



ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ШВОВ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ТОЛЩИНОЙ 1,8...2,5 мм

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук, чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО, С. В. ПОДЪЕЛЬНИКОВ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Экспериментально определены геометрические размеры рабочих поверхностей инструментов и требования к подготовке кромок стыковых соединений алюминиевых сплавов, необходимая точность их сборки и фиксации. Установлены диапазоны изменения параметров процесса, обеспечивающие получение бездефектных сварных соединений.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, параметры процесса, формирование швов, бездефектность

В последнее десятилетие происходит стремительное развитие процесса сварки трением с перемешиванием (СТП) и расширяются сферы его применения в судостроении, автомобильной промышленности, вагоностроении, при изготовлении авиационной и космической техники [1–3].

Принцип получения швов при СТП основан на нагреве металла в зоне соединения до пластического состояния в результате сил трения, перемещения и пластического деформирования его в закрытом объеме, ограниченном рабочими поверхностями инструмента и подкладкой (рис. 1). При этом металл не нагревается до температуры плавления, благодаря чему в швах и зонах термического влияния степень структурно-фазовых превращений намного меньше, чем при сварке плавлением. Улучшенные физико-механические свойства таких соединений обеспечивают более высокие эксплуатационные характеристики конструкций, изготовленных с применением СТП [4–7]. Однако, как и при любом способе сварки, получить бездефектные соединения при СТП удастся только при определенных параметрах процесса.

Цель данной работы — исследовать влияние основных параметров процесса СТП и технологических факторов на формирование качественных соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм.

Для проведения исследований использованы листы из серийных алюминиевых сплавов различных систем легирования (АМц, АД31, АМг2, АМг6, В95, 1420 и 1460). Перед сваркой их очищали от смазочных материалов, а затем прово-

дили химическое травление по общепринятой технологии. Предварительная механическая зачистка поверхностей не производилась, так как оксидная пленка в процессе сварки разрушается, дисперсно измельчается и равномерно распределяется по всему объему шва вращающимся инструментом.

Результаты экспериментальных исследований показали, что качество формирования швов при СТП алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм главным образом зависит от таких параметров процесса, как размер и конфигурация рабочих поверхностей бурта и наконечника инструмента, усилия прижатия инструмента к поверхностям листов и глубины его погружения в свариваемый металл, частоты вращения инструмента и скорости сварки.

Инструмент должен обеспечивать нагрев металла в зоне сварки до пластического состояния, перемешивание его по всей толщине свариваемых кромок и перемещение в замкнутом объеме при избыточном давлении. Основное количество теплоты Q выделяется в контактной области в результате трения бурта и определяется по формуле [5]

$$Q = 2/3 \mu PN(r_0^3 - r_n^3),$$

где μ — коэффициент трения; P — давление, оказываемое инструментом на свариваемые листы, Па; N — частота вращения инструмента, об/с; r_0 ,

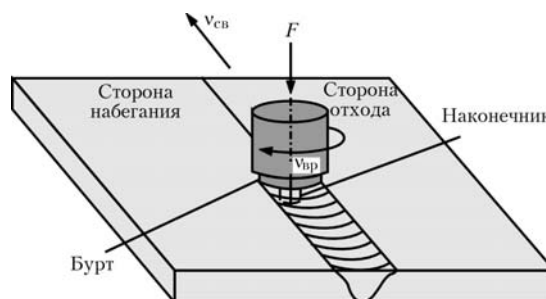


Рис. 1. Принципиальная схема процесса СТП

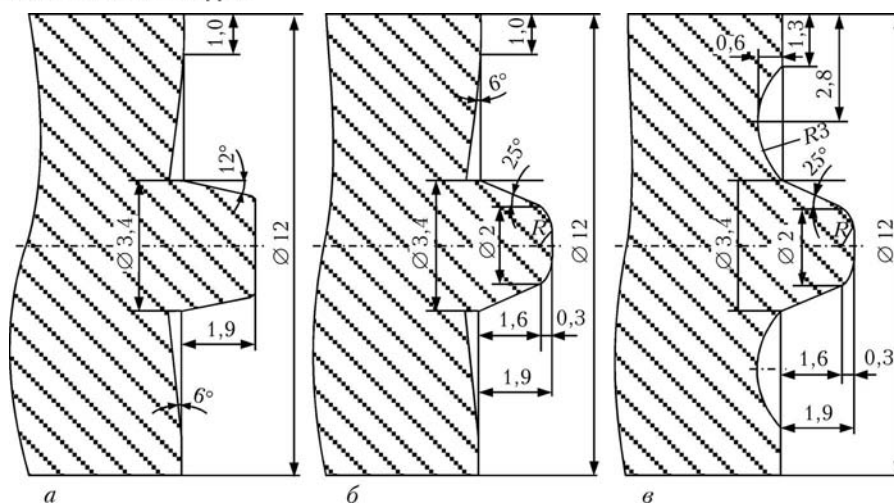


Рис. 2. Эскизы рабочих частей инструментов с конической (а, б) и полусферической (в) канавками на рабочей поверхности бурта и различной формой наконечников для СТП алюминиевых сплавов толщиной 2 мм

r_n — наружный радиус соответственно бурта и наконечника, мм.

При использовании для СТП инструмента с малым диаметром бурта объема пластифицированного металла может оказаться недостаточно для полного заполнения освобождающегося позади инструмента пространства, что приведет к образованию в швах дефектов в виде несплавления. Чрезмерно большой диаметр бурта способствует формированию широкой лицевой поверхности шва, значительному короблению сварных соединений и образованию дефектов вследствие перегрева металла в зоне сварки. Установлено, что для СТП алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм оптимальный наружный диаметр бурта инструмента должен находиться в пределах 10...12 мм. Кроме того, для обеспечения стабильности формирования швов на торцевой поверхности бурта необходимо делать небольшое кольцевое углубление, обеспечивающее плавное и непрерывное перемещение пластифицированного металла и формирование качественной лицевой поверхности швов. Однако размер его должен быть таким, чтобы при небольшом заглаблении бурта инструмента перемещающийся металл постоянно находился под избыточным давлением.

Перемешивание металла по всей толщине свариваемых кромок в процессе сварки происходит за счет перемещения его вращающимся наконечником инструмента. Проведенные исследования позволили определить, что при сварке алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм получить качественные сварные соединения можно при использовании наконечника инструмента в виде простого усеченного конуса. Для обеспечения работоспособности наконечника в условиях воздействия на него больших изгибающих усилий, крутящего момента и сил трения диаметр его возле торца бурта должен составлять 3,2...3,6 мм, а при вершине — 2,4...2,6 мм. Во избежание нес-

плавления в корневой части шва длина наконечника должна составлять $(0,90...0,95)\delta$. Плавное и равномерное перемещение пластифицированного металла в процессе сварки обеспечивается благодаря высокой чистоте обработки рабочих поверхностей инструмента. Любые заусенцы, выступы, вмятины или надрывы на этих поверхностях бурта и наконечника инструмента вызывают периодическое изменение траектории, скорости и количества перемещаемого металла, нарушая стабильность формирования и качество швов.

Эскизы некоторых разработанных образцов инструментов приведены на рис. 2. Рабочий инструмент рекомендуется изготавливать из инструментальных или нержавеющей мартенситных сталей [8]. Поэтому для сварки использован инструмент, изготовленный из инструментальной стали Р6М5 с высокими прочностными характеристиками при повышенных (около 600 °С) температурах.

Слабое прижатие инструмента к поверхностям деталей в процессе сварки или недостаточное заглабление бурта инструмента в свариваемый металл приводит к увеличению объема, который должен заполняться пластифицированным металлом при формировании шва, а следовательно, к снижению избыточного давления и образованию несплошностей в швах. В процессе экспериментальных исследований установлено, что формирование качественных швов обеспечивается при усилиях прижатия инструмента 5...10 кН и зависит от марки свариваемого сплава. При этом бурт инструмента должен погружаться в свариваемый металл на глубину 0,1...0,2 мм. Чрезмерное его заглабление приводит к перегреву металла и образованию на лицевой поверхности шва дефектов в виде надрывов (рис. 3, а). При небольшом погружении бурта инструмента в свариваемый металл в зоне сварки выделяется недостаточное количество тепла для обеспечения требуемого

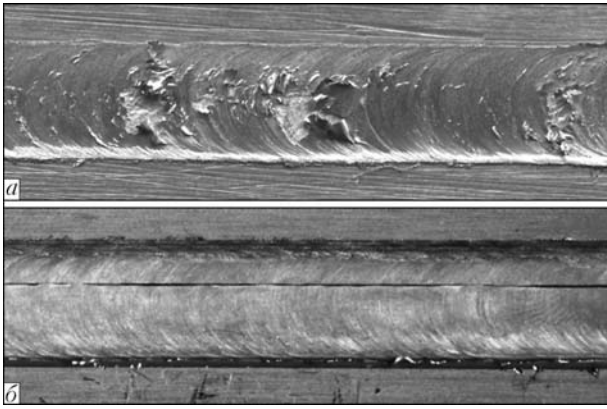


Рис. 3. Внешний вид ($\times 2$) лицевой поверхности швов, полученных СТП алюминиевого сплава 1420 толщиной 2 мм при чрезмерном (а) и недостаточном (б) погружении бурта в свариваемый металл

уровня пластификации, необходимого для качественного формирования шва объема металла. Поэтому в таких случаях на лицевой поверхности шва образуются дефекты в виде несплавления (рис. 3, б). Кроме того, сварку необходимо выполнять «углом вперед» при наклоне инструмента на $2...3^\circ$. При этом вращающийся бурт своей задней кромкой оказывает дополнительное давление на свариваемый металл, уплотняя металл шва.

Существенное влияние на формирование швов оказывают частота вращения инструмента и скорость сварки. Тепловыделение в зоне сварки повышается с увеличением количества оборотов инструмента или уменьшением скорости перемещения его вдоль стыка. При определенном для данного сплава соотношении частоты вращения инструмента и скорости сварки выделяемой за счет трения теплоты может оказаться недостаточно для пластификации требуемого объема металла, чтобы заполнить всю полость, образуемую наконечником инструмента. В результате нарушается непрерывность потока, перемещающегося по сложной траектории металла, и в шве образуются внутренние не заполненные металлом полости (рис. 4, а). При сохранении той же скорости вращения инструмента и уменьшении скорости его перемещения пластифицированного металла становится больше, благодаря чему качество сварного шва улучшается (рис. 4, б). Однако при чрезмерном уменьшении скорости сварки происходит избыточное выделение тепла, приводящее к перегреву металла, оплавлению легкоплавких эвтектик на межзеренных границах и образованию внутренних дефектов в виде полостей и несплошностей (рис. 4, в).

Результаты экспериментов показали, что пластичные низколегированные сплавы (АМц, АМг2, АД31 и др.) успешно свариваются трением с перемешиванием в широком диапазоне изменения скорости сварки ($6...40$ м/ч) при частоте вращения инструмента 1420 или 2880 об/мин. Высокопроч-

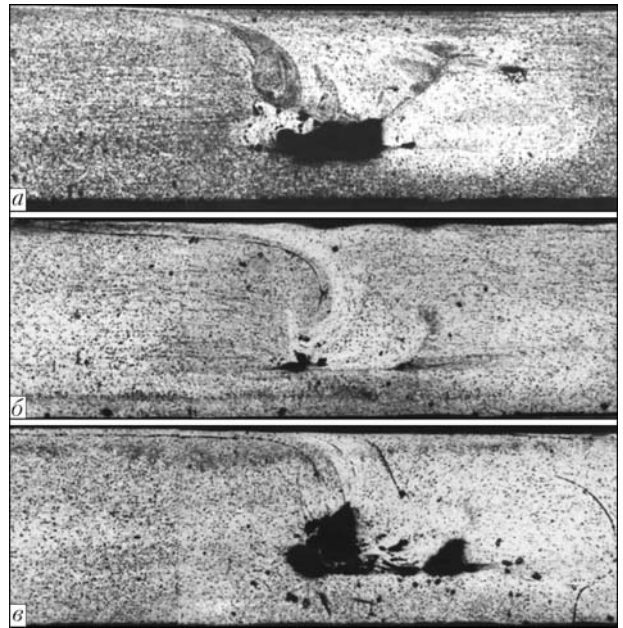


Рис. 4. Поперечные макрошлифы ($\times 20$) сварных соединений сплава АМг6 толщиной 2 мм, полученных СТП при постоянной частоте вращения инструмента 2880 об/мин и различной скорости сварки: а — $v_{св} = 38$; б — 20; в — 8 м/ч

ные сложнoleгированные сплавы (АМг6, 1460, В95 и др.) необходимо сваривать при более низкой (1420 об/мин) частоте вращения инструмента и при меньших ($6...14$ м/ч) скоростях сварки.

Для получения качественных соединений большое значение имеют точность сборки стыка под сварку и плотное прилегание кромок в зоне сварки к подкладке. Исследования поперечных макрошлифов швов, полученных СТП сплава АМг2 толщиной 2 мм, показали, что для бездефектных швов зазор между свариваемыми кромками должен составлять не более 15 % толщины свариваемого металла (рис. 5). Существенное влияние на качество формирования швов оказывает депланиция свариваемых кромок, возникающая вследствие неточности их подгонки и сборки, ненадежности фиксации заготовок к подкладке или изменения теплофизических условий в процессе сварки. При завышении кромки со стороны отхода инструмента (где векторы направления и перемещения инструмента противоположны по направлению) часть пластифицированного металла выдавливается в процессе сварки на лицевой поверхности шва в виде грата (рис. 6). Поэтому для обеспечения качественного формирования швов депланиция кромок не должна превышать 5 % толщины свариваемого металла.

Поскольку для СТП алюминиевых сплавов толщиной $1,8...2,5$ мм используются инструменты с очень тонкими наконечниками, то даже незначительное их отклонение от оси стыка может привести к нарушению качества швов. Исследования макрошлифов швов сплава АМг6 толщиной 1,8 мм показали, что допустимое отклонение инструмента от

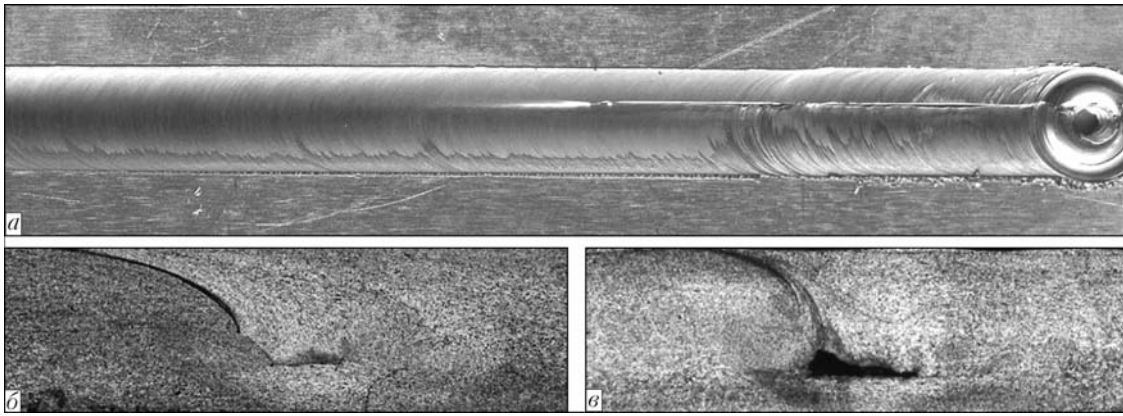


Рис. 5. Внешний вид лицевой поверхности шва (а, X1,4), полученного СТП при сборке стыка с переменным зазором (0,2...1,2 мм) между кромками, и поперечные макрошлифы сварных соединений сплава АМг2 толщиной 2 мм при зазоре 0,3 (б) и 0,5 мм (в)

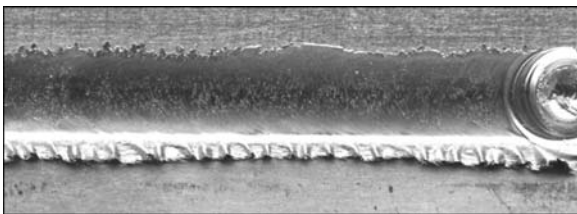


Рис. 6. Внешний вид (X2) лицевой поверхности шва, полученного СТП сплава 1420 толщиной 2 мм при чрезмерном завышении кромки со стороны отхода инструмента

оси шва не должно превышать 0,5 мм. При большем их смещении возможно образование дефектов в виде несплавления, поскольку формирование шва по всей глубине свариваемых кромок происходит не по центру стыка.

Выводы

1. В результате проведенных исследований определены оптимальные размеры и формы рабочих поверхностей буртов, наконечников инструментов, диапазоны изменения основных параметров процесса и требования к сборке и фиксации кромок для получения качественных соединений типичных алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм.

2. Сварку следует выполнять при наклоне инструмента 2...3° «углом вперед», при постоянном прижатии и погружении бурта инструмента в свариваемый металл на 0,1...0,2 мм. Отклонение осей инструмента и стыка допускается не более 0,5 мм, зазор между свариваемыми кромками — не более

15 %, а депланация кромок — не более 5 % толщины свариваемого металла.

3. Бездефектные швы при СТП пластичных низколегированных сплавов могут быть получены СТП в широком диапазоне изменения частоты вращения 1420...2880 об/мин и скорости перемещения 6...40 м/ч инструмента. Для высокопрочных сложнoleгированных сплавов рекомендуются пониженная частота (1420 об/мин) вращения инструмента и скорость сварки (6...14 м/ч).

1. *Pat. 5460317 US. Friction stir butt welding / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham et al. — Оpubл. 1995.*
2. *Arbegast W. J. Friction stir welding. After a decade of development // Welding J. — 2006. — 85, № 3. — P. 28–35.*
3. *Enomoto M. Friction stir welding: research and industrial application // Welding Intern. — 2003. — 17, № 5. — P. 341–345.*
4. *Defalco J. Friction stir welding vs. fusion welding // Welding J. — 2006. — 85, № 3. — P. 42–44.*
5. *Hassan Kh. A. A., Prangnell P. B., Norman A. F. et al. Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds // Sci. and Technol. of Welding and Joining. — 2003. — 8, № 4. — P. 257–268.*
6. *Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2002. — № 7. — С. 12–21.*
7. *Покляцкий А. Г., Иценко А. Я., Яворская М. Р. Прочность соединений тонколистовых алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием // Там же. — 2007. — № 9. — С. 50–53.*
8. *Tokisue H., Shinoda T. Applications of friction stir welding into light metals // J. Jap. Institute of Light Metals. — 1999. — 49, № 6. — P. 258–262.*

Geometric dimensions of working surfaces of the tools, requirements to edge preparation of the butt joints on aluminium alloys, and desired accuracy of their assembly and fixation have been experimentally determined. The ranges of variations of process parameters, providing defect-free welded joints, have been established.

Поступила в редакцию 02.06.2008