



ХАРАКТЕРНЫЕ ДЕФЕКТЫ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены характерные дефекты, образующиеся в швах при сварке трением с перемешиванием тонколистовых (1,8...2,5 мм) алюминиевых сплавов. Исследовано влияние основных параметров процесса сварки и различных технологических факторов на образование этих дефектов. Установлены основные причины возникновения несплавления, грата и перегрева металла на лицевой поверхности металла швов, образования несплавления в корневой части швов и формирования дефектов в виде несплошностей в центральной их части. Разработана конструкция инструментов и определены диапазоны изменения основных параметров процесса, позволяющие получать сваркой трением с перемешиванием качественные сварные соединения тонколистовых алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы малой толщины, сварное соединение, дефекты швов, несплавление, перегрев, грат, несплошности, предотвращение дефектов

Сварка трением с перемешиванием (СТП) широко применяется во многих странах мира для изготовления различных конструкций из алюминиевых сплавов [1–5]. Получение неразъемных соединений при СТП происходит в твердой фазе без расплавления основного металла, что позволяет избежать образования горячих трещин в швах, снизить степень разупрочнения сварных соединений и уменьшить уровень остаточных напряжений и деформаций в сварных узлах, тем самым повышая их эксплуатационные характеристики и ресурс [6–9].

Однако условия формирования и качество швов существенно зависят от параметров процесса сварки и различных технологических факторов. К основным параметрам (рис. 1) относят: радиус бурта r_6 и конструктивные особенности рабочих поверхностей бурта и наконечника инструмента; угол наклона инструмента Q относительно вертикальной оси; усилие прижатия F рабочего инструмента к поверхностям свариваемых деталей; глубину погружения t бурта инструмента в свариваемый металл толщиной δ и проникновения наконечника l_n в стык; частоту вращения ω инструмента вокруг вертикальной оси; скорость сварки $v_{св}$.

Стабильность процесса формирования швов и качество сварных соединений существенно зависят также от надежности фиксации свариваемых кромок, точности их подгонки и сборки, протяженности швов, конфигурации соединений и др. Эти технологические факторы могут приводить к возникновению чрезмерно больших зазоров в стыке, депланации кромок, смещению оси стыка

относительно инструмента, а также к изменению некоторых параметров процесса сварки (усилия прижатия инструмента, глубины погружения бурта или проникновения наконечника). Вследствие неправильного выбора параметров СТП или их отклонения в процессе получения соединений, а также нарушения условий сборки и фиксации кромок в швах, как правило, образуются дефекты.

Цель настоящей работы — определить основные причины появления характерных дефектов в швах при СТП тонколистовых алюминиевых сплавов, а также найти эффективные способы их предотвращения, обеспечивающие получение качественных сварных соединений.

Исследования проводили на экспериментальной лабораторной установке для СТП, позволяющей плавно регулировать скорость сварки в пределах 4...40 м/ч при частоте вращения инструмента 1420 или 2880 об/мин. Влияние параметров процесса и технологических факторов на образование дефектов в швах оценивали при сварке стыковых соединений тонколистовых алюминиевых сплавов АД31, АМцН, АМг2М, АМг6М, 1420, 1201 и 1460. Дефектность швов определяли визуально, а также с помощью металлографических исследований, выполняемых на оптическом

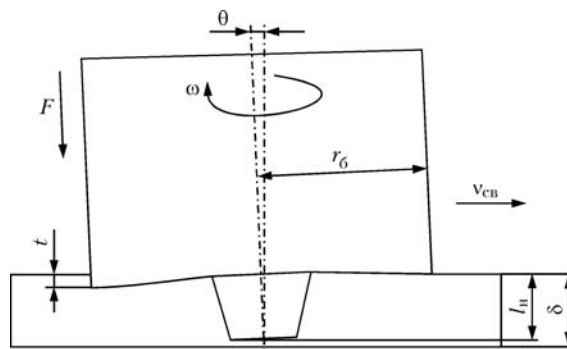


Рис. 1. Схема процесса СТП и его основные параметры

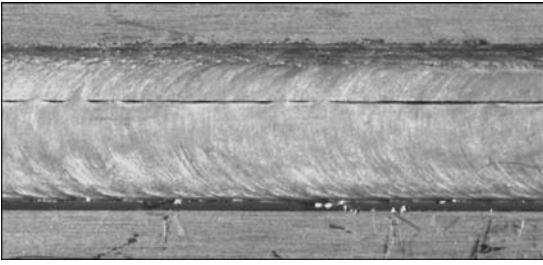


Рис. 2. Вид (X2) лицевой поверхности шва с дефектом типа несплавление, выполненного СТП на алюминиевом сплаве АМг6М толщиной 2 мм

микроскопе МИМ-8. Установлено, что при СТП тонколистовых (1,8...2,5 мм) алюминиевых сплавов можно выделить несколько видов характерных дефектов, возникающих по разным причинам.

Несплавление на лицевой поверхности шва.

К основным причинам возникновения таких дефектов можно отнести малый диаметр бурта инструмента; большой диаметр наконечника инструмента; значительное углубление на рабочей (торцевой) поверхности бурта инструмента; недостаточное заглубление бурта инструмента в свариваемый металл; недостаточное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; малая частота вращения инструмента; значительная скорость сварки; большие зазор в стыке и смещение оси стыка относительно инструмента; ненадежная фиксация свариваемых кромок.

Формирование шва при СТП происходит при избыточном давлении в объеме, ограниченном рабочими поверхностями инструмента и подкладкой. Металл нагревается за счет сил трения до пластического состояния и выдавливается наконечником, который вращается и перемещается вдоль стыка инструмента в освобождающийся за ним объем. В связи с этим при использовании инструмента с малым диаметром бурта или большим диаметром наконечника объема пластифицированного металла может быть недостаточно для полного заполнения освобождающегося за инструментом пространства, в результате чего на лицевой поверхности шва образуется дефект в виде несплавления (рис. 2).

Для стабилизации процесса сварки на торцевой поверхности бурта инструмента делают небольшое кольцевое углубление, обеспечивающее плавное и непрерывное перемещение пластифицированного металла и формирование качественной лицевой поверхности шва. Размер этой канавки должен быть таким, чтобы при небольшом заглублении бурта инструмента перемещающийся пластифицированный металл постоянно находился под избыточным давлением. Недостаточные заглубления бурта инструмента в свариваемый металл или усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей при сварке при-

водят к увеличению объема, заполняемого пластифицированным металлом при формировании шва, а следовательно, к снижению избыточного давления и образованию несплавления на лицевой поверхности шва.

Скорость сварки и частота вращения инструмента существенно влияют на тепловыделение в зоне сварки. При определенных соотношениях частоты оборотов инструмента и скорости его перемещения по стыку выделяемого при трении тепла может оказаться недостаточно для пластификации объема металла, необходимого для заполнения образуемой наконечником инструмента полости. Повысить степень пластификации металла можно за счет уменьшения скорости сварки или повышения частоты вращения инструмента.

Наличие зазора в стыке также приводит к несплавлению, поскольку объема пластифицированного металла недостаточно для заполнения дополнительного пространства между свариваемыми кромками.

При смещении инструмента относительно оси стыка формирование шва происходит в стороне. Вдоль оси стыка располагается зона термомодеформационного влияния, в которой кромки сплавляются лишь на незначительную глубину или возникает дефект в виде несплавления.

Недостаточная фиксация свариваемых кромок способствует возникновению зазора между ними, смещению оси стыка, депланации кромок и нарушению условий заглубления и прижатия бурта инструмента, в результате чего на лицевой поверхности швов образуются такие дефекты.

Перегрев металла на лицевой поверхности шва. Основные причины образования этого дефекта следующие: большой радиус бурта инструмента; чрезмерное усилие прижатия инструмента; большой угол наклона инструмента относительно вертикальной оси; значительная частота вращения инструмента; малая скорость сварки; недостаточная чистота обработки рабочей поверхности бурта инструмента; загрязнение поверхностей свариваемых деталей.

Основное количество тепла, необходимое для пластификации металла в зоне сварки, выделяется при трении рабочей поверхности бурта инструмента с поверхностями свариваемых деталей и определяется из выражения [10]

$$Q = 3/4\pi(r_6)^3 F \omega \mu / v_{св},$$

где μ — коэффициент трения.

Экспериментальные исследования показали, что при использовании инструмента с большим диаметром бурта избыток выделяемого тепла может приводить к перегреву металла в зоне сварки и ухудшению качества лицевой поверхности шва (рис. 3). Образование такого дефекта возможно

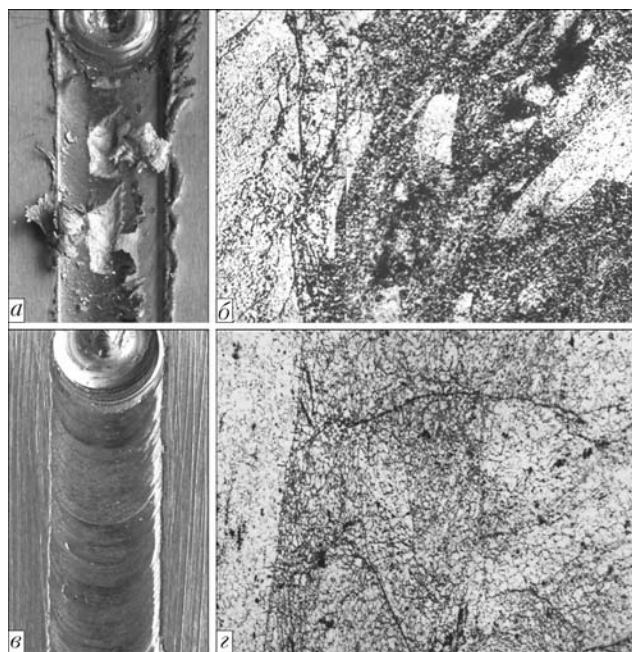


Рис. 3. Вид (а, в, $\times 1,25$) и микроструктура (б, г, $\times 125$) лицевой поверхности шва, выполненного СТП на сплаве 1420 толщиной 2 мм с перегревом (а, б) и без него (в, г)

также в случае чрезмерного прижатия бурта инструмента к поверхностям свариваемых деталей и заглабления его в металл. При этом, помимо увеличения тепловыделения, приводящего к перегреву металла, на его поверхности образуются надрывы.

К нарушениям стабильности перемещающегося потока пластифицированного металла может привести увеличение угла наклона инструмента. Чрезмерное погружение бурта инструмента в заднюю часть шва вызывает локальный перегрев металла, периодически изменяет траекторию его перемещения, способствуя формированию неравномерной лицевой поверхности шва с выступами, заглаблениями и надрывами.

Соотношение скорости сварки и частоты вращения инструмента также существенно влияет на степень нагрева и уровень пластификации металла. Поэтому уменьшение скорости сварки или повышение частоты вращения инструмента могут привести к перегреву металла и ухудшить качество лицевой поверхности шва.

Для обеспечения равномерной мелкочешуйчатости на лицевой поверхности шва рабочую поверхность бурта инструмента, как правило, шлифуют или полируют. Высокая чистота ее обработки способствует плавному и равномерному перемещению пластифицированного металла. Любые заусенцы, выступы или вмятины на ней будут вызывать периодические изменения траектории перемещения металла, скорости его движения, а также объема. При этом нарушается подвижное тепловое равновесие и непрерывность течения металла, а на лицевой поверхности шва образуются дефекты в виде

локальных участков перегретого металла и отдельных надрывов. К таким же последствиям приводят различные загрязнения в виде твердых частиц на поверхностях свариваемых деталей, которые, попадая под рабочую поверхность бурта инструмента, перемещаются вместе с пластифицированным металлом и вызывают в нем локальный перегрев, нарушая непрерывность его течения. В результате лицевая поверхность шва формируется неравномерно, местами возникают надрывы, вмятины, заусенцы.

Грат на лицевой поверхности шва. Такой дефект при СТП возникает вследствие наличия следующих причин: чрезмерного заглабления бурта инструмента в свариваемый металл; большого угла наклона инструмента относительно вертикальной оси; чрезмерного завышения (депланации) кромки со стороны отхода инструмента; отклонения инструмента от вертикальной оси влево или вправо относительно стыка; ненадежной фиксации свариваемых кромок.

При СТП для обеспечения качественного формирования шва рабочая поверхность бурта погружается в свариваемый металл на незначительную глубину. Чрезмерное ее заглавление приводит к вытеснению части пластифицированного металла на лицевой поверхности шва со стороны отхода инструмента (где векторы направления вращения инструмента и скорости сварки ориентированы в противоположных направлениях) в виде грата (рис. 4). Такой же дефект может возникнуть в швах при большом угле наклона инструмента относительно вертикальной оси, когда металл выдавливается буртом инструмента в задней части шва. Как правило, к образованию грата склонны пластичные материалы (АД31, АМцН, АМг2М), тогда как при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов (1420, 1201 и 1460) может одновременно происходить перегрев металла, образование надрывов и вытеснение металла на лицевой поверхности шва.

Депланация кромок также способствует образованию грата на лицевой поверхности шва. Но при завышении кромки со стороны набегания инструмента (где векторы направления вращения инструмента и скорости сварки совпадают) лишний металл срезается буртом, а грат остается толь-

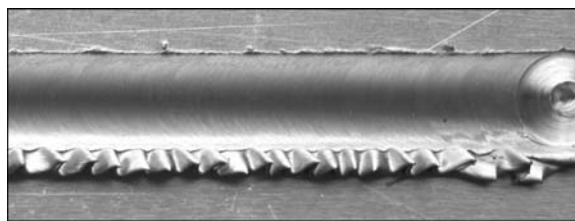


Рис. 4. Вид ($\times 1,25$) лицевой поверхности шва с дефектом типа грата, выполненного СТП на алюминиевом сплаве АМцН толщиной 2 мм

ко при завышении кромки со стороны отхода инструмента.

При СТП инструмент должен быть расположен таким образом, чтобы в процессе формирования шва не происходило отклонения его от вертикальной оси влево или вправо относительно стыка, иначе при наклоне его к кромке со стороны набегающего инструмента пластифицированный металл будет частично вытесняться из-под бурта и формировать грат.

Тонколистовые алюминиевые сплавы очень склонны к короблению в результате нагрева при сварке. Поэтому в случае ненадежного закрепления или фиксации кромок далеко от зоны сварки может произойти их смещение на определенном участке стыка в вертикальной плоскости. В таком случае отесняемый буртом инструмента металл образует дефект в виде грата.

Несплавление в корневой части шва. Причиной возникновения в швах таких дефектов являются недостаточные для данной толщины свариваемого металла длина наконечника, погружение бурта инструмента в свариваемый металл и усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; большое смещение оси стыка относительно инструмента; износ наконечника инструмента в процессе сварки.

Для обеспечения надежного перемешивания металла по всей толщине свариваемых кромок и формирования качественных швов наконечник инструмента должен иметь определенную для каждой толщины свариваемого металла длину. Если наконечник инструмента проникает практически на всю толщину кромок, то выделяемого при СТП тепла и прикладываемого силового воздействия достаточно, чтобы границы раздела поверхностей свариваемых деталей приближались по размеру к межзеренным границам. Иначе в корневой части шва возникает дефект в виде несплавления (рис. 5).

Однако даже при правильном выборе длины наконечника инструмента при СТП необходимо обеспечить требуемое погружение бурта инструмента в свариваемый металл и постоянное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей, поскольку при сварке тонколистовых материалов даже незначительные перемещения инструмента в вертикальной плоскости могут привести к несплавлению в корневой части швов. Возникновение таких дефектов возможно также при большом смещении стыка относительно инструмента. Это обусловлено очень небольшим (около 3 мм) диаметром наконечников конусообразной формы, применяемых при СТП тонколистовых материалов.

В процессе эксплуатации наконечник инструмента может изнашиваться (чаще всего в результате касания к подкладке), поэтому инструменты необ-

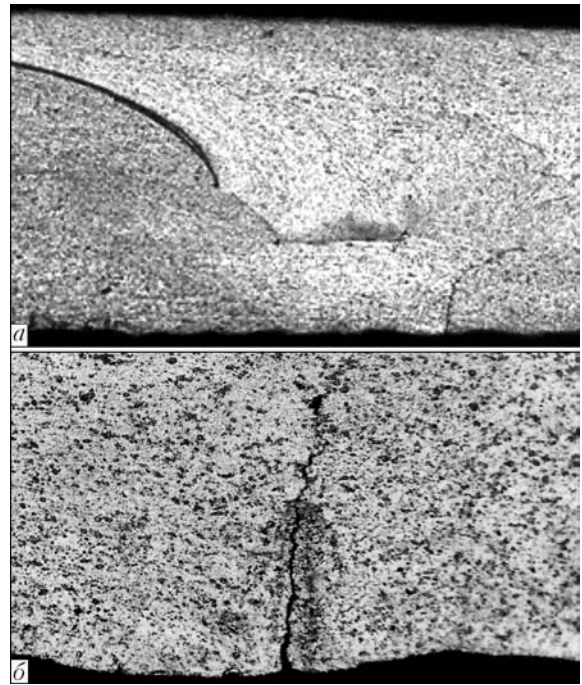


Рис. 5. Поперечный макрошлиф сварного соединения с несплавлением в корневой части шва (а, $\times 25$), полученного СТП на сплаве АМг2М толщиной 2 мм, и микроструктура ($\times 300$) участка шва (б) в месте расположения дефекта

ходимо изготавливать из прочных и стойких к износу материалов. Оснастка должна обеспечивать высокую точность сборки стыка и перемещения вдоль него инструмента, а также надежность фиксации кромок и стабильность прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей.

Внутренние дефекты в виде несплошностей. Как показали результаты экспериментов, такие дефекты могут возникать в швах в случае перегрева свариваемого металла или при недостаточном тепловыделении для пластификации в зоне сварки необходимого для формирования шва объема металла (рис. 6).

Чрезмерный нагрев металла в зоне сварки, приводящий к оплавлению межзеренных границ со скапливающимися там легкоплавкими эвтектиками, происходит в основном по тем же причинам, что и вследствие перегрева лицевой поверхности шва металла и образования грата. Только степень перегрева металла при этом более высокая.

В случае недостаточного тепловыделения в зоне сварки не обеспечивается требуемая пластичность необходимого для формирования шва объема металла, который беспрерывно перемещается по сложной траектории в ограниченном пространстве. В результате нарушается непрерывность потока пластифицированного металла, а в шве образуются внутренние, не заполненные металлом полости. Причины их появления практически такие же, как указано выше. Они приводят к несплавлению металла на лицевой поверхности шва,

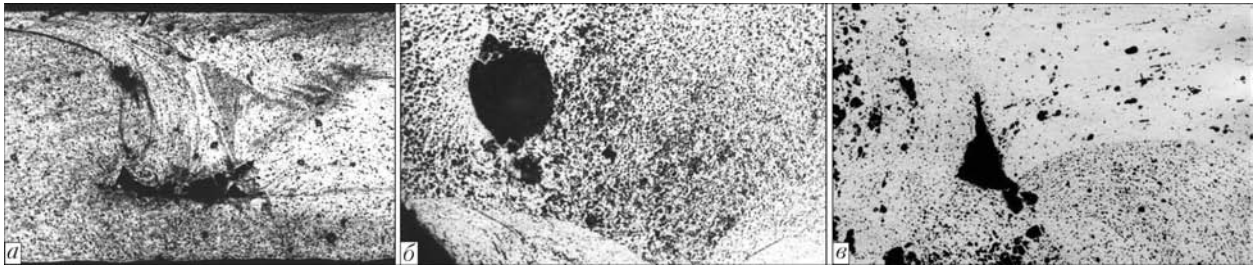


Рис. 6. Макрошлиф сварного соединения с внутренними дефектами в шве (а, $\times 25$) и микроструктура металла шва в зоне дефекта, обусловленного перегревом металла (б, $\times 500$) или недостаточным объемом пластифицированного металла (в, $\times 300$), полученного СТП на сплаве АМг6М толщиной 2 мм

но поскольку при этом объем пластифицированного металла несколько больше, дефект наружу не выходит, а остается внутри шва.

Таким образом, в результате проведения комплекса научно-экспериментальных исследований, а также на основе данных зарубежных публикаций определены диапазоны изменения основных параметров процесса, позволяющие получать способом СТП качественные сварные соединения тонколистовых алюминиевых сплавов. Разработана конструкция инструментов с наконечниками в виде усеченного конуса. Диаметр основания наконечников должен составлять 3,2...3,6 мм, а вершины — 2,4...2,6 мм. Во избежание несплавления в корневой части шва длина наконечника должна быть равна $(0,90...0,95)\delta$, оптимальный диаметр бурта инструментов — 10...12 мм. Для обеспечения стабильности формирования швов на рабочей поверхности бурта необходимо делать коническую или полусферическую канавку. Изготавливать инструменты для СТП тонколистовых алюминиевых сплавов рекомендуется из инструментальных сталей типа Р6М5. Сварку осуществляют углом вперед при наклоне инструмента относительно вертикальной оси на 2...3°. Сила прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей составляет 5...10 кН и зависит от марки свариваемого сплава.

Смещение оси стыка относительно инструмента при сварке тонколистовых алюминиевых сплавов не должно превышать 0,5 мм. Зазор между кромками допускается не более 0,3 мм. Завышенные кромки со стороны набегания инструмента не должно составлять более 25 %, а со стороны его отхода — 5 % толщины свариваемого металла. В связи с этим в процессе сварки необходимо обеспечивать надежную фиксацию свариваемых деталей поближе к стыку, а впереди инструмента

размещать прижимной ролик, препятствующий короблению кромок при сварке.

Получить качественные сварные соединения при соблюдении всех выше перечисленных условий можно только в определенных диапазонах изменения частоты вращения и скорости перемещения инструмента, которые могут быть довольно широкими для пластичных низколегированных сплавов или более узкими для высокопрочных сложнлегированных сплавов. Как правило, для исследованных толщин материалов частота вращения инструмента составляет 1000...3000 об/мин, а скорость сварки — 4...40 м/ч. В зависимости от марки свариваемого сплава и предъявляемых к сварному соединению требований необходимо экспериментальным путем определять оптимальные частоту вращения и скорость перемещения инструмента вдоль стыка.

1. *Norlin A.* A century of aluminium — a product of the future // *Svetsaren*. — 2000. — № 2. — P. 31–33.
2. *Weman K.* Equipment for aluminium welding // *Ibid.* — P. 11–13.
3. *Kallee S. W., Devenport J., Nicholas E. D.* Railway manufacturers implement friction stir welding // *Welding J.* — 2002. — № 10. — P. 47–50.
4. *Arbegast W.* Friction stir welding after a decade of development // *Ibid.* — P. 28–35.
5. *Friction stir welding flies high at NASA* / J. Ding, R. Carter, K. Lawless et al. // *Ibid.* — 2006. — № 3. — P. 54–59.
6. *Defalco J.* Friction stir welding VS. Fusion welding // *Ibid.* — P. 42–44.
7. *Okamura H., Aota K., Ezumi M.* Friction stir welding of aluminium alloy and application to structure // *J. Jap. Institute of Light Metals*. — 2000. — № 4. — P. 166–172.
8. *Lanciotti A., Vitali F.* Characterisation of friction stir welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // *Welding Intern.* — 2003. — № 8. — P. 624–630.
9. *Ericsson M., Sandstrom R.* Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds and comparison with MIG and TIG // *Intern. J. Fatigue*. — 2003. — № 25. — P. 1379–1387.
10. *Okamura H.* Point of application for FSW // *Welding Techn.* — 2003. — № 15. — P. 60–69.

Characteristic defects formed in friction stir welds on aluminium alloy sheets are considered. The effect of main welding process parameters and different technological factors on formation of these defects was studied. Basic causes of lacks of fusion, formation of flash and overheating of metal on the top surface of the weld metal, as well as lacks of fusion in the root part of the welds and formation of defects in the form of discontinuities in their central part were established. Designs of the tools were developed, and ranges of variations in the main process parameters were determined, providing sound friction stir welded joints on aluminium alloy sheets.

Поступила в редакцию 26.01.2008