



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Влияние основных параметров процесса сварки трением с перемешиванием на дефектность структуры сварного соединения

Ольга Сизова^{a,*}, Александр Колубаев^b, Евгений Колубаев^{1,c}, Анастасия Заикина^d, Валерий Рубцов^e

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический 2/4, г. Томск, 634055, Россия

^a <http://orcid.org/0000-0001-9177-6602>, ovs@ispms.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-2839-5249>, kav@ispms.tsc.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.tsc.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0001-8507-3417>, aaz@ispms.tsc.ru,

^e <http://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.71' 721::621.791.14

История статьи:

Поступила: 26 сентября 2017

Рецензирование: 11 октября 2017

Принята к печати: 25 октября 2017

Доступно онлайн: 15 декабря 2017

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием

Алюминиевый сплав

Дефекты структуры

Статическое растяжение

Разрушение

Финансирование:

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы

АННОТАЦИЯ

Цель: выявление особенностей разрушения сварных соединений алюминиево-магниевого сплава с дефектной структурой, выполненных способом сварки трением с перемешиванием. В работе представлены результаты анализа разновидностей структурных дефектов сварного шва и их влияние на прочность сварных соединений при статическом растяжении. Приведен краткий обзор основных причин возникновения несплошностей структуры сварного соединения, дана оценка влияния основных параметров температурного режима в зоне сварки на получение качественного шва. На основании данных фратографического анализа поверхности разрушения образцов сварных соединений и послойного металлографического анализа материала в зоне дефекта описаны виды характерных дефектов и обсуждается природа их возникновения. Полученные результаты указывают на определяющую роль характера пластического течения материала в зоне движущегося инструмента в формировании структуры и свойств сварного соединения и могут быть учтены при выборе режимов сварки трением с перемешиванием и контроле качества сварных соединений. **Методы:** экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке для сварки способом трения с перемешиванием, изготовленной в ИФПМ СО РАН. Испытания на статическое растяжение были выполнены с помощью разрывной машины типа УТЦ110М-100. Структурные исследования проводили методами оптической и растровой микроскопии с использованием электронного сканирующего микроскопа MiniSEM. **Результаты и обсуждение.** На примере пластин сплава АМг5М разной толщины показано влияние основных параметров технологического процесса сварки на качество сварных соединений. Показано, что режим сварки обуславливает вид и размер образующихся дефектов, механическую прочность и характер разрушения сварных соединений. По данным сравнительного анализа топографии излома образцов после растяжения установлено, что в зоне дефекта имеется переход материала от вязкого характера разрушения к хрупкому. Выявлены особенности формирования дефектной структуры сварного шва при варьировании величиной тепловложения при сварке. Показано, что не толщина свариваемых пластин оказывает влияние на тип образующегося дефекта, а количество тепла, вводимое в зону сварки. На основании полученных результатов фратографического анализа поверхности разрушения образцов сварных соединений и послойного металлографического анализа материала в зоне дефекта описаны виды характерных дефектов и обсуждается природа их возникновения.

Для цитирования: Влияние основных параметров процесса сварки трением с перемешиванием на дефектность структуры сварного соединения / О.В. Сизова, А.В. Колубаев, Е.А. Колубаев, А.А. Заикина, В.Е. Рубцов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 4 (77). – С. 19–29. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-4-19-29.

Введение

Сварка трением с перемешиванием, успешно применяемая для соединения различных металлов и сплавов, наибольшее распространение

получила при сварке конструкций из алюминия и его сплавов. С начала появления технологии сварки трением с перемешиванием и до настоящего времени большое количество зарубежных и отечественных исследований посвящалось главным образом изучению механизма формирования структуры шва. В этом направлении достигнуты большие успехи. Результаты исследований, посвященных описанию своеобразной структуры и механических свойств сварного

*Адрес для переписки

Сизова Ольга Владимировна, д.т.н., профессор
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук
пр. Академический, 2/4, 634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (382) 228-69-70, e-mail: ovs@ispms.ru

шва, полученного сваркой трением с перемешиванием, показали, что при внешней простоте схемы процесса и идентичности строения сварного шва у широкого класса материалов добиться качественного соединения не всегда возможно из-за возникающих дефектов, отличных от характерных для сварки плавлением [1–4]. Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению структуры и свойств сварных соединений различных металлов и сплавов, полученных способом сварки трением с перемешиванием, однозначного мнения о влиянии дефектной структуры сварного шва на характер разрушения соединения не существует. Изучение этого влияния является в настоящее время важнейшей задачей, от решения которой зависит успех широкого внедрения в промышленность этой перспективной технологии.

Действующие в области сварки плавлением стандарты, определяющие вид и допустимость образующихся дефектов, а также технологические причины их возникновения для сварки трением с перемешиванием оказались неприменимы в основном из-за специфики структурообразования сварного шва: слоистого строения и наличия резкой границы между ядром шва и зоной термомеханического влияния [5–7]. Применение сварки трением с перемешиванием для ответственных конструкций требует учета специфичности образуемых при данном методе сварки дефектов и определения их влияния на прочность сварного соединения.

Самыми значимыми параметрами при СТП являются частота вращения инструмента и скорость его поступательного движения при формировании шва, а также их соотношение. Эти параметры управляют температурным режимом в зоне сварки и должны обеспечивать оптимальный баланс для получения качественного шва. С одной стороны, не должно быть перегрева материала, а с другой – материал должен быть достаточно разогрет для формирования качественного бездефектного шва.

Для получения систематических данных, которые могли бы послужить в дальнейшем базой для первичной классификации дефектов, представляется полезным применение метода целенаправленного варьирования основными параметрами режима сварки с целью идентификации

образующихся дефектов и изучения их влияния на прочность сварных соединений.

Целью работы является изучение влияния основных параметров технологического режима сварки трением с перемешиванием алюминиево-магниевого сплава на дефектность структуры и механические свойства сварных соединений листов алюминиево-магниевого сплава различной толщины.

Методика исследований

Сварку листового проката из алюминиево-магниевого сплава АМг5М толщиной 5,0 и 8,0 мм, исходный химический состав которого соответствовал составу сплава АМг5 по ГОСТ 4784–97, выполняли на лабораторной установке, изготовленной в ИФПМ СО РАН для экспериментальных исследований технологических режимов сварки способом трения с перемешиванием (рис. 1). Вращение инструмента осуществлялось против часовой стрелки.

Сварка выполнялась с помощью инструментов, формирующих у свариваемых пластин выбранной толщины шов шириной ~20 мм, по режимам, приведенным в табл. 1. Основное внимание при сварке уделялось поиску режима сварочного процесса, позволяющего получить сварное соединение с минимальным количеством дефектов.

С этой целью варьировались следующие параметры сварочного процесса: скорость вращения инструмента и скорость его движения относительно заготовки свариваемого материала (скорость подачи), а также сила прижима инструмента к заготовке. Для оценки совместного влияния этих параметров на качество формирующегося сварного шва рассчитывали изменение коэффициента тепловложения, характеризующего тепло, вводимое в зону сварки. Численное значение коэффициента тепловложения определялось как отношение скорости подачи инструмента к скорости его вращения [8–9].

Качество сварного соединения оценивали визуально, а также методом оптической микроскопии. Фрактографические исследования поверхности разрушения образцов после испытаний на растяжение были выполнены с помощью электронного сканирующего микроскопа MiniSEM (Южная Корея). Для получения

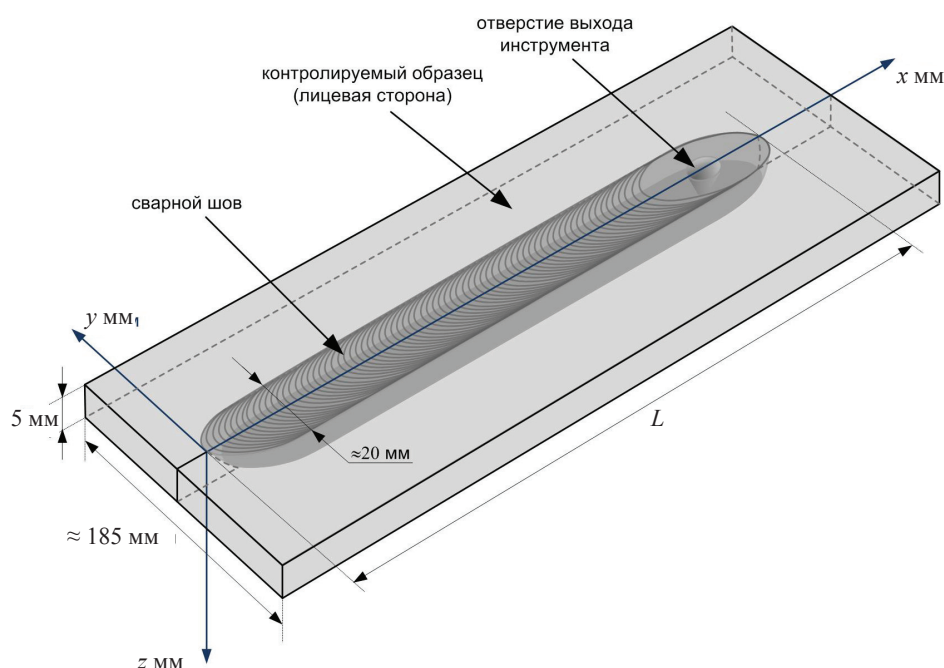


Рис. 1. Экспериментальная установка и схема образования сварного соединения

Fig. 1. Laboratory machine and the scheme of welding joint formation

Таблица 1

Table 1

Параметры режимов сварки
The friction stir welding parameters

Номер режима сварки	Сила прижима инструмента (кг), P	Скорость вращения инструмента (об/мин), ω	Скорость подачи (мм/мин), $V_{св}$	Коэффициент тепловложения, η
5 мм				
1	2600 кг	670 об/мин	500 мм/мин	0,75
2	2600 кг	560 об/мин	500 мм/мин	0,89
3	2100 кг	450 об/мин	300 мм/мин.	0,67
4	1500 кг	560 об/мин	300 мм/мин	0,53
8 мм				
5	2700 кг	600 об/мин	450 мм/мин	0,75
6	2900 кг	560 об/мин	550 мм/мин	0,92
7	2600 кг	500 об/мин	400 мм/мин	0,80
8	2100 кг	550 об/мин	350 мм/мин	0,64

более четкого представления об обнаруженных дефектах выполнялся послойный металлографический анализ сечений сплава, параллельных поверхности образца, а также перпендикулярных к оси шва.

Результаты и их обсуждение

Образцы для испытаний на статическое растяжение сварных соединений исследованного алюминий-магниевого сплава были изготовле-

ны согласно требованиям ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. Результаты испытаний образцов сплава в исходном состоянии и после сварки по указанным режимам, а также рассчитанный коэффициент прочности сварных соединений, вид обнаруженного дефекта приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что коэффициенты прочности сварных соединений и величина временного сопротивления для пластин толщиной 5,0 мм, сваренных по режимам 2–3, и по режи-

Таблица 2

Table 2

Статическая прочность сварных соединений сплава АМг5М
Static tensile strength of the friction stir welded Al 5083 alloy

Режим сварки	Временное сопротивление, МПа	Коэффициент прочности	Тип дефекта
5 мм			
Основной металл	$327,0 \pm 2,0$	1,0	Нет
1	$321,1 \pm 16,4$	0,98	Дефект типа wormhole
2	$325,0 \pm 14,0$	0,99	Рыхлость
3	$327,6 \pm 41,1$	1,00	Нет
4	$183,0 \pm 2,0$	0,56	Линия стыка (Lazy S)
8 мм			
Основной металл	$318,0 \pm 2,0$	1,0	Нет
5	$271,0 \pm 8,5$	0,85	Дефект типа wormhole
6	$250,0 \pm 66,0$	0,77	Рыхлость, дефект типа wormhole
7	$314,0 \pm 7,0$	0,99	Нет
8	$216,9 \pm 59,0$	0,68	Линия стыка (Lazy S)

му 7 – для пластин толщиной 8,0 мм, были близки к свойствам исходного материала. Разрушение этих образцов происходило в зоне термомеханического влияния на «отступающей» стороне по линии стыка. На рис. 2 показан характерный вид поверхности разрушения после испытаний на статическое растяжение и приведена фрактограмма поверхности излома этих образцов. Из полученных результатов следует, что процесс разрушения проходил в два этапа – раскрытие

материала по линии стыка в нижней части сварного шва с последующим доломом остального объема материала.

В структуре образцов, сварка которых была выполнена с самой высокой скоростью вращения инструмента (режимы 1, 5 и 6) наблюдали дефекты сварки, получившие в англоязычной литературе название «wormhole», или «червоточина» [10–15]. Это наиболее часто встречающийся тип дефекта при сварке трением

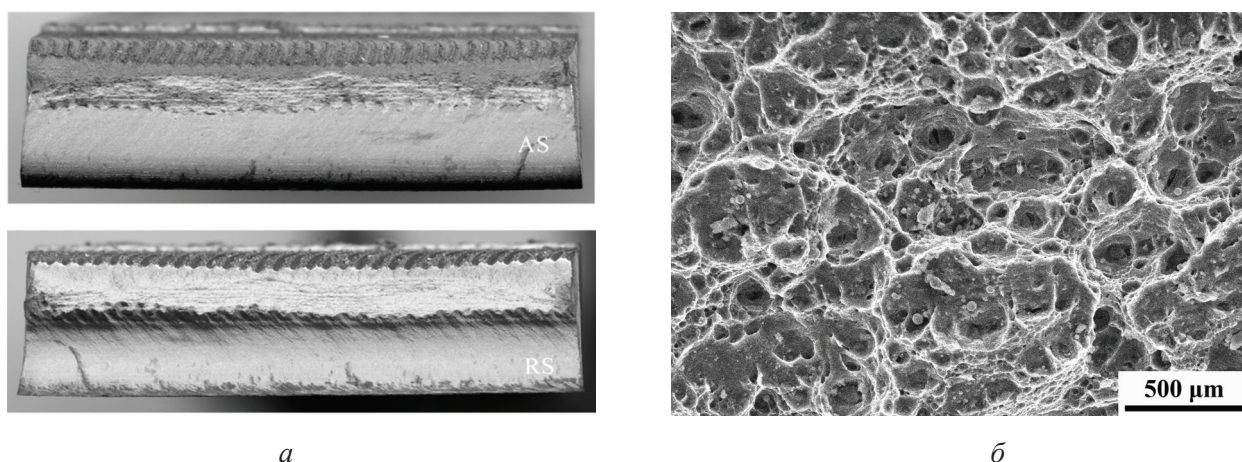


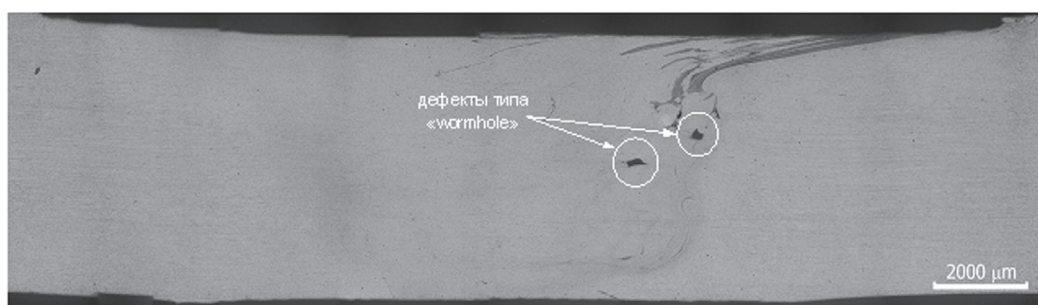
Рис. 2. Поверхность разрушения (AS – набегающая сторона; RS – отступающая сторона) (а) и фрактограмма поверхности излома (б) бездефектного сварного шва

Fig. 2. Defect-free joint's fracture surface: general view (AS – advancing side; RS – retreating side) (a), magnified view (b)

с перемешиванием имеет вид несплошности на наступающей стороне шва и возникает предположительно вследствие чрезмерно высокой скорости движения инструмента относительно заготовки, когда увлекаемый инструментом слой металла не успевает заполнять пространство позади этого инструмента. В пластинах большей толщины этот дефект проявился наиболее масштабно: у образцов толщиной 5,0 мм дефект «wormhole» располагается вблизи поверхности, в то время как у образцов толщиной 8,0 мм дефект распространился на значительную часть сечения образца (рис. 3), глубина залегания дефекта составила 1800 и 2160 мкм соответственно. Протяженность дефекта заметно повлияла на показатель прочности сварного соединения, что следует из результатов испытаний образцов, сваренных по режимам 1 и 6, приведенных в табл. 2. Можно предположить, что при воздействии динамических нагрузок снижение прочности будет более заметным, поскольку в этих условиях дефект будет активно играть роль концентратора напряжений. При снижении скорости подачи инструмента до 300...400 мм/мин дефект не обнаруживался, что отмечено и в работе [14].

Послойный металлографический анализ показал, что дефект расположен в ядре шва справа по ходу движения инструмента на границе с основным материалом. Он представляет собой квазипериодическую пористую структуру с периодом, близким к периоду кольцевой структуры на лицевой стороне шва (рис. 4, а, б). Поры ориентированы вдоль линий пластического течения материала и представляют собой микропустоты неправильной формы. По данным фрактографического анализа поверхности разрушения видно, что прилегающий к дефекту материал разрушался хрупко (рис. 4, в, г).

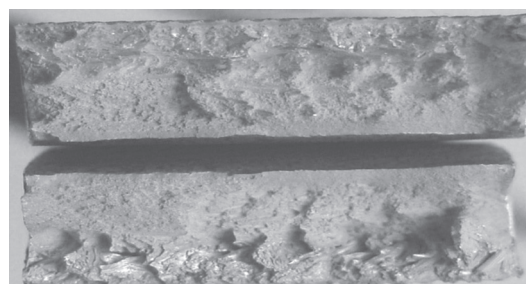
В образцах, сваренных по режимам 4 и 8 в условиях сочетания высокой скорости сварки и недостаточного усилия прижима вращающегося инструмента к свариваемому металлу, обнаружился другой опасный тип дефекта — стыковая линия в прикорневой зоне сварного шва, заметно снижающий эффективное сечение материала в сварном шве, а следовательно, и прочность сварного соединения. Вышеописанный дефект, известный по ряду публикаций [15–20] под названием «Lazy S», считается наиболее опасным из-за своей значительной протяженности по



а



а



б

Рис. 3. Месторасположение дефекта «wormhole» в поперечном сечении образца (а) и поверхности разрушения сварного шва: б – образец толщиной 5,0 мм; в – образец толщиной 8,0 мм

Fig. 3. “Wormhole” defect location (а), welded joint fracture surfaces (б – 5 mm thick sample, в – 8 mm thick sample)

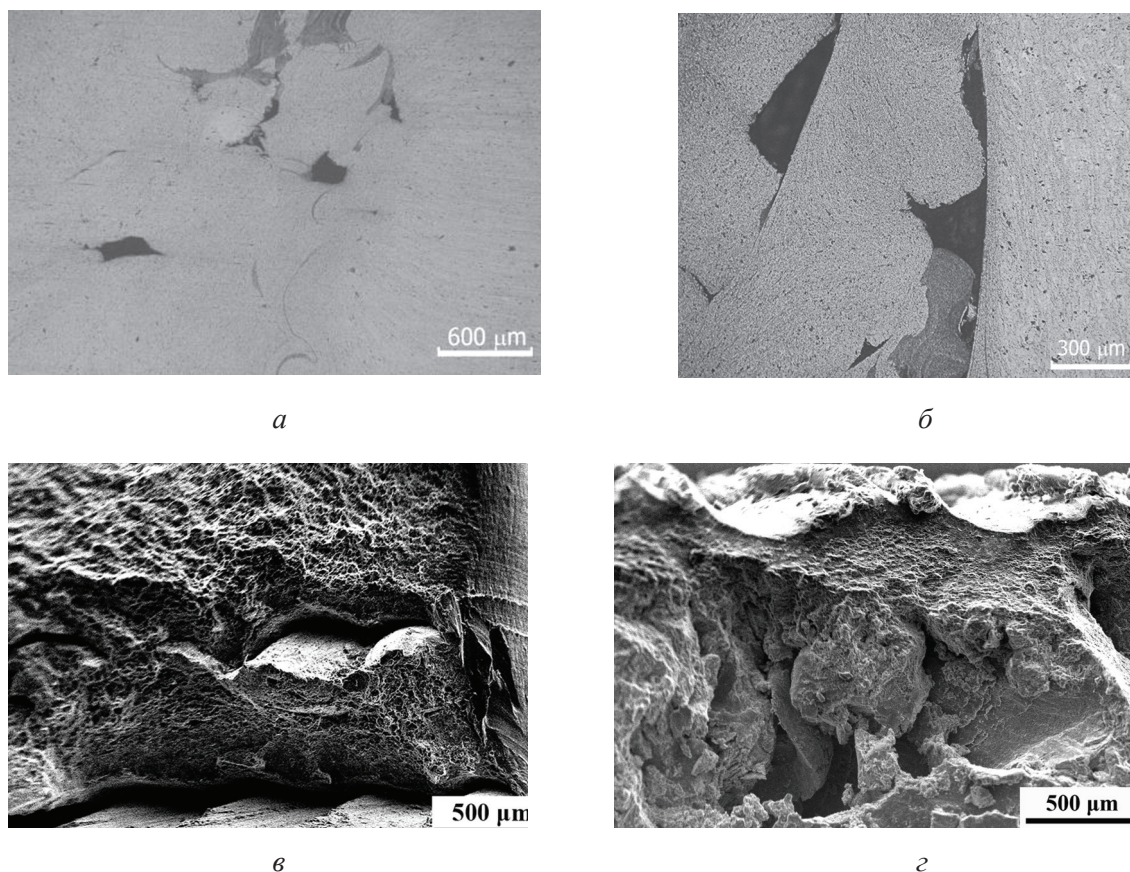


Рис. 4. Микроструктура дефекта типа «wormhole», полученная методом послойного металлографического анализа:

a – на глубине 2,0 мм; *б* – на глубине 2,6 мм и фрактография поверхности разрушения: *в* – образец, толщиной 5,0 мм; *г* – образец толщиной 8,0 мм

Fig. 4. “Wormhole”-type defect microstructure, obtained by layer by layer metallographic analysis:

a – at depth 2.0 mm; *б* – at depth 2.6 mm; fracture surface for samples: *в* – 5 mm thick, *г* – 8 mm thick

длине сварного шва, что обуславливает потерю несущей способности конструкции и быстрое ее разрушение. Стыковая линия хорошо обнаруживается при металлографическом исследовании (рис.5, *a*, *б*). На рис. 5, *в*, *г* можно видеть, что при растяжении образца с таким дефектом расслоение (разрыв) материала происходит по полосам луковичной структуры.

Очевидно, что ширина полос луковичной структуры должна оказывать заметное влияние на траекторию распространения трещины. В работе [16] показано, что полосы луковичной структуры при статическом нагружении поворачиваются в направлении приложенной нагрузки до тех пор, пока направление роста трещины не совпадет с направлением нагружения. Далее трещина продолжает свой путь вдоль направления полос, а отрыв материала проявляется по по-

лосам луковичной структуры практически под прямыми углами к общему направлению распространения трещины.

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты могут быть использованы как при выборе режимов сварки алюминий-магниевого сплава, так и для поиска способов контроля качества сварных соединений, полученных способом сварки трением с перемешиванием, поскольку к настоящему времени не существует общепринятой классификации наиболее часто возникающих дефектов при этом способе сварки.

Выводы

Изучение возможных комбинаций технологических параметров режима сварки трением с перемешиванием алюминий-магниевого

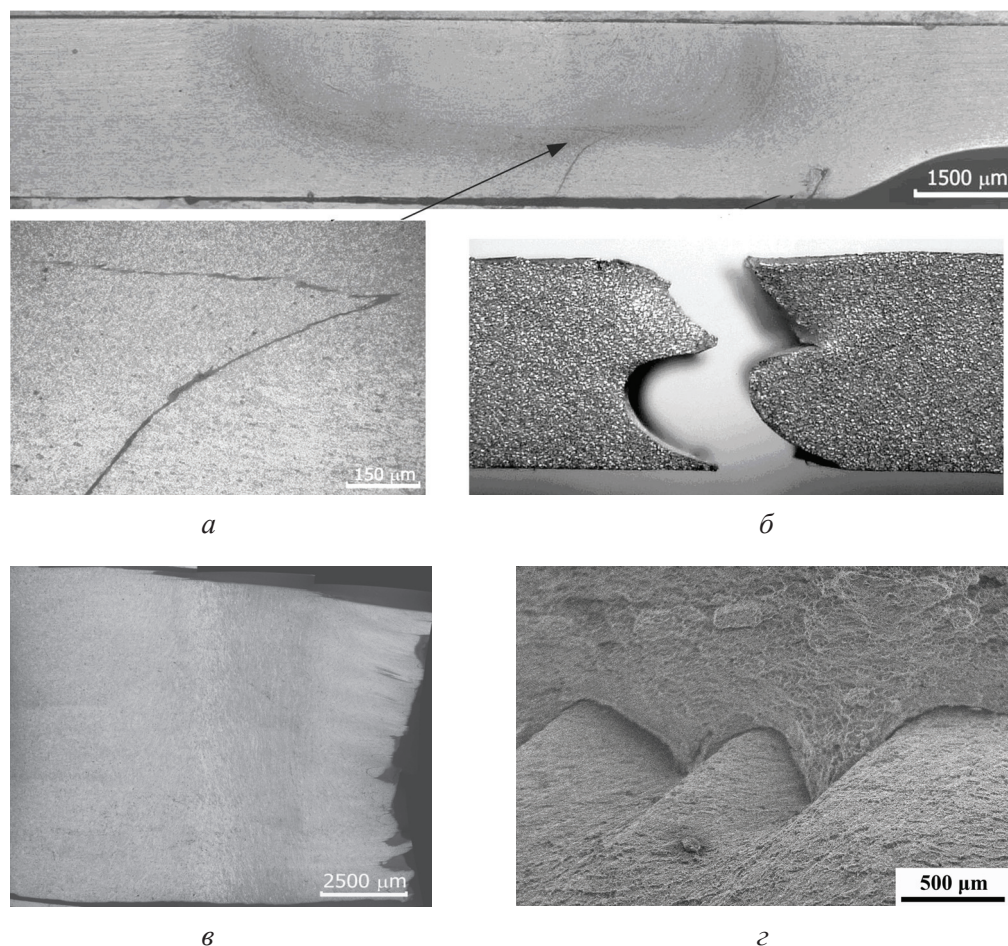


Рис. 5. Линия стыка на поперечном сечении сварного шва (а) и фрагмент разрушенного образца (б); разрушение материала по полосам луковичной структуры: в – оптическая металлография; г – растровая электронная микроскопия

Fig. 5. “Lazy S” defect on the cross sectional view of welded joint (a), fragment of fractured sample (б); material fracture along the “onion rings” bands: в – optical metallography; г – SEM

сплава АМг5М на формирование структурных неоднородностей (дефектов) сварного шва и прочность сварного соединения показало, что при сварке с чрезмерно высокой скоростью движения сварочного инструмента образуются дефекты в виде «пустот» предположительно из-за ухудшения условий перемешивания слоев материала вокруг движущегося инструмента. Сварка с низкой скоростью подачи инструмента при недостаточном усилии его прижима к свариваемой заготовке приводит к появлению другого опасного типа дефекта – стыковой линии. Показано, что присутствие обоих видов дефекта в одинаковой степени влияет на характер разрушения образцов: в отличие от бездефектных образцов он становится двухстадийным. С увеличением площади дефекта в изломе образца возрастает доля хрупкого разрушения и соответственно снижается прочность сварного соединения.

Список литературы

1. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H.K.D.H. Recent advances in friction-stir welding process, weldment structure and properties // Progress in Material Science. – 2008. – Vol. 53, iss. 6. – P. 980–1023. – doi: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.
2. Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy / T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka, S.W. Chung, Y. Takigawa, K. Higashi // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Vol. 457. – P. 344–349. – doi: 10.1016/j.msea.2006.12.079.
3. Kumar N., Kailas S.V. The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 485, iss. 1–2. – P. 367–384. – doi: 10.1016/j.msea.2007.08.0134.
4. Sato Y.S., Urata M., Kokawa H. Parameters controlling microstructure and hardness during friction

stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063 // *Metallurgical and Materials Transactions: A.* – 2002. – Vol. 33, iss. 3. – P. 625–635. – doi: 10.1007/s11661-002-0124-3.

5. Yoon T.-I., Yun J.-G., Kang Ch.-Y. Formation mechanism of typical ring structures and void defects in friction stir lap welded dissimilar aluminum alloys // *Materials and Design.* – 2016. – Vol. 90. – P. 568–578. – doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.014.

6. On material flow in Friction Stir Welded Al alloys / A. Tougne, C. Desrayand, M. Jahazi, E. Feulvach // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2017. – Vol. 239. – P. 284–296. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.030.

7. Stephen Leon J., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding // *American Journal of Mechanical Engineering and Automation.* – 2014. – Vol. 1, N 1. – P. 6–9.

8. Сварка трением с перемешиванием термически упрочняемого сплава В95 системы Al-Zn-Mg-Cu / В.А. Фролов, В.Ю. Конкевич, П.Ю. Предко, В.В. Белоцерковец // *Сварочное производство.* – 2013. – № 3. – С. 21–26.

9. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности / В.И. Лукин, О.Г. Оспенникова, Е.Н. Иода, М.Д. Пантелеев // *Сварка и диагностика.* – 2013. – № 2. – С. 47–51.

10. Cerri E., Leo P. Influence of high temperature thermal treatment on grain stability and mechanical properties of medium strength aluminium alloy friction stir welds // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2013. – Vol. 213, iss. 1. – P. 75–83. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.09.001.

11. 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. – doi: 10.1016/j.msea.2012.09.041.

12. Особенности формирования сварного соединения при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава В-1469 / В.И. Лукин, Е.Н. Иода, А.В. Базескин, И.П. Жегина, Л.В. Котельникова, В.В. Овчинников // *Сварочное производство.* – 2012. – № 6. – С. 30–36.

13. Сизова О.В., Заикина А.А., Рубцов В.Е. Влияние технологических режимов сварки трением с перемешиванием на механические свойства и характер разрушения алюминиево-магниевого сплава // *Вопросы материаловедения.* – 2016. – № 4 (88). – С. 101–108. – doi: 10.22349/1994-6716-2016-88-4-101-108.

14. 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. 396–403. – doi: 10.1016/j.msea.2015.10.083.

15. Разрушение стыковых соединений алюминиево-магниевого сплава, выполненных сваркой трением с перемешиванием / О.В. Сизова, А.В. Колубаев, Е.А. Колубаев, А.А. Заикина, В.Е. Рубцов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2014. – № 3 (64). – С. 14–21.

16. 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, iss. 1–2. – P. 64–69. – doi: 10.1016/j.msea.2006.06.056.

17. The effect of interface defect on mechanical properties and its formation mechanism in friction stir lap welded joints of aluminum alloys / H. Liu, Y. Hu, Ya. Peng, C. Dou, Z. Wang // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2016. – Vol. 238. – P. 244–254. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.06.029.

18. Influence of processing of thermal field in Mg-Nd-Zn-Zr alloy during friction stir processing / J. Han, J. Chen, L. Peng, F. Zheng, W. Rong, Y. Wu, W. Ding // *Materials and Design.* – 2016. – Vol. 94. – P. 186–194. – doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.044.

19. Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding (FSW) tools used on an aluminum alloy // *Wear.* – 2014. – Vol. 318, iss. 1–2. – P. 130–134. – doi: 10.1016/j.wear.2014.06.014.

20. Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to T2 pure Cu adopting tooth-shaped joint configuration: Microstructure and mechanical properties / W. Zhang, Y. Shen, Y. Yan, R. Guo // *Materials Science and Engineering: A.* – 2017. – Vol. 690. – P. 355–364. – doi: 10.1016/j.msea.2017.02.091.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2017 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Effect of Main Parameters of the Friction Stir Welding on Structure Imperfections of Welded Joint

Olga Sizova ^{a,*}, Alexander Kolubaev ^b, Evgeny Kolubaev ^c, Anastasia Zaikina ^d, Valery Rubtsov ^e

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <http://orcid.org/0000-0001-9177-6602>, ovs@ispms.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-2839-5249>, kav@ispms.tsc.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.tsc.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0001-8507-3417>, aaz@ispms.tsc.ru,

^e <http://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 September 2017

Revised: 11 October 2017

Accepted: 25 October 2017

Available online: 15 December 2017

Keywords:

Friction stir welding
 Aluminum alloy
 Structural defects
 Tensile strength
 Fracture

Funding:

The work is carried out in the framework of the Fundamental Research Program of the State Academies of Sciences for 2013–2020.

ABSTRACT

Purpose: to identify the fracturing behavior of the defected aluminum-magnesium alloy friction stir welded joints. The paper presents the results of analysis of varieties of structural defects in a welded joint and its effect on the strength of welded joints under static tension. The brief review of the main reasons for the appearance of discontinuities in the structure of the welded joint is given; the influence of the main parameters of the temperature regime in the welding area on obtaining a high-quality weld is evaluated. In accordance with the fractographic analysis of the fracture surface of samples with welded joint and layer by layer metallographic analysis of the material in the defect zone, the types of defects specific for friction stir welding are described and the nature of its origin is discussed. The obtained results indicate the defining role of the nature of the plastic flow of material in the zone of the moving tool in the formation of the structure and properties of the welded joint and can be taken into account when choosing friction stir welding modes and welded joints quality control. **Methods:** experimental studies were carried out on a laboratory machine for friction stir welding, manufactured by ISPM SB RAS. Static tensile tests were performed on tension testing machine UTS110M-100. Structural studies were performed by optical and scanning microscopy using the MiniSEM electronic scanning microscope. **Results and Discussion:** the effect of the welding process main parameters on the quality of welded joints is shown on the example of Al 5083 alloy plates of different thicknesses. It is shown that the welding regime determines the type and size of the defects formed, the mechanical strength and the nature of the welded joints fracture mode. According to the comparative analysis of the fracture surface of samples after static tensile tests, it is found that in the defect zone the fracture mode is changed from the viscous nature to the brittle one. The forming features of defected structure of the welded joint are revealed by varying the heat input value. It is shown that not the thickness of the welded plates affects the type of defect formed, but the amount of heat input into the welding zone. Based on the results of fractographic analysis of the welded joints fracture surface and layer by layer metallographic analysis of the material in the defect area, types of defects specific for friction stir welding are described and the nature of its origin is discussed.

For citation: Sizova O.V., Kolubaev A.V., Kolubaev E.A., Zaikina A.A., Rubtsov V.E. Effect of main parameters of the friction stir welding on structure imperfections of welded joint. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017, no. 4 (77), pp. 19–29. doi: 10.17212/1994-6309-2017-4-19-29. (In Russian).

References

1. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H.K.D.H. Recent advances in friction-stir welding process, weldment structure and properties. *Progress in Material Science*, 2008, vol. 53, iss. 6, pp. 980–1023. doi: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.

* Corresponding author

Sizova Olga V., D.Sc. (Engineering), Professor
 Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch
 of Russian Academy of Sciences 2/4, pr. Akademicheskii
 Tomsk, 634055, Russian Federation
 Tel.: 8 (382) 228-69-70, e-mail: ovs@ispms.ru

2. Hirata T., Oguri T., Hagino H., Tanaka T., Chung S.W., Takigawa Y., Higashi K. Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 456, pp. 344–349. doi: 10.1016/j.msea.2006.12.079.
3. Kumar N., Katlas S.V. The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 485, iss. 1–2, pp. 367–374. doi: 10.1016/j.msea.2007.08.013.
4. Sato Y.S., Urata M., Kokawa H. Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2002, vol. 33, iss. 3, pp. 625–635. doi: 10.1007/s11661-002-0124-3.
5. Yoon T.-I., Yun J.-G., Kang Ch.-Y. Formation mechanism of typical ring structures and void defects in friction stir lap welded dissimilar aluminum alloys. *Materials & Design*, 2016, vol. 90, pp. 568–578. doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.014.
6. Tougne A., Desrayand C., Jahazi M., Feulvach E. On material flow in Friction Stir Welded Al alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 239, pp. 284–296. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.030.
7. Stephen Leon J., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding. *American Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 6–9.
8. Frolov V.A., Konkevich V.Yu., Predko P.Yu., Belotserkovets V.V. Svarka treniem s peremeshivaniem termicheski uprochnyaemogo splava V95 sistemy Al-Zn-Mg-Cu [Friction stir welding of the heat-treatable alloy B95 of the Al-Zn-Mg-Cu system]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding International*, 2013, no. 3, pp. 21–26.
9. Lukin V.I., Ospennikova O.G., Ioda E.N., Panteleev M.D. Svarka alyuminievykh splavov v aviakosmicheskoi promyshlennosti [Welding of aluminum alloys in the aerospace industry]. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2013, no. 2, pp. 47–51.
10. Cerri E., Leo P. Influence of high temperature thermal treatment on grain stability and mechanical properties of medium strength aluminium alloy friction stir welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, iss. 1, pp. 75–83. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.09.001.
11. Hao H.L., Ni D.R., Huang H., Wang D., Xiao B.L., Nie Z.R., Ma Z.Y. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Mg-Er alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 559, pp. 889–896. doi: 10.1016/j.msea.2012.09.041.
12. Lukin V.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V., Zhegina I.P., Kotel'nikova L.V., Ovchinnikov V.V. Osobennosti formirovaniya svarnogo soedineniya pri svarke treniem s peremeshivaniem alyuminievogo splava V-1469 [Features of welded joint formation at friction stir welding of aluminium alloy B-1469]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding International*, 2012, no. 6, pp. 30–36.
13. Sizova O.V., Zaikina A.A., Rubtsov V.E. Vliyanie tekhnologicheskikh rezhimov svarki treniem s peremeshivaniem na mekhanicheskie svoystva i kharakter razrusheniya alyuminievo-magnievogo splava [Effect of friction stir welding process parameters on mechanical and fracture behavior of aluminum-magnesium alloy]. *Voprosy materialovedeniya = Inorganic Materials: Applied Research*, 2016, no. 4 (88), pp. 101–108. doi: 10.22349/1994-6716-2016-88-4-101-108. (In Russian).
14. Chen Y., Ding H., Cai Z., Zhao J., Li J. Effect of initial base metal temper on microstructure and mechanical properties of friction stir processed Al-7B04 alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 650, pp. 396–403. doi: 10.1016/j.msea.2015.10.083.
15. Sizova O.V., Kolubaev A.V., Kolubaev E.A., Zaikina A.A., Rubtsov V.E. Razrushenie stykovykh soedinenii alyuminievo-magnievogo splava, vypolnennykh svarkoi treniem s peremeshivaniem [Fracture of friction stir welded butt joints structure of aluminum-magnesium alloy]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 14–21.
16. Chen H.B., Yan K., Chen S.B., Jiang C.Y., Zhao Y. The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 433, iss. 1–2, pp. 64–69. doi: 10.1016/j.msea.2006.06.056.
17. Liu H., Hu Y., Peng Ya., Dou C., Wang Z. The effect of interface defect on mechanical properties and its formation mechanism in friction stir lap welded joints of aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 238, pp. 244–254. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.06.029.
18. Han J., Chen J., Peng L., Zheng F., Rong W., Wu Y., Ding W. Influence of processing of thermal field in Mg-Nd-Zn-Zr alloy during friction stir processing. *Materials & Design*, 2016, vol. 94, pp. 186–194. doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.044.



19. Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding (FSW) tools used on an aluminum alloy. *Wear*, 2014, vol. 318, iss. 1–2, pp. 130–134. doi: 10.1016/j.wear.2014.06.014.

20. Zhang W., Shen Y., Yan Y., Guo R. Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to T2 pure Cu adopting tooth-shaped joint configuration: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 690, pp. 355–364. doi: 10.1016/j.msea.2017.02.091.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2017 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).