

6. Результаты расчётов и результаты замеров параметров шероховатости для материала изделия КХ28М6

Угол поворота поверхности относительно движения ножа $\varphi, ^\circ$	Угол наклона поверхности относительно плоскости построения $\alpha, ^\circ$	Значения Ra , мкм (по формуле)	Значения Ra , мкм (замер на приборе)
Наружная сторона детали			
60	30	1,128	1,3
120	50	1,603	1,9
180	70	2,103	3,0
240	80	2,435	3,2
330	90	2,852	2,7
Внутренняя сторона детали			
90	60	5,09	3,3
150	70	5,347	3,1
210	80	5,926	3,2
270	90	4,925	3,0

Заключение

Полученные в результате исследования значения параметров шероховатости, а также расчётные зависимости позволяют конструкторам и технологам ориентироваться с учётом шероховатости поверхностей заготовок и деталей, изготовленных методом лазерного спекания, в дальнейших конструкторских расчётах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гибсон, Я., Розен, Д., Стракер, Б. Технологии ад-

дитивного производства. – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.

2. Шишковский, И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объёмных изделий. – М.: Физматлит, 2009. – 424 с.

REFERENCES

1. Gibson, Ya., Rosen, D., Straker, B. *Technologies of Additive Production*. – M.: Techno-sphere, 2016. – pp. 656.

2. Shishkovsky, I.V. *Laser Synthesis of Functional-Gradient Meso-Structures and Solid Products*. – M.: Phys-mathlit, 2009. – pp. 424.

Рецензент д.т.н. В.Н. Варавка

УДК 621.791.14

DOI: 10.30987/2223-4608-2019-2019-12-11-21

В.В. Овчинников¹, д.т.н., А.М. Дриц², к.т.н., Т.Ю. Скакова³, к.т.н.
^{(1,3 АНО ВО Московский политехнический университет, 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38,}
^{2 ООО "Аркион-СМЗ", 123317, Москва, Краснопресненская наб., 18)}
 E-mail: vikov1956@mail.ru

Технологическое обеспечение качества сварного шва, полученного методом трения с перемешиванием

Систематизированы основные дефекты, возникающие при сварке трением с перемешиванием (СТП) стыковых соединений алюминиевых сплавов. Выявлены основные причины возникновения таких дефектов как несплавления, грат, перегрев металла лицевой стороны шва. Определен диапазон оптимальных соотношений, выражающих длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот (подача на один оборот), в котором обеспечивается качественное формирование швов алюминиевых сплавов. Показана возможность исправления дефектов путем повторного прохода СТП.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; алюминиевые сплавы; режимы сварки; механизм формирования соединения; температура нагрева; дефекты соединений.

V.V. Ovchinnikov¹, Dr.Sc.Tech., A.M. Drits², Can.Sc.Tech., T.Yu. Skakova³, Can.Sc.Tech.
 (1,3 SA HE Moscow Polytechnic University, 38, Bolshaya Semyonovskaya, Moscow 107023,
 2 PC "Arkonik-SMZ", 18, Krasnopresnenskaya Embankment, Moscow, 123317)

Technological quality support of weld seam obtained by friction stir method

Basic defects arising during the friction stir welding (FSW) of aluminum alloy butt-joints are systemized. There are revealed basic reasons of such defects arising such as faulty fusions, a flash, a metal overheating on the right side of a seam. A range of optimum correlations expressing a length of linear displacement of a tool along a joint during its one revolution (feed for one revolution) is defined, in which a qualitative formation of aluminum alloy seams is ensured. A possibility of defect correction by means of the repeated FSW pass is shown.

Keywords: friction stir welding; aluminum alloys; welding modes; mechanism of joint formation; heating temperature; joint defect.

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) находит широкое применение во многих странах мира для изготовления различных сварных конструкций из алюминиевых сплавов [1–7]. Сварка трением с перемешиванием является процессом соединения, в результате которого выполняется сварной шов путем нагрева трением и смешивания материала в пластическом состоянии, вызванном вращением инструмента, который движется вдоль сварного шва.

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.

Применение сварки трением с перемешиванием представляется перспективным для выполнения соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов на основе системы легирования Al–Cu–Li, для которых коэффициент прочности при сварке плавлением не превышает 0,55...0,60 [6–9]. Это, возможно, откроет вторую волну применения этих сплавов в конструкциях летательных аппаратов, если принять во внимание серьезные успехи в разработке и оптимизации химических составов указанных сплавов.

Процесс сварки трением с перемешиванием подкупает своей простотой в осуществлении. Это создало иллюзорное представление, что формирование соединения при данном способе сварки будет обходиться без образования

дефектов (внутренних и внешних) в зоне перемешивания.

Несмотря на кажущуюся простоту, процесс СТП в действительности сложен. В нем взаимодействуют такие явления, как тепловыделение при трении, образование и разрушение металлических связей между сопряженными поверхностями инструмента и свариваемых заготовок в процессе их относительного движения, быстрый нагрев и охлаждение объемов металла при больших давлениях, пластическая деформация, деформационное упрочнение и рекристаллизация металла и др. Процессы перемешивающей сварки трением недостаточно изучены.

Условия формирования и качество швов существенно зависят от параметров процесса сварки и различных технологических факторов. К основным параметрам относят: частоту вращения инструмента; скорость сварки; усилие прижатия рабочего инструмента к поверхности соединяемых деталей, глубину погружения бурта и наконечника рабочего инструмента в свариваемый металл и угол наклона инструмента относительно вертикальной оси (рис. 1).

Несомненно, на условия формирования соединения и, в конечном итоге, на его качество будут воздействовать условия сборки стыкового соединения к сварке. При этом наиболее важными факторами оказывается величина зазора в стыке, отсутствие депланаций кромок, а также четкое совмещение оси инструмента с плоскостью свариваемого стыка. 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.

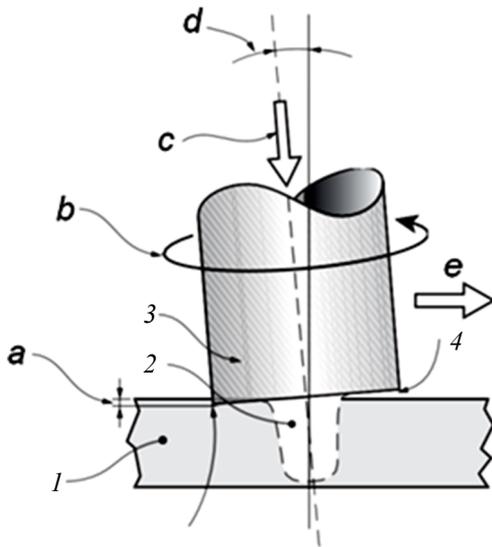


Рис. 1. Схема сварки трением с перемешиванием стыкового соединения:

1 – деталь; 2 – наконечник; 3 – инструмент; 4 – заплечик (передний край); a – глубина погружения пятки; b – направление вращения инструмента; c – осевое усилие; d – угол наклона; e – направление сварки

Цель настоящей работы заключалась в систематизации и классификации внешних и внутренних дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием стыковых соединений алюминиевых сплавов, а также в определении основных причин, которые вызывают появление характерных для СТП дефектов. Взаимосвязь вида дефекта и причин, вызывающих его образование, позволит найти эффективные меры по предотвращению дефектов и повышению качества соединений в целом.

Материалы и методы выполнения исследований

Исследования проводили на экспериментальной лабораторной установке для СТП на базе фрезерного станка с ЧПУ с усиленным приводом фрезерной головки, позволяющей плавно регулировать скорость сварки в пределах 2,0...60 м/ч при частоте вращения инструмента 710 или 1200 об/мин.

Влияние параметров режима СТП и сопутствующих технологических факторов на образование дефектов в швах оценивали при сварке стыковых соединений из алюминиевого сплава 1565ч толщиной 5 мм. Данный сплав относится к системе Al–Mg и позволяет получить общую картину образования дефектов, которая может быть перенесена на другие

алюминиевые сплавы с учетом корректировки режимов сварки.

Внешние дефекты швов определяли визуально, а также с помощью металлографических исследований, выполняемых на оптическом микроскопе при малом увеличении. Для исследования внутренних дефектов оптический микроскоп применялся с большим увеличением. Дефекты в изломах образцов после механических испытаний исследовали с помощью растрового электронного микроскопа.

Испытания сварных соединений на статическое растяжение и статический изгиб проводили на испытательной машине УТС 110М-100 при комнатной температуре. Образцы для испытаний, вырезанные поперек сварного соединения с расположением сварного шва по середине рабочей части образцов, соответствовали требованиям ГОСТ 6996. Форма и размеры плоских образцов для определения прочности металла шва в стыковом соединении соответствовали требованиям ГОСТ 6996.

Результаты исследований и их обсуждение

Одним из распространенных и часто встречающихся дефектов является перегрев лицевой поверхности зоны перемешивания (рис. 2). Основными причинами образования такого дефекта может быть большой радиус бурта инструмента; чрезмерное усилие прижатия инструмента; большой угол наклона инструмента относительно вертикальной оси; значительная частота вращения инструмента; малая скорость сварки.

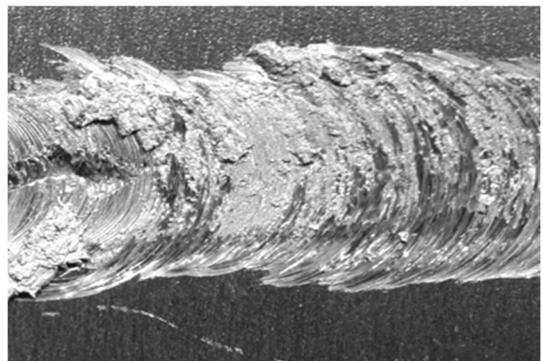


Рис. 2. Лицевая поверхность шва, выполненного СТП на сплаве 1565ч с перегревом металла (×1,3)

Результаты проведенных экспериментов показали, что при использовании инструмента с большим диаметром бурта наблюдается выделение избыточного тепла в контакте бурта с поверхностью свариваемых заготовок. Такой

избыточный нагрев выражается в перегреве металла в зоне перемешивания и ухудшении внешнего вида лицевой поверхности шва.

В том случае, когда инструмент прижимается к поверхности заготовок с чрезмерно большим усилием, перегрев поверхности шва сопровождается формированием надрывов на поверхности. Инициировать образование надрывов поверхности шва может также чрезмерно большой угол наклона инструмента. При этом пятка (часть бурта (заплечика) инструмента, расположенная в его задней части относительно направления движения), способствует перегреву металла, а также периодически меняет траекторию течения пластифицированного металла. Указанные факторы вызывают образование на поверхности шва выступов, углублений и надрывов.

Соотношение скорости сварки и частоты вращения инструмента (подача инструмента на один его оборот) 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.

Косвенной причиной образования надрывов на лицевой поверхности шва может служить слишком шероховатая поверхность бурта (заплечика). Такая шероховатость возникает, с одной стороны, при некачественном изготовлении инструмента (применение инструмента без шлифования его рабочей поверхности), а, с другой стороны, из-за налипания на рабочую поверхность инструмента алюминия в процессе сварки.

Другим внешним дефектом формирования соединения при сварке трением с перемешиванием является грат на лицевой поверхности шва. Грат – дефект, представляющий собой излишки металла, которые выступают над границей наружной поверхности сварного шва или материал, вытесненный вдоль наружной поверхности сварного шва во время сварки.

Причинами образования такого дефекта является излишнее углубление заплечика инструмента в металл свариваемых заготовок, чрезмерно большой угол наклона инструмента относительно вертикальной оси, депланация кромки со стороны отхода инструмента и недостаточно жесткая фиксация свариваемых кромок (рис. 3).

Для обеспечения качественного формирования шва рабочая поверхность заплечика инструмента погружается в свариваемый металл на небольшую глубину. Чрезмерное ее за-

глубление приводит к вытеснению части пластифицированного металла на лицевой поверхности шва со стороны отхода инструмента (где направления вращения инструмента и скорости сварки ориентированы в противоположные стороны) в виде графа.

Аналогичный дефект может возникнуть в швах при большом угле наклона инструмента относительно вертикальной оси, когда металл выдавливается буртом инструмента в задней части шва.

Алюминиевые сплавы проявляют различную склонность к образованию графа. Как правило, грат образуется чаще при сварке пластичных сплавов, таких как В-1341, 1565чМ, АМг5 и др. В случае соединения высокопрочных сплавов (1201, 1420, В-1469, 1460, 1935) образование перегрева сопровождается формированием надрывов с вытеснением пластифицированного металла на лицевую поверхность шва.

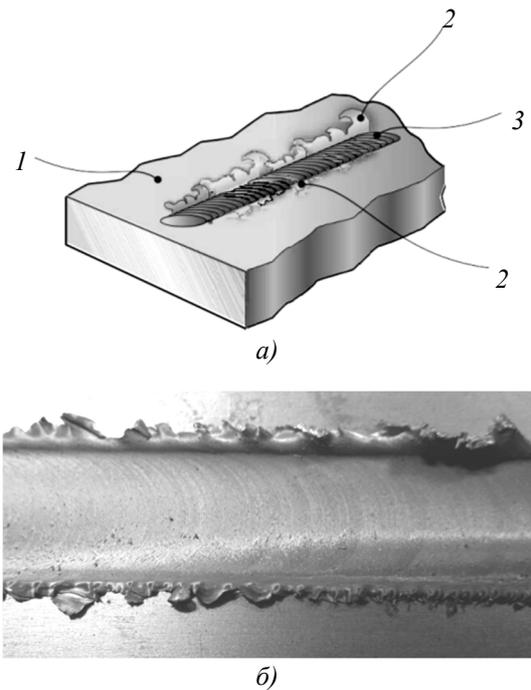


Рис. 3. Схема (а) и вид (б) ($\times 2,5$) лицевой поверхности шва с дефектом типа графа, выполненного СТП на алюминиевом сплаве 1565чМ толщиной 5 мм: 1 – свариваемая заготовка; 2 – грат на стороне отхода инструмента; 3 – шов

Депланация кромок также способствует образованию графа на лицевой поверхности шва. Но при завышении кромки со стороны набегающего инструмента лишний металл срезается буртом, а грат остается только при завышении кромки со стороны отхода инструмента. Коробление заготовок в процессе СТП также способствует образованию графа.

Глубина погружения инструмента обуславливает термомеханические условия во всех зонах сварного соединения, поскольку одновременно предопределяет величину погружения заплечика инструмента и глубину проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл. Снижение её ($< 0,10$ мм) приводит к уменьшению величины заглабления заплечика и глубины проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл. Как результат, давление под рабочей поверхностью заплечика и наконечника инструмента и величина тепловыделения в месте контакта их со свариваемым металлом уменьшаются. Вследствие этого в зоне формирования соединения не обеспечивается необходимый для качественного формирования шва объем пластифицированного металла или не достигается требуемый уровень его пластификации, что может привести к образованию поверхностных дефектов с лицевой стороны шва в виде несплавления (рис. 4).

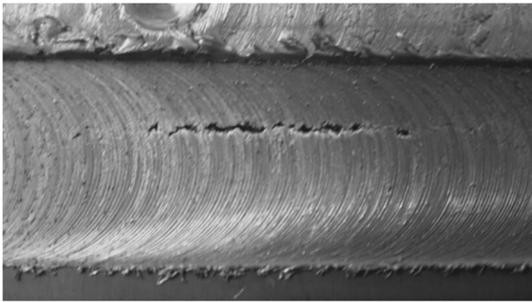


Рис. 4. Несплавление на лицевой поверхности шва сплава 1565чМ ($\times 2$)

Помимо несплавления на лицевой поверхности шва, другим видом данного дефекта является несплавление в корневой части шва (рис. 5). Причинами возникновения в швах несплавления в корневой части являются недостаточные для данной толщины свариваемого металла длина наконечника, погружение заплечика инструмента в свариваемый металл и усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых заготовок в процессе сварки; большое смещение оси стыка относительно инструмента.

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. В том случае, 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.

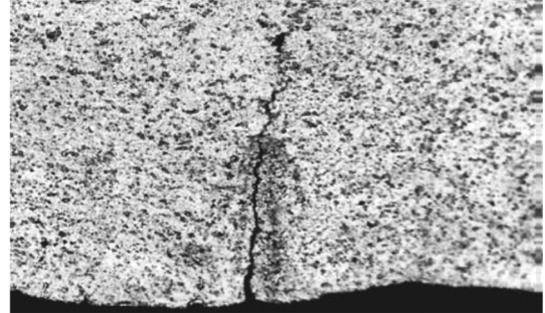


Рис. 5. Микроструктура ($\times 300$) участка шва сплава 1565чМ в месте расположения дефекта в виде несплавления в корневой части шва

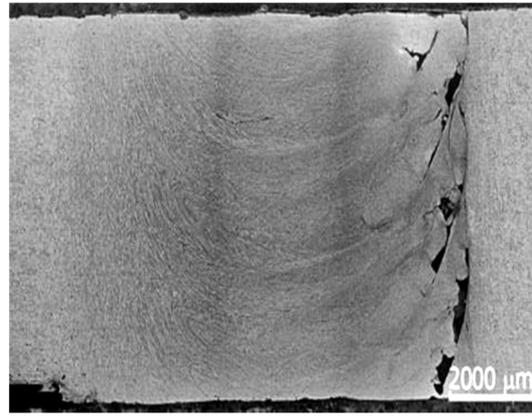
Как показали результаты исследований, а также обобщение практического опыта применения сварки трением для изготовления конструкций, помимо внешних дефектов, в сварных швах наблюдается образование внутренних дефектов в виде несплошностей.

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).

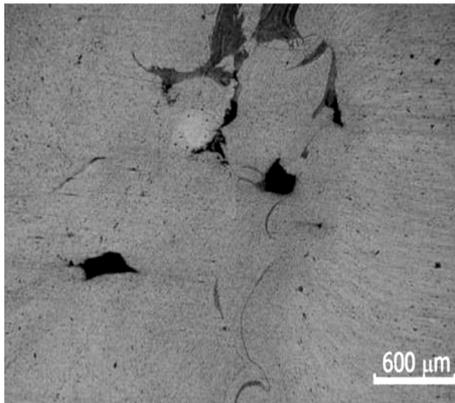
Чрезмерный нагрев металла в зоне сварки, приводящий к оплавлению межзеренных границ со скапливающимися там легкоплавкими эвтектиками, происходит в основном по тем же причинам, что и вследствие перегрева лицевой поверхности шва металла и образования грата. Однако степень перегрева металла при этом более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

В случае недостаточного тепловыделения в зоне сварки не обеспечивается требуемая пластичность необходимого для формирования шва объема металла, который непрерывно перемещается по сложной траектории в ограниченном пространстве. В результате нарушается непрерывность потока пластифицированного металла, а в шве образуются внутренние, не заполненные металлом полости.

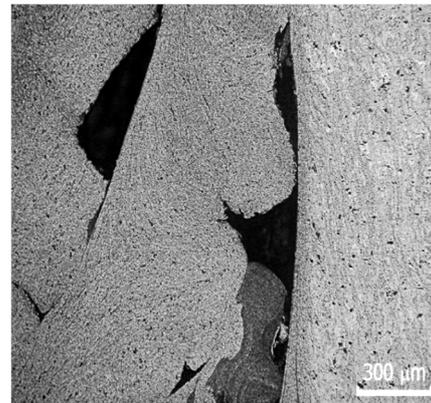
Для того чтобы получить более ясное пространственное представление о глубине залегания дефекта, выполнялся послойный металлографический анализ сечений сплава, параллельных поверхности образца, а также послойный анализ сечений, перпендикулярных оси шва.



a)



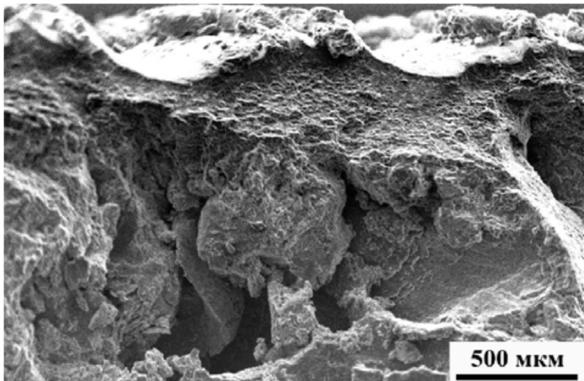
б)



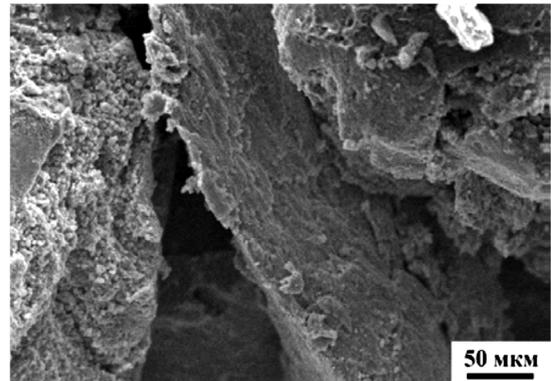
в)

Рис. 6. Микроструктура дефекта типа внутреннего несплавления, полученная методом послойного металлографического анализа:

a – на глубине 1,8 мм; *б, в* – на глубине 3,2 мм



a)



б)

Рис. 7. Строение излома в месте расположения дефекта типа внутреннего несплавления

Сварка опытных образцов осуществлялась по четырем заданным режимам, при этом варьировались такие параметры сварочного процесса как частота вращения инструмента, скорость движения инструмента относительно заготовки (скорость подачи), сила прижима инструмента к свариваемым пластинам сплава. Численное значение коэффициента тепловоголожения определялось как отношение скорости подачи инструмента к частоте вращения.

Частота вращения инструмента в данной работе принимается за основной параметр сварки, оказывающий влияние на температуру в зоне сварки, при этом с повышением частоты вращения под действием силы трения наблюдается повышение температуры пластифицированного металла, снижение предела текучести металла и реализация процесса пластического деформирования материала. Параметры режима сварки представлены в табл. 1.

Механические испытания сварных образцов показали, что вне зависимости от режима сварки они разрушались по зоне термомеханического влияния. Результаты испытаний образцов сплава в исходном состоянии и по-

сле сварки по указанным режимам, а также рассчитанный коэффициент прочности сварных соединений и вид обнаруженного дефекта приведены в табл. 2.

1. Параметры режимов сварки алюминиево-магниевого сплава 1565чМ толщиной 5 мм

Номер режима сварки	Сила прижима инструмента P , Н	Частота вращения инструмента ω , об/мин	Скорость подачи $v_{св}$, мм/мин	Коэффициент тепловложения ζ
1	25000	700	230	0,33
2	25000	600	230	0,38
3	20000	510	180	0,35
4	16000	600	180	0,30

2. Статическая прочность сварных соединений сплава 1565чМ

Режим сварки	Временное сопротивление σ_B , МПа	Коэффициент прочности	Наличие дефекта в соединении
Основной металл	355	1,0	нет
1	348	0,98	внутреннее несплавление
2	351	0,99	рыхлота
3	355	1,0	нет
4	195	0,55	дефект в виде линии стыка

Из табл. 2 следует, что коэффициенты прочности сварных соединений и величина временного сопротивления для пластин толщиной 5,0 мм, сваренных по режимам 2 и 3 близки к свойствам исходного материала. Разрушение этих образцов происходило в зоне термомеханического влияния на «отступающей» стороне по линии стыка. Процесс разрушения проходил в два этапа – раскрытие материала по линии стыка в нижней части сварного шва с последующим доломом остального объема материала.

На рис. 7 представлены результаты фрактографических исследований поверхности разрушенного образца, иллюстрирующие расположение дефекта в виде внутреннего несплавления на поверхности излома. По данным анализа характера поверхности разрушения видно, что прилегающий к дефекту материал разрушался квазихрупко.

Присутствие такого рода дефекта не только влияет на снижение прочности при статическом растяжении сварного соединения, но можно предположить, что произойдет снижение усталостной долговечности, поскольку в этих условиях поверхностный дефект будет играть роль концентратора напряжений и приводить к формированию усталостной трещины материала в зоне сварки [8 – 11].

Повышение частоты вращения инструмента и существенное уменьшение силы прижима свариваемых листов привели к появлению но-

вого вида дефекта, описанного в литературе как линия стыка в прикорневой зоне сварного шва.

Образцы, сваренные по этому режиму, при испытании на растяжение показали самые низкие значения прочности (см. табл. 2) вследствие существенного снижения эффективного сечения материала в сварном соединении. Возникновение этого вида дефекта также связано с неправильным выбором основных параметров сварки. Подобный дефект наблюдался при сварке с повышенной частотой вращения инструмента в сочетании с недостаточной силой прижима свариваемых пластин.

Форма стыковой линии хорошо проявляется на металлографических шлифах при слабом травлении, при статическом растяжении образцов с таким дефектом поверхность разрыва материала повторяет ее очертания (рис. 8, а). При изучении поверхности разрыва методом растровой электронной микроскопии видны слои луковичной структуры сварного шва (рис. 8, б).

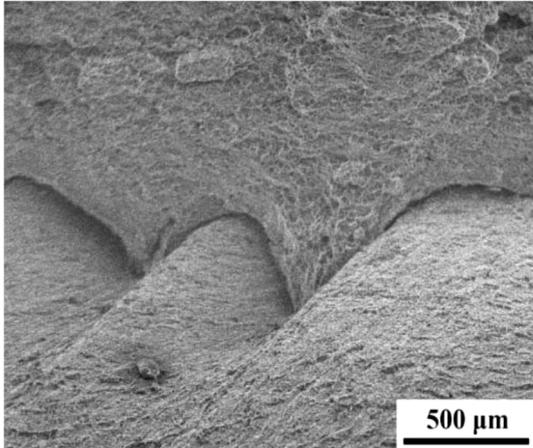
Ширина полос луковичной структуры оказывает заметное влияние на траекторию распространения трещины. Установлено, что при статическом растяжении начальная трещина зарождается в корне шва на линии стыка и распространяется вдоль нее, до тех пор, пока направление линии стыка не совпадет с направлением растягивающей нагрузки. Даль-

нейшее разрушение осуществляется в направлении максимальных касательных напряжений. Таким образом, наличие линии стыка является причиной разрушения образцов при низких растягивающих напряжениях.

Анализ поверхности излома образцов соединений с дефектом в виде линии стыка показал, что ее появление обусловлено наличием оксидного слоя на начальной поверхности торца, который деформируется в результате течения материала при воздействии инструмента. Выделение тепла при сварке трением с перемешиванием снижается с уменьшением скорости вращения инструмента и увеличением скорости сварки. Низкое выделение тепла оказывается недостаточным для разрушения оксидного слоя во время сварки трением с перемешиванием.



а)



б)

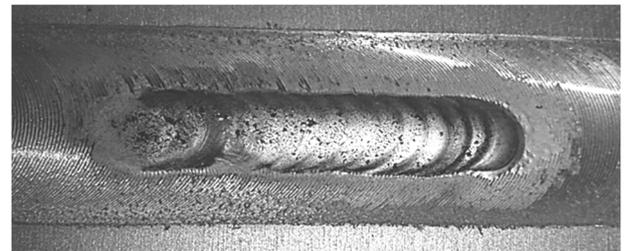
Рис. 8. Фрагмент разрушенного образца (а) и разрушение материала по полосам луковичной структуры, растровая электронная микроскопия (б)

Анализ результатов проведенных исследований позволяет представить следующую взаимосвязь этапов процесса сварки трением с перемешиванием: выбор режима сварки → особенности пластического течения материала в зоне движущегося инструмента → формирование дефектной или бездефектной структуры соединения → физико-механические свойства соединения. Очевидно, что первый этап процесса при правильном выборе основных тех-

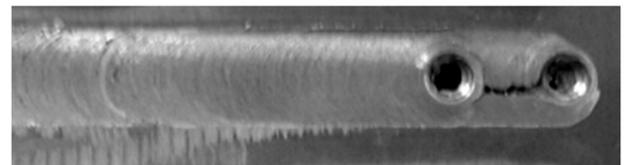
нологических параметров – частоты вращения инструмента и скорости сварки дает, возможность получения плотной мелкозернистой структуры сварного шва с высокими прочностными свойствами.

При изготовлении сварных узлов техническими условиями регламентируются нормы недопустимых без исправления дефектов, в соответствии с категорией соединения оговаривается их максимальный размер, количество и расположение. В частности, в зависимости от ответственности конструкции и толщины свариваемого стыка оговаривается максимально допустимый размер дефекта, при превышении которого необходимо исправлять дефектное место выборкой механическим путем с повторной его подваркой.

В случае, если конструкция изготавливается из термически неупрочняемых алюминиевых сплавов, относящихся к свариваемым сплавам при сварке плавлением (АМг5, 1565ч, АМгб), то возможны два варианта подварки дефекта: СТП вторым проходом и ручной аргонодуговой сваркой с присадочным металлом. Второй вариант выглядит особенно предпочтительным при устранении дефектов небольшой протяженности (рис. 9).



а)



б)

Рис. 9. Подварка шва СТП на сплаве 1565чМ, выполненная ручной аргонодуговой сваркой (а) и повторным проходом СТП (б)

При исправлении дефектов путем подварок наблюдается изменение свойств металла шва и близлежащих участков зоны термического влияния. Степень изменения свойств сварных соединений определяется технологией выполнения подварок.

Поэтому актуальным является оценка влияния повторных проходов СТП на механические свойства сварных соединений, а также влияние подварки аргонодуговой сваркой на

предел прочности сварного соединения, предел прочности металла шва и угол изгиба.

Если суммарная длина дефектных участков превышает 25...30 % от общей длины шва, то, как правило, осуществляют повторную перепварку сварного шва на полную длину. Для выполнения подварки на всю длину шва для гарантированного устранения дефектов рекомендуется использовать инструмент, аналогичный по профилю рабочему инструменту, но с увеличенными размерами заплечика и стрежня примерно на 20 ...25 %.

Поэтому актуальным является оценка влияния повторных проходов СТП на механические свойства сварных соединений, а также влияние подварки аргонодуговой сваркой на предел прочности сварного соединения, предел прочности металла шва и угол изгиба.

В табл. 3 приведены результаты механических испытаний сварных соединений исследуемого сплава 1565чМ, выполненных СТП, после подварок дефектов сваркой трением с перемешиванием за различное количество проходов.

3. Влияние подварок, выполненных СТП, на свойства сварных соединений сплава 1565чМ

Количество подварок	1565чМ		
	σ_B , МПа	$\sigma_B^{шва}$, МПа	α , °
0	346	385	180
1	340	372	180
2	332	350	180
3	325	341	170
4	320	338	170

Примечание. Приведены средние данные по результатам испытаний 10-ти образцов на вариант.

4. Влияние подварок ручной аргонодуговой сваркой соединений СТП сплава 1565чМ на их механические свойства

Количество подварок	σ_B , МПа	$\sigma_B^{шва}$, МПа	α , °
Сварное соединение СТП	346	385	180
Сварное соединение АрДЭС	345	315	170
Сварное соединение СТП + 1 подварка АрДЭС	334	319	167
Сварное соединение СТП + 2 подварки АрДЭС	322	310	155
Сварное соединение СТП + 3 подварки АрДЭС	311	300	135

Примечание. Приведены средние данные по результатам испытаний 5-ти образцов на вариант.

Анализ полученных данных показывает, что подварки дефектов соединений СТП аргонодуговой сваркой вызывают снижение показателей механических свойств соединений. Сопоставление данных табл. 4 с данными табл. 3 позволяет сделать заключение, что темп снижения прочностных и пластических свойств соединений при выполнении подвар-

ки сваркой плавлением существенно выше, чем при подварке повторным проходом СТП.

Металлографические исследования показали, что причиной снижения механических свойств соединений сплава 1565чМ, выполненных СТП, при подварках аргонодуговой сваркой может быть изменение структуры металла шва СТП под влиянием дугового нагре-

Увеличение числа подварок дефектов соединений исследуемых сплавов методом сварки трением с перемешиванием (СТП) мало сказывается на свойствах соединений при количестве подварок не более трех.

При выполнении подварки шва СТП ручной аргонодуговой сваркой на поверхности подварочного шва отчетливо просматриваются пленки оксидов темного цвета, которые были замешаны в металл шва СТП и затем всплыли на поверхность подварочного шва при появлении расплава сварочной ванны.

Проведенные эксперименты показали, что, если заготовки были подготовлены к СТП в соответствии с технологией, принятой для подготовки алюминиевых сплавов к дуговой сварке, то обильного всплытия оксидных пленок не обнаруживается.

Такая технология подготовки деталей включает химическое травление в щелочи и осветление в 30 %-ном водном растворе азотной кислоты. После травления непосредственно перед сваркой рекомендуется торцы и поверхность свариваемых кромок на величину, превышающую радиус опорного бурта (заплечика) инструмента, подвергать механическому шабрению. Допустимый временной интервал между шабрением и сваркой ограничивается 48 часами [12 – 14].

Такая технология подготовки деталей включает химическое травление в щелочи и осветление в 30 %-ном водном растворе азотной кислоты. После травления непосредственно перед сваркой рекомендуется торцы и поверхность свариваемых кромок на величину, превышающую радиус опорного бурта (заплечика) инструмента, подвергать механическому шабрению. Допустимый временной интервал между шабрением и сваркой ограничивается 48 часами [12 – 14].

В табл. 4 приведены результаты механических испытаний соединений СТП, которые подвергались подварке ручной аргонодуговой сваркой с присадочной проволокой Св. АМг61.

Такая технология подготовки деталей включает химическое травление в щелочи и осветление в 30 %-ном водном растворе азотной кислоты. После травления непосредственно перед сваркой рекомендуется торцы и поверхность свариваемых кромок на величину, превышающую радиус опорного бурта (заплечика) инструмента, подвергать механическому шабрению. Допустимый временной интервал между шабрением и сваркой ограничивается 48 часами [12 – 14].

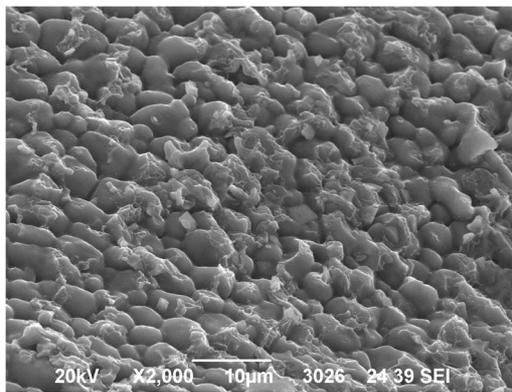
Увеличение числа подварок дефектов соединений исследуемых сплавов методом сварки трением с перемешиванием (СТП) мало сказывается на свойствах соединений при количестве подварок не более трех.

При выполнении подварки шва СТП ручной аргонодуговой сваркой на поверхности подварочного шва отчетливо просматриваются пленки оксидов темного цвета, которые были замешаны в металл шва СТП и затем всплыли на поверхность подварочного шва при появлении расплава сварочной ванны.

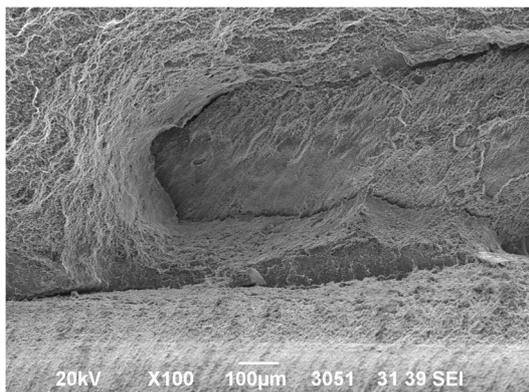
ва. Данное изменение проявляется в образовании довольно интенсивной пористости на границе между структурой зоны перемешивания и литой структурой подварочного шва (рис. 10).

Применение в качестве ремонтного варианта аргонодуговой сварки также позволяет устранить дефекты типа рыхлоты в сварном соединении, выполненном СТП. Отдельные сварные швы характеризуются наличием пористости, располагающейся в основном в зоне сплавления. Структура переходной зоны от сварки плавлением к СТП характеризуется чередованием зон равноосного мелкого зерна и столбчатых кристаллитов.

Таким образом, чем сильнее изменения в структуре шва СТП при подварке аргонодуговой сваркой, тем ближе будут механические свойства соединения к значениям свойств соединения, полученного сваркой плавлением с наложением подварок.



а)



б)

Рис. 10. Рыхлота (а) и оксидная пленка (б) на границе между структурой шва СТП и структурой подварочного шва, выполненного ручной аргонодуговой сваркой

Выводы

1. При сварке трением с перемешиванием (СТП) алюминиевых сплавов возможно обра-

зование внешних и внутренних дефектов зоны перемешивания (металла шва). К внешним дефектам относятся перегрев металла на лицевой поверхности шва, образование несплавлений на лицевой поверхности шва, несплавления в корневой части шва, а также грат. К внутренним дефектам можно отнести несплошности и линию стыка.

2. Для получения качественных соединений алюминиевых сплавов необходимо выполнять сварку при определенном соотношении частоты вращения рабочего инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка (величина подачи на один оборот). Диапазоны изменения величины подачи могут быть довольно широкими для пластичных низколегированных сплавов или более узкими для высокопрочных сложнелегированных сплавов.

3. 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.

4. Повторные проходы СТП для устранения дефектов швов, полученных сваркой трением с перемешиванием, оказывают меньшее влияние на механические свойства соединений исследуемых сплавов по сравнению с подварками, выполняемыми сваркой плавлением. Поэтому допустимо применение до трех повторных подходов для устранения дефектов СТП.

5. Установлена возможность исправления не протяженных дефектов соединений СТП свариваемых алюминиевых сплавов типа 1565ч ручной аргонодуговой сваркой. При этом подготовка поверхности заготовок к СТП должна выполняться в соответствии с требованиями, существующими для сварки плавлением, а для исправления дефектов допускается однократная подварка ручной аргонодуговой сваркой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Friction stir welding flies high at NASA / J. Ding, R. Carter, K. Lawless et al. // Ibid. — 2006. — № 3. — P. 54–59.
2. Ищенко А.Я., Подельников С.В., Покляцкий А.Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) // Автоматическая сварка. — 2007. — № 11. — С. 32–38.
3. Lanciotti A., Vitali F. Characterisation of friction stir welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // Welding Intern. — 2003. — № 8. — P. 624–630.
4. Chong Gao. Microstructure and mechanical properties of friction spot welding aluminium–lithium alloys / Chong Gao, Rongqiang Cao, Yu Ma. // Materials and Design. — 2015. — Vol. 83. — P. 719–727.
5. Reynolds A.P. Processing–property correlation in fric-

tion stir welds / A.P. Reynolds, W.D. Lockwood, T.U. Seidel // *Materials Science Forum.* – 2000. – Vol. 331. – P. 1719–1724.

6. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. – М.: Руда и металлы, 2017. – 440 с.

7. Карманов В.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва / В.В. Карманов, А.Л. Каменева, В.В. Карманов // *Вестник ПНИПУ.* – Аэрокосмическая техника, 2012. – № 32. – С. 67–80.

8. Chen Y. Effect of initial base metal temper on microstructure and mechanical properties of friction stir processed of Al-7B04 alloy / Y. Chen, H. Ding, Z. Cai, J. Zhao, J. Li // *Materials Science and Engineering: A.* – 2016. – Vol. 650. – P. 396–69.

9. Chen H.B. The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds / H.B. Chen, K. Yan, S.B. Chen, C.Y. Jiang, Y. Zhao // *Materials Science and Engineering A.* – 2006. – Vol. 433. – P. 64–69.

10. Kumar N. The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation / N. Kumar, S.V. Katlas // *Materials Science and Engineering A.* – 2008. – Vol. 485. – P. 367–374.

11. Hao H.L. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Mg alloy / H.L. Hao, D.R. Ni, H. Huang, D. Wang, B.L. Xiao, Z.R. Nie, Z.Y. Ma // *Materials Science and Engineering: A.* – 2013. – Vol. 559. – P. 889–896.

12. Hirata T. Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminium alloy / T. Hirata, T. Ogiri, H. Hagino, T. Tanaka, Y. Chung // *Materials Science and Engineering: A.* – 2007. – Vol. 456. – P. 344–349.

13. Дриц А.М., Овчинников В.В., Гуреева М.А. и др. Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565ч при низких температурах. // *Электрометаллургия.* 2016. – №6. – С.2–9.

14. Овчинников, В.В., Дриц, А.М. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием соединений алюминиевых сплавов системы Al-Mg // *Научно-технические технологии в машиностроении.* – 2019. – №3 (93). – С.4–11.

REFERENCES

1. Friction stir welding flies high at NASA / J. Ding, R. Carter, K. Lawless et al. // *Ibid.* — 2006. — № 3. — P. 54–59.

2. Ishchenko A.Ya., Podielnikov S.V., Poklyatsky A.G. Aluminum alloy friction stir welding (review) // *Automatic Welding.* – 2007. – No.11. – pp. 32–38.

3. Lanciotti A., Vitali F. Characterisation of friction stir welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // *Welding Intern.* — 2003. — № 8. — P. 624–630.

4. Chong Gao. Microstructure and mechanical properties of friction spot welding aluminium–lithium alloys / Chong Gao, Rongqiang Cao, Yu Ma. // *Materials and Design.* – 2015. – Vol. 83. – P. 719–727.

5. Reynolds A.P. Processing–property correlation in friction stir welds / A.P. Reynolds, W.D. Lockwood, T.U. Seidel // *Materials Science Forum.* – 2000. – Vol. 331. – P. 1719–1724.

6. Drita A.M., Ovchinnikov V.V. Aluminum alloy welding. – М.: *Ore and Metals*, 2017. – pp. 440.

7. Karmanov V.V. Aluminum alloy friction stir welding: essence and process specific peculiarities, peculiarities of weld seam structure / V.V. Karmanov, A.L. Kameneva, V.V. Karmanov // *Bulletin of PNIPIU.* – *Aerospace Engineering*, 2012. – No.32. – pp. 67–80.

8. Chen Y. Effect of initial base metal temper on microstructure and mechanical properties of friction stir processed of Al-7B04 alloy / Y. Chen, H. Ding, Z. Cai, J. Zhao, J. Li // *Materials Science and Engineering: A.* – 2016. – Vol. 650. – P. 396–69.

9. Chen H.B. The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds / H.B. Chen, K. Yan, S.B. Chen, C.Y. Jiang, Y. Zhao // *Materials Science and Engineering A.* – 2006. – Vol. 433. – P. 64–69.

10. Kumar N. The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation / N. Kumar, S.V. Katlas // *Materials Science and Engineering A.* – 2008. – Vol. 485. – P. 367–374.

11. Hao H.L. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Mg alloy / H.L. Hao, D.R. Ni, H. Huang, D. Wang, B.L. Xiao, Z.R. Nie, Z.Y. Ma // *Materials Science and Engineering: A.* – 2013. – Vol. 559. – P. 889–896.

12. Hirata T. Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminium alloy / T. Hirata, T. Ogiri, H. Hagino, T. Tanaka, Y. Chung // *Materials Science and Engineering: A.* – 2007. – Vol. 456. – P. 344–349.

13. Drita A.M., Ovchinnikov V.V., Gureeva M.A. et al. Stress-strain properties of sheet welds of alloy 1565ch at low temperatures. // *Electrometallurgy.* 2016. – No.6. – pp. 2–9.

14. Ovchinnikov, V.V., Drita, A.M. Technological peculiarities of friction stir welding of aluminum alloys of Al-Mg system // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2019. – No.3 (93). – pp. 4–11.

Рецензент д.т.н. В.В. Мартынов

