а в ряде случаев – «раскрытие кромок шва», вероятно, из-за более низкой температуры перехода в СПС и пониженной прочности межатомных связей при переходе в СПС (рис. 3).

Качество сварного нахлесточного соединения, в отличие от стыкового, не зависит от толщины и рода соединяемых материалов. Для исследования нахлесточного соединения были изготовлены сварные образцы (рис. 4) различной конфигурации.

При образовании нахлесточного соединения разнородных металлов существенную роль играет относительное пространственное расположение верхнего и нижнего металлов [14; 15]. При СТП необходимо более твердый материал с меньшей пластичностью и более высокой температурой перехода в СПС располагать в нижней части сварного соединения. При движении инструмента по образцу происходит перетекание материала

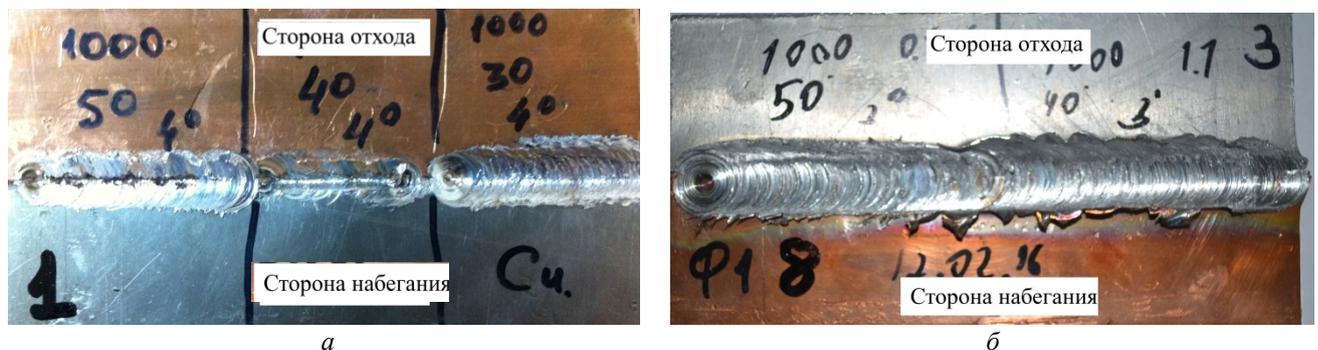


Рис. 3. Внешний вид сваренных образцов алюминиевого АД1 и медного М1 сплавов:
а – сторона отхода медного М1 сплава;
б – сторона отхода алюминиевого АД1 сплава

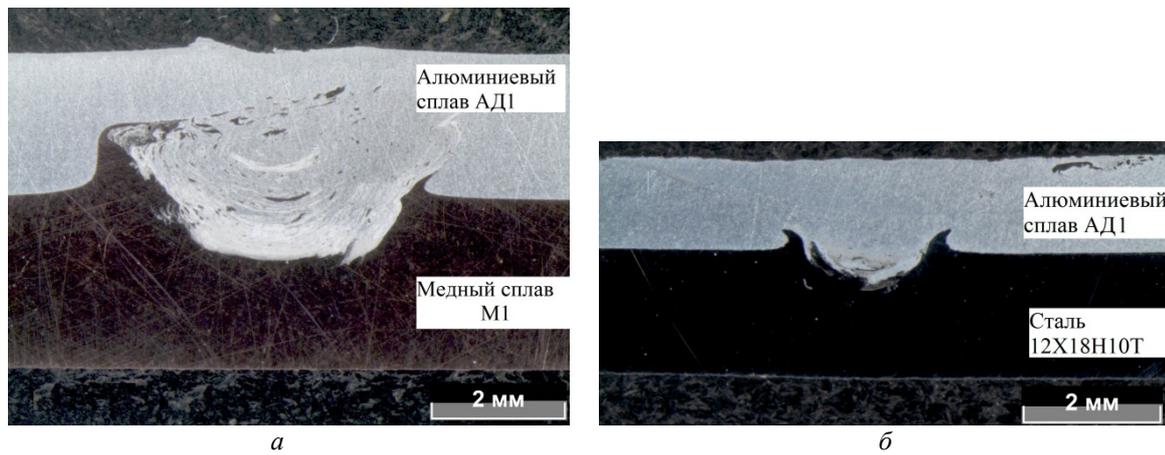


Рис. 4. Макрошлифы сварных нахлесточных соединений:
а – алюминиевого АД1 и медного М1 сплавов;
б – алюминиевого АД1 сплава и стали 12Х18Н10Т

в сверхпластическом состоянии из донной части соединения в верхнюю зону и более интенсивное перетекание в зону турбулентности, вследствие действия давления вращающегося пина [16–18]. Кроме того, при вращении инструмента сильно изменяется интенсивность перераспределения металла, находящегося в СПС, которая усиливается, если на боковой поверхности пина выполняются резьбовую нарезку. При иррациональной схеме расположения свариваемых материалов возможно появление в сварном шве таких дефектов, как тоннельные несплошности (полости) и непровары. Их появление вызвано недостаточной интенсивностью перераспределения металлов, вовлекаемых в формирование сварного соединения.

Принимая во внимание природу образования адгезионных соединений и условия их работы (преимущественно на отрыв), можно прогнозировать перспективные технологико-конструктивные приемы подготовки кромок свариваемых материалов с учетом их физико-механических свойств и условий нагружения элементов сварных конструкций. При подготовке кромок следует стремиться к увеличению фактической площади сопряжения соединяемых элементов сварных соединений и конструкции в целом. Конструктивные решения должны приводить к созданию условий работы сваренных соединений на срез или на срез с отрывом. При конструктивных изменениях конфигурации одной или обеих соединяемых деталей конструкции следует прибегать к созданию технологических отверстий, канавок, выступов, которые воспринимают касательные напряжения. Благодаря переходу в СПС металла одной из соединяемых деталей сравнительно легко и надежно заполняет технологические вспомогательные полости (отверстия) различной конфигурации.

НАХЛЕСТОЧНЫЕ (LAP) СОЕДИНЕНИЯ

Практическим примером одного из таких технологических приемов для нахлесточного соединения может быть выполнение (создание) рифления или «грубой» шероховатости на контактной поверхности более твердого материала. Для увеличения прочности соединения медь-алюминий предложено на поверхность меди, контактирующую с алюминиевым сплавом, наносить риф-

ление, а затем выполнять СТП. При этом пин инструмента следует погружать до середины высоты рифления шероховатости. Угол наклона рифления должен составлять 60° к оси направления сварки. Нанесение рифления на более твердую деталь позволяет увеличить прочность соединения в 3 раза [19] как за счет увеличения фактической площади контакта, изменения соотношения в соединении нормальной и тангенциальной составляющих внешней нагрузки, так и за счет увеличения толщины переходного слоя, в котором более эффективно протекает релаксация напряжений.

Следующий технологический прием заключается в выполнении отверстий (каналов) в детали из более тугоплавкого и менее пластичного материала и воздействию на деталь из более легкоплавкого пластичного материала с минимальной температурой перехода в СПС вращающимся цилиндрическим инструментом с торцевой поверхностью, не имеющей пина и выполненной по сфере (рис. 5). Для увеличения адгезии и фактической площади контактирования в отверстиях рекомендуют нарезать резьбу [1]. Вращение инструмента осуществляют в направлении, совпадающем с направлением подъема витков резьбы для облегчения заполнения резьбовых отверстий пластичным металлом. Техническим результатом приема является повышение прочности соединений разнородных материалов в 1,8–2 раза, например в сталеалюминиевых (Al-Steel) соединениях [1]. При этом пластифицированный металл, перемещаемый инструментом в направлении отверстий, заполняет отверстия. Таким образом, образуется механическое заклепочное соединение с телом заклепки из более пластичного металла.

Для увеличения массы заклепки отверстие в тугоплавком менее пластичном материале предлагается выполнять с отступлением от цилиндрической формы, увеличить длину технологического отверстия до $4d$ (d – диаметр отверстия), располагая его с шагом $2d$.

Данный технологический прием позволяет увеличить массу металла, вталкиваемого в отверстия, и повысить сцепление вытесняемого металла с нижней деталью. При его реализации удалось увеличить механическую прочность в 2,5 раза по сравнению с обычным традиционным нахлесточным соединением.

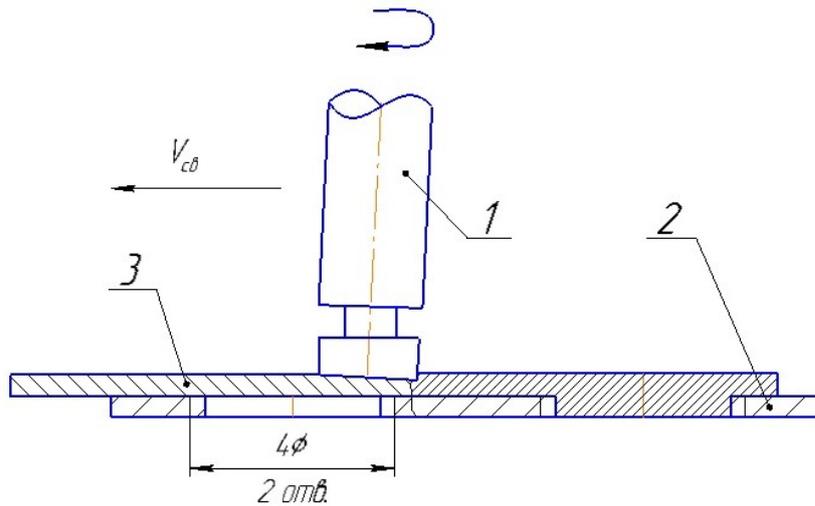


Рис. 5. Схема с увеличенными отверстиями:
 1 – инструмент для СПП;
 2 – тугоплавкий материал (сталь 12Х18Н10Т);
 3 – алюминиевый АД1 сплав

Другой технологический прием для нахлесточных соединений использует идею предыдущего с той лишь разницей, что в тугоплавком материале выполнена V- или U-образная технологическая канавка (рис. 6) на глубину, достигающую половины толщины нижнего присоединяемого элемента. При вводе пина инструмента в материал верхней детали, пин погружают в нижнюю деталь на глубину, несколько большую толщины верхней детали, с частичным заглублением в канавку нижней детали.

Данный технологический прием позволяет увеличить массу пластичного металла, вытесняемого в канавку, активирует контактные поверхности канавки нижней детали и облегчает лифтинг тугоплавкого металла. Такой прием повышает сцепление металлов в СПС верхней и нижней деталей. При его реализации нами было получено увеличение механической прочно-

сти в 2,7 раза по сравнению с обычным традиционным нахлесточным соединением.

СТЫКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Рассмотрим технологические приемы, применяемые при образовании самого распространенного стыкового соединения. Для увеличения площади контактной поверхности торцов свариваемых деталей и перераспределения силовых составляющих, ответственных за активацию процесс формирования адгезионных связей, были подготовлены детали из менее пластичного металла с кромкой в виде «пилы» (рис. 7). Шаг пилы ограничен лишь размерами фрезы для обработки торца, а высота зубьев должна быть принята равной половине ее диаметра, но меньше диаметра пина. Нарушение этого соотношения приводило к образованию локального непровара по краям, видимо, из-за недостаточной величины удельного давления.

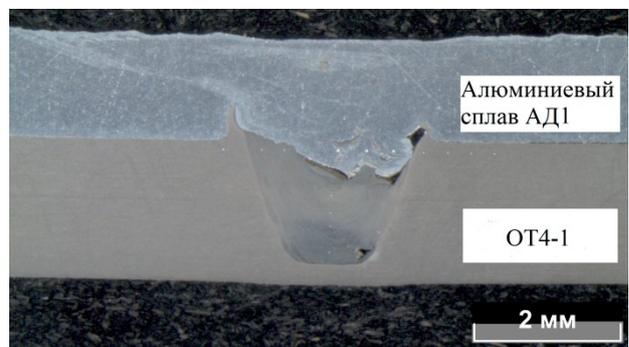
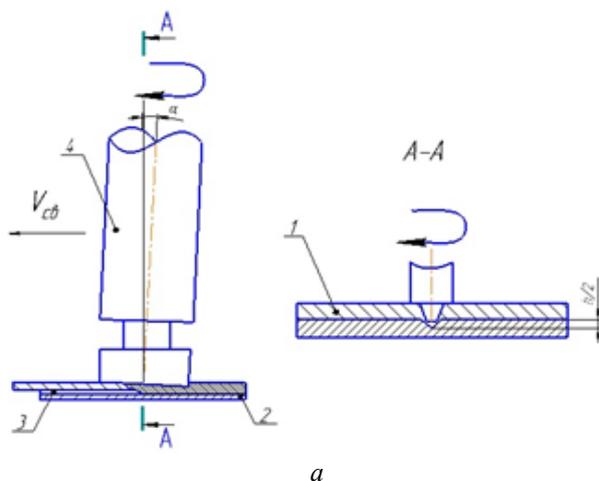


Рис. 6. Способ СПП с V (U)-образной канавкой в менее пластичном металле:
 а – схема нахлесточного соединения с V (U)-образной канавкой
 (1 – инструмент для СПП; 2 – тугоплавкий менее пластичный материал;
 3 – материал с повышенной пластичностью);
 б – поперечный макрошлиф (АД1 и ОТ4-1 сплавы) разнородного соединения после СПП

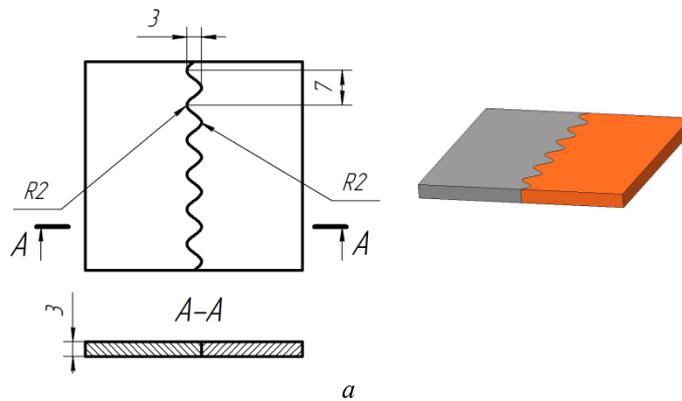


Рис. 7. Сварное соединение «пила»:

а – схема с макетом;

б – внешний вид сварного соединения алюминиевого (АД1) и медного (М1) сплавов;

в – рентгеновский снимок стыкового соединения этих сплавов – «пила»

Перемешивание сплавов АД1 и М1 происходит интенсивнее, так как траектория движения пина инструмента пересекает зубья последовательно алюминиевого и медного сплавов. На рис. 7 б представлен рентгеновский снимок сварного шва, на котором четко видно взаимное проникновение медного и алюминиевого сплава.

СТЫКО-НАХЛЕСТОЧНОЕ СОЕДИНЕНИЕ И ЕГО РАЗНОВИДНОСТИ

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены кромки заготовок для сварных швов и исследованы конструктивные разновидности стыко-нахлесточного соединения: в «скос», «замок», «шип» (рис. 8).

Данный технолого-конструкторский прием позволяет увеличить поверхность взаимодействия и активировать процесс перемешивания путем лифтинга из придонной части сварного шва менее пластичного материала (медного сплава М1) в мягкий (алюминиевый сплав АД1), повлиять на перераспределение нормальной и тангенциальной составляющих растягивающей

нагрузки, приложенной по оси сварного соединения (рис. 9).

Из анализа гистограммы (рис. 10) следует, что наибольшие показатели временного сопротивления при разрыве имели образцы со скосом кромок и в форме шипа, которые обладают повышенной фактической площадью контактирования деталей.

Металлографические исследования поперечных и продольных макрошлифов сварных соединений показали, что при технологической подготовке кромок образцов для СТП были получены бездефектные соединения с полным проваром корневой части швов и минимальной величиной уменьшения усиления швов (рис. 11).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ типов соединений, традиционно используемых при СТП при однородном и разнородном сочетании соединяемых металлов и сплавов.

2. В сравнительном варианте предложены технологические и конструкторские подходы для дальнейшей эволюции типов стыковых и нахлесточных соединений,

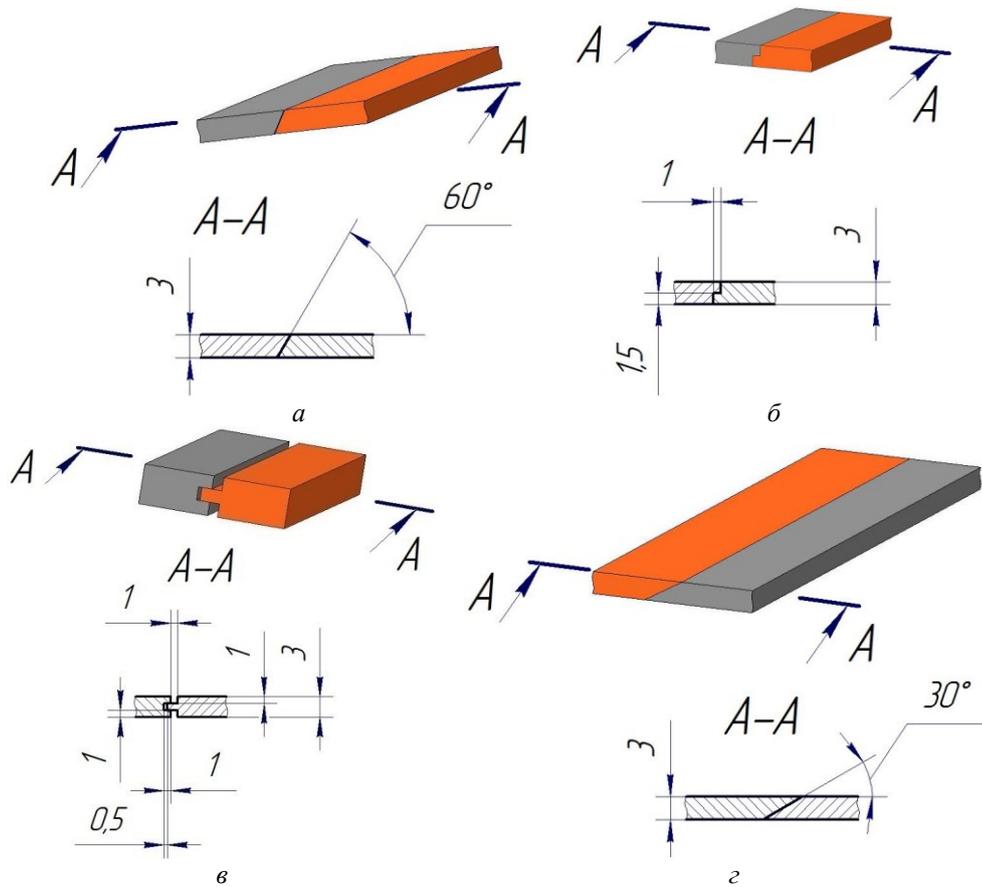


Рис. 8. Стыко-нахлесточные соединения:

- а – скос 60°;
- б – замок;
- в – шип;
- г – скос 30°



Рис. 9. Внешний вид разнородных сварных соединений:

- П-М1...5 – шип;
- П1...5 – замок;
- 60.1...60.5 – скос 60°;
- 30.1...30.5 – скос 30°

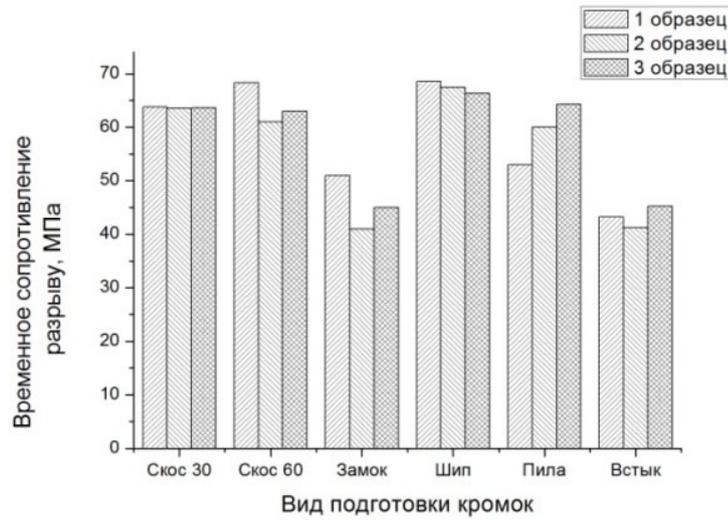


Рис. 10. Гистограмма механических показателей сварных соединений с перспективными конструкциями подготовки кромок для СТП

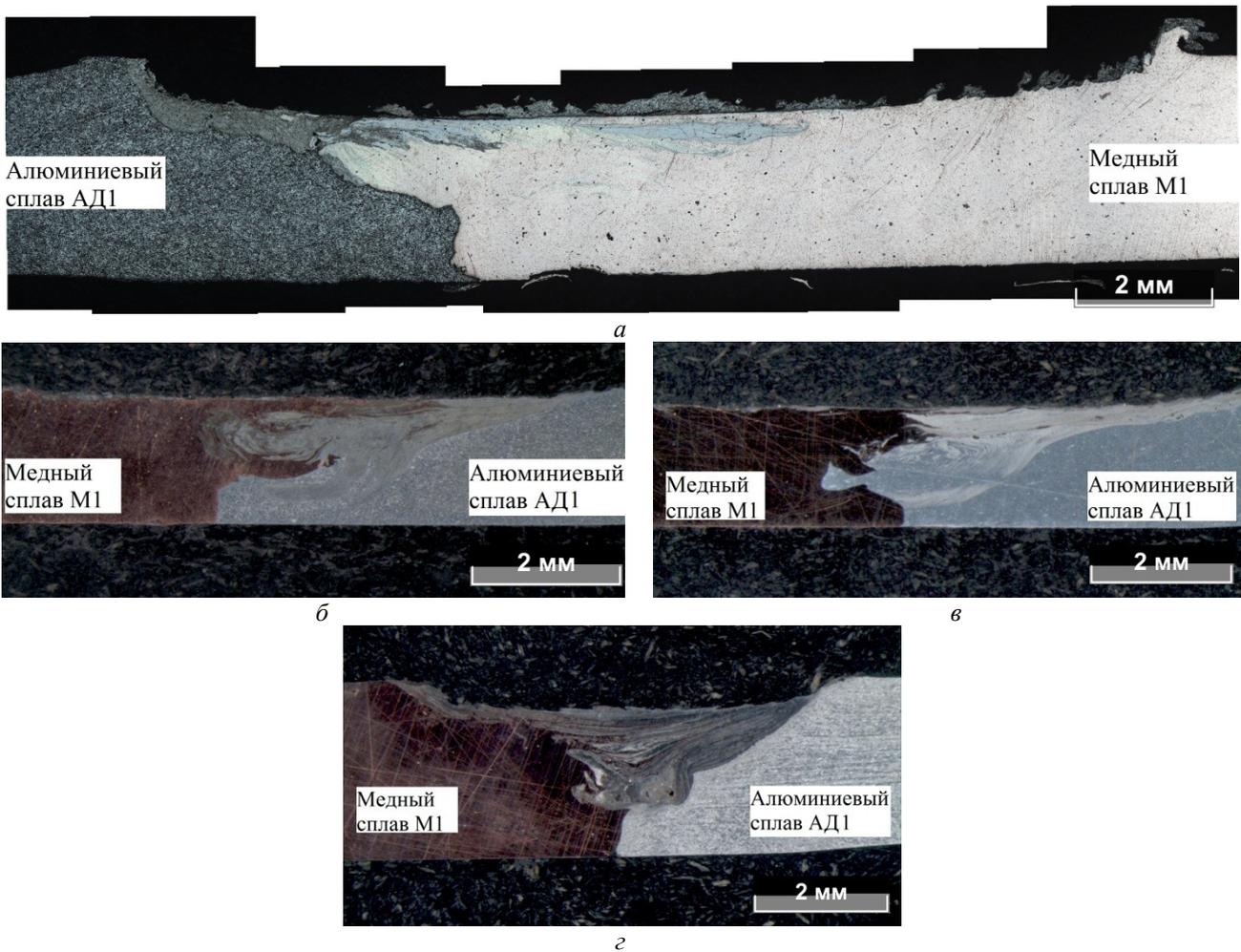


Рис. 11. Макрошлифы сварных соединений с разными конструктивными типами кромок, выполненные с помощью СТП:
 а – скос 60°; б – замок;
 в – шип; г – скос 30°

особенно при разнородном сочетании материалов в одном комбинированном соединении для повышения их механических показателей в случае использования способа СТП.

3. Анализ механических показателей свидетельствует в пользу соединений с повышенной фактической площадью контактирования деталей, работающих в условиях действия нормальных и касательных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Velu M., Tidole A., Mehra P., Kulkarni D. Friction stir welding of dissimilar Al6061 and pure copper // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8. P. 312–316.
2. Zhang W., Shen Y., Yan R., Guo R. Dissimilar friction stir welding of Al6061 to T2 pure Cu adopting tooth shaped joint configuration // *Materials Science and Engineering A*. 2017. Vol. 690. P. 355–364.
3. Fu B., Qin G., Li F., Meng X., Zhang J., Wu C. Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-T6 aluminum alloy to AZ31B magnesium alloy // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 218. P. 38–47.
4. Salih O.S., Ou H., Sun W., McCartney D.G. A review of friction stir welding of aluminium matrix composites // *Materials and Design*. 2015. Vol. 86. P. 61–71.
5. Zhang Q.-Z., Gong W.-B., Liu W. Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al–Cu joints by friction stir welding // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2015. Vol. 25. P. 1779–1786.
6. Esther T., Adrian C.S., Stephen A. Non-destructive testing of dissimilar friction stir welds // *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2012. Vol. III. P. 198–205.
7. Arya P.K., Gupta G., Rajput A.K. A Review on friction stir welding for aluminium alloy to steel // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. № 7. P. 119–125.
8. Richard E.M. The Strength and Metallography of a Bi-metallic Friction Stir Bonded Joint between AA6061 and High Hardness Steel // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. 2014. № 8. P. 392–396.
9. Pisharody A., Menghani J., Pandiya S.N. Review of friction stir welding of dissimilar Al-Fe metals // *International journal of advances in science and technology*. 2012. Vol. 1. № 2. P. 78–82.
10. Sadeghi-Ghogheri M., Kasiri-Asgarani M., Amini K. Friction stir welding of dissimilar joint of aluminum alloy 5083 and commercially pure titanium // *Kovove Materialy*. 2016. Vol. 54. № 1. P. 71–75.
11. Chen Y., Liu C., Liu G. Study on the joining of titanium and aluminum dissimilar alloys by friction stir welding // *Open Materials Science Journal*. 2011. Vol. 5. P. 256–261.
12. Bang K.-S., Lee K.-J., Bang H.-S., Bang H.-B. Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds between 6061-T6 aluminum and Ti-6%Al-4%V Alloys // *Materials Transactions*. 2011. Vol. 52. № 5. P. 974–978.
13. Sahu P.K., Pal S., Pal S.K., Jain R. Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 235. P. 55–67.
14. Dong H., Chen S., Song Y., Guo X., Zhang X., Sun Z. Refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to galvanized steel sheets // *Materials and Design*. 2016. Vol. 94. P. 457–466.
15. Wei Y., Li J., Xiong J., Zhang F. Effect of Tool Pin Insertion Depth on Friction Stir LAP Welding of Aluminium to Stainless Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013. Vol. 22. P. 3005–3013.
16. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
17. Смирнов О.М. Сверхпластичность нанокристаллических и аморфных материалов // *Перспективные материалы*. 2010. № 9. С. 228–241.
18. Бабарэко А.А., Эгиз И.В., Хорев А.И. Сверхпластичность титановых сплавов разных классов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1995. № 6. С. 30–35.
19. Бубенок Е.С. Соединение разнородных металлов сваркой трением с перемешиванием (Cu-Al) // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2013. Т. 13. № 7-8. С. 42–48.
20. Людмирский Ю.Г., Лукьянов В.Ф., Котлышев Р.Р., Крамской А.В., Гунин С.А., Бубенок Е.С. Способ получения соединения разнородных материалов: патент РФ № 2443526, 2010.

REFERENCES

1. Velu M., Tidole A., Mehra P., Kulkarni D. Friction stir welding of dissimilar Al6061 and pure copper. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2017, vol. 8, pp. 312–316.
2. Zhang W., Shen Y., Yan R., Guo R. Dissimilar friction stir welding of Al6061 to T2 pure Cu adopting tooth shaped joint configuration. *Materials Science and Engineering A*, 2017, vol. 690, pp. 355–364.
3. Fu B., Qin G., Li F., Meng X., Zhang J., Wu C. Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-T6 aluminum alloy to AZ31B magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 218, pp. 38–47.
4. Salih O.S., Ou H., Sun W., McCartney D.G. A review of friction stir welding of aluminium matrix composites. *Materials and Design*, 2015, vol. 86, pp. 61–71.
5. Zhang Q.-Z., Gong W.-B., Liu W. Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al–Cu joints by friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2015, vol. 25, pp. 1779–1786.
6. Esther T., Adrian C.S., Stephen A. Non-destructive testing of dissimilar friction stir welds. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2012, vol. III, pp. 198–205.
7. Arya P.K., Gupta G., Rajput A.K. A Review on friction stir welding for aluminium alloy to steel. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2016, no. 7, pp. 119–125.
8. Richard E.M. The Strength and Metallography of a Bi-metallic Friction Stir Bonded Joint between AA6061

- and High Hardness Steel. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 2014, no. 8, pp. 392–396.
9. Pisharody A., Menghani J., Pandiya S.N. Review of friction stir welding of dissimilar Al-Fe metals. *International journal of advances in science and technology*, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 78–82.
 10. Sadeghi-Ghogheri M., Kasiri-Asgarani M., Amini K. Friction stir welding of dissimilar joint of aluminum alloy 5083 and commercially pure titanium. *Kovove Materialy*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 71–75.
 11. Chen Y., Liu C., Liu G. Study on the joining of titanium and aluminum dissimilar alloys by friction stir welding. *Open Materials Science Journal*, 2011, vol. 5, pp. 256–261.
 12. Bang K.-S., Lee K.-J., Bang H.-S., Bang H.-B. Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds between 6061-T6 aluminum and Ti-6%Al-4%V Alloys. *Materials Transactions*, 2011, vol. 52, no. 5, pp. 974–978.
 13. Sahu P.K., Pal S., Pal S.K., Jain R. Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 235, pp. 55–67.
 14. Dong H., Chen S., Song Y., Guo X., Zhang X., Sun Z. Refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to galvanized steel sheets. *Materials and Design*, 2016, vol. 94, pp. 457–466.
 15. Wei Y., Li J., Xiong J., Zhang F. Effect of Tool Pin Insertion Depth on Friction Stir LAP Welding of Aluminum to Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, vol. 22, pp. 3005–3013.
 16. Kaybyshev O.A. *Sverkhplastichnost promyshlennykh splavov* [Superplasticity of industrial alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 264 p.
 17. Smirnov O.M. Superplasticity of nanocrystalline and amorphous materials. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 9, pp. 228–241.
 18. Babareko A.A., Egiz I.V., Khorev A.I. Superplasticity of titanium alloys of different classes. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1995, no. 6, pp. 30–35.
 19. Bubenok E.S. Connection of dissimilar metals by friction stir welding (Cu-Al). *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 13, no. 7-8, pp. 42–48.
 20. Lyudmirskiy Yu.G., Lukyanov V.F., Kotlyshev R.R., Kramskoy A.V., Gunin S.A., Bubenok E.S. *Sposob polucheniya soedineniya raznorodnykh materialov* [Method for obtaining a compound of dissimilar materials], patent RF no. 2443526, 2010.

THE APPLICATION OF TECHNOLOGICAL METHODS FOR ENHANCING THE STRENGTH OF DISSIMILAR JOINTS PRODUCED BY FRICTION STIR WELDING

© 2018

R.A. Rzaev, senior lecturer of Chair “Material Science and Welding Technology”

Astrakhan State University, Astrakhan (Russia)

A.A. Chularis, Doctor of Sciences (Engineering),

professor of Chair “Machines and Automation of Welding Manufacturing”

Don State Technical University, Rostov-on-Don (Russia)

A.S. Dosimov, graduate student

Astrakhan State University, Astrakhan (Russia)

A.A. Naumov, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Technology and Materials Research”

O.G. Zotov, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Technology and Materials Research”

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg (Russia)

Keywords: friction stir welding; dissimilar materials; butt-lap joint; bimetallic joints; solidphase welding.

Abstract: The technology of production of dissimilar joints is associated with the difficulties due to the differences of their thermophysical and other properties and special aspects of the process of joints’ formation. The application of friction stir welding (FSW) technology is the solution to the problem of weldability of bimetallic joints. The paper covers the study of mechanical properties of butt, butt-lap and lap joints of AD1 aluminum and M1 copper alloys, AD1 aluminum alloys and alloyed steels (12H18N10T), AD1 aluminum and OT4-1 alloys.

The subject of the analysis is the design of the edges of parts welded with FSW and the stage-by-stage analysis of the process of formation of butt, lap, tee, and combined joints of copper with aluminum based on the welding modes parameters. The paper analyzes the factors affecting the strength of dissimilar joints of the AD1 aluminum and M1 copper alloys produced with FSW. The influence of the geometry of the prepared edges of parts on the formation of the defect-free and consistent welded joints is studied. The authors showed promising directions of constructive design for various versions of butt joints (butt-lap joints: 30...60° bevel joint, fish-mouth joint, mortise joint) by means of the enlargement of actual contact area of the parts when subjected to loadings of normal or tangential stresses as opposed to the traditional ones operating within the pure tear conditions. The paper gives the results of the static tension tests, recommends the design-engineering techniques aimed at the improvement of the conditions and the activation of the process of formation of the adhesive dissimilar joints. The metallographic research of the welded joints’ macrosections showed the possibility to produce the defect-free welds with the complete weld root penetration; the mechanical tests of the butt, combined and lap joints proved the high level of full strength of dissimilar joints.