

Влияние геометрии инструмента на формирование сварного соединения при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМг5

© 2024

*Зыбин Игорь Николаевич**¹, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии соединения и обработки материалов»

Бузырева Дарья Алексеевна, магистрант

Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, Калуга (Россия)

*E-mail: igor.zybin@bmstu.ru,
igor.zybin@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5738-4231>

Поступила в редакцию 18.10.2023

Принята к публикации 08.02.2024

Аннотация: Одним из важных параметров, влияющих на формирование сварного шва при сварке трением с перемешиванием, является геометрия инструмента, которая влияет на процессы тепловыделения и перемешивания металлов в зоне соединения. От протекания этих процессов зависит получение качественного и прочного сварного соединения без дефектов сплошности. В связи с этим представляется актуальным анализ влияния геометрии инструмента на параметры режима сварки, при которых сварное соединение формируется без дефектов сплошности, а также на прочность сварного соединения при статическом растяжении. В работе рассмотрено влияние цилиндрической и конической форм пина инструмента, а также конической формы пина с резьбой на наружной поверхности и спиральной канавкой на торцевой поверхности заплечика инструмента на параметры режима сварки, при которых сварное соединение формируется без дефектов сплошности. Показано, что изменение формы рабочей поверхности пина с цилиндрической на коническую не оказало влияния на диапазон параметров режима сварки, при которых сварное соединение формируется без дефектов сплошности. Установлено, что наличие резьбы на наружной поверхности пина и канавки на торцевой поверхности заплечика позволяет получать сварные соединения без дефектов сплошности в более широком диапазоне параметров режима сварки по сравнению с более простой геометрией инструмента. Рассмотрена макроструктура сварных соединений, полученных при использовании различных геометрических форм инструмента. Установлено, что рассмотренная геометрия инструмента практически не влияет на максимальные значения прочности сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, и достигает 95 % от прочности основного металла.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; АМг5; геометрия инструмента; прочность сварного соединения без дефектов сплошности.

Для цитирования: Зыбин И.Н., Бузырева Д.А. Влияние геометрии инструмента на формирование сварного соединения при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМг5 // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 2. С. 43–52. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-4.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из современных прогрессивных способов соединения металлов является сварка трением с перемешиванием (СТП). Сварка выполняется без расплавления соединяемых материалов, что означает отсутствие в соединении дефектов, характерных для дуговых способов сварки. Обеспечивается высокая прочность сварного соединения – до 90–95 % от прочности основного металла [1; 2], а полученные сварные соединения характеризуются минимальными деформациями.

Известно, что геометрия инструмента оказывает существенное влияние на процессы пластического деформирования и перемешивания металла, формирование структуры, процессы тепловыделения в зоне сварки и механические свойства сварного соединения [3–5]. Она также играет важную роль в формировании качественного сварного соединения без дефектов.

В настоящее время геометрия инструмента характеризуется широким разнообразием [6–8]. Инструмент состоит из двух основных элементов: пина и заплечика, оба участвуют в процессе перемешивания металла [3] и оказывают сильное влияние на течение металла в процессе сварки [9].

Пин инструмента в основном отвечает за достаточно сложную траекторию течения пластифицированного материала при сварке [10]. Геометрическая форма пина инструмента оказывает существенное влияние на процессы выделения теплоты в зоне соединения металлов, а количество теплоты, в свою очередь, влияет на структуру шва, ширину зоны термического влияния и качество сварного соединения. Кроме того, форма пина инструмента влияет на прочность сварного шва [11]. Пин в большинстве случаев имеет цилиндрическую или коническую поверхность. При использовании пина с конической поверхностью угол конуса, как правило, не превышает 20°, что связано со снижением прочности на растяжение и относительного удлинения при больших углах. На конической поверхности пина могут быть канавки, резьбы и другие элементы, обеспечивающие управление течением пластифицированного материала. Применение конического пина с резьбой обеспечивает лучшее перемешивание металла [12; 13]. Перемешивание металла несколько раз перед его осаждением способствует удалению пор и разрушению оксидов.

Установлено, что наличие резьбы на пине вызывает небольшое повышение температуры вблизи пина и усиливает

течение металла и его перемешивание [14]. Диаметр пина, как правило, соизмерим с толщиной соединяемых образцов, а его длина меньше толщины металла на десятые доли миллиметра. Конец пина обычно выполняют плоским или сферической формы. Первый легче изготовить, тогда как второй обеспечивает меньший износ инструмента.

Форма заплечика инструмента может быть плоской, вогнутой и выпуклой. Торцевая поверхность заплечика может быть гладкой или с нанесенными насечками, канавками и другими элементами. Наличие различных выступов на поверхности заплечика инструмента, например спиральной канавки, способствует лучшему перемешиванию металла. Заплечик инструмента наряду с пином обеспечивает необходимое тепловыделение в зоне его трения со свариваемыми деталями. Кроме того, он обеспечивает уплотнение металла и его проковку в процессе сварки.

При выборе размеров инструмента важен выбор отношения диаметра заплечика к диаметру пина инструмента. Это отношение играет важную роль в выделении тепла, а также перемешивании металла при сварке. Согласно работам [15; 16] это отношение рекомендуется выбирать около 3:1. В этом случае обеспечивается лучшее измельчение зерна и высокая прочность соединения.

В работе [17] на примере сварных соединений из алюминиевого сплава АМг5 показано, что направление проката влияет на прочностные характеристики получаемого сварного соединения. Необходимо это учитывать при получении сварных соединений СТП.

Одним из важных параметров сварки является производительность процесса, повысить которую позволяет увеличение скорости сварки. Однако не всегда возможно увеличить скорость сварки и при этом обеспечить сварное соединение без дефектов сплошности в зоне соединения. Поэтому необходимо знать, позволяет ли усложнение геометрии инструмента расширить диапазон параметров режима сварки, при котором обеспечивается получение сварного соединения без дефектов сплошности, и можно ли при этом увеличить скорость сварки. Отметим, что при СТП скорость сварки и частота вращения инструмента

взаимосвязаны. При увеличении скорости сварки, как правило, следует корректировать и частоту вращения инструмента. Эти параметры напрямую влияют на процессы тепловыделения в зоне соединения металлов. Недостаточное или чрезмерное выделение тепла в зоне сварки может приводить к появлению дефектов.

В литературе имеется значительное количество работ, посвященных изучению влияния геометрии инструмента на получение сварного соединения из алюминиевого сплава АМг5. В большинстве случаев для этого материала рассматриваются незначительные изменения параметров процесса (как правило, частоты вращения инструмента и скорости сварки). Глубина внедрения инструмента в образец часто принимается постоянной величиной, хотя она оказывает существенное влияние на процесс формирования сварного соединения. Поэтому вызывает интерес исследование влияния различных форм геометрии инструмента на параметры режима сварки при разной глубине внедрения инструмента в образец.

Цель работы – исследовать влияние геометрии инструмента на параметры режима сварки, обеспечивающие отсутствие дефектов сплошности в зоне соединения металлов, и на прочность сварного соединения при статическом растяжении.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований по СТП использовались листы из алюминиевого сплава АМг5 толщиной 5 мм, сварка выполнялась встык. Геометрические параметры инструмента: диаметр пина у основания 6,5 мм, диаметр заплечика 18,5 мм, длина пина 4,75 мм. Торцевая поверхность пина закруглена. Угол конуса поверхности пина составлял 20°. Инструмент был изготовлен из легированной стали 4Х5МФ1С (ГОСТ 5950-2000) и закален при температуре 1020 °С, а затем подвергнут отпуску при температуре 500 °С. Твердость рабочей поверхности инструмента составила 53...57 HRC.

При проведении исследования применялись три вида инструмента (рис. 1).

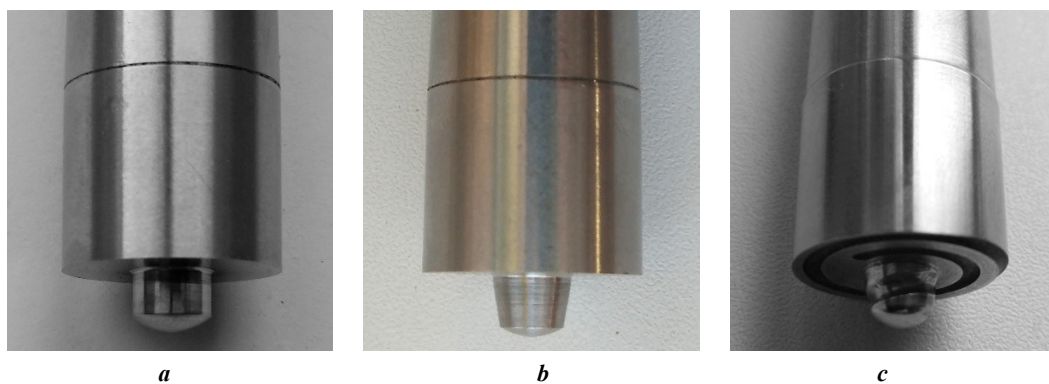


Рис. 1. Геометрические формы инструмента для СТП:

a – инструмент с цилиндрической формой пина; *b* – инструмент с конической формой пина; *c* – инструмент с конической формой пина с резьбой и канавкой на торцевой поверхности заплечика

Fig. 1. Geometry of a tool for friction stir welding:

a – tool with a cylindrical shape of the pin; *b* – tool with a conical shape of the pin; *c* – tool with a conical shape of the pin with a thread and a groove on the end surface of the tool shoulder

Сварка выполнялась на вертикально-фрезерном станке FSS-400R (Беларусь), у которого шпиндель имеет возможность разворота относительно вертикальной оси на угол $\pm 45^\circ$. Угол наклона инструмента к вертикали был постоянным и составлял 2° . Частота вращения и скорость сварки менялись дискретно. Сварка образцов выполнялась на подложке в виде листа из стали 20 толщиной 10 мм. Направление проката для всех образцов было одинаковым и выбрано перпендикулярным сварному шву. Кромки соединяемых поверхностей перед сваркой фрезеровались и обезжировались ацетоном. Параметры режимов сварки (таблица 1) рассматривались в широком диапазоне и под-

бирались с учетом возможностей применяемого оборудования при разных значениях внедрения заплечика инструмента в образец. Глубина внедрения заплечика в образец находилась в диапазоне 0,05...0,4 мм.

Испытания на статическое растяжение сварных образцов проводились на разрывной испытательной универсальной машине ИР 5092-100 (Россия). Размеры образцов представлены на рис. 2. Для проведения испытаний в одном и том же режиме было подготовлено не менее 3 образцов. На рис. 3 показаны примеры образцов для проведения испытаний на статическое растяжение.

Таблица 1. Значения параметров режимов сварки алюминиевого сплава АМг5
Table 1. Values of welding mode parameters for AA5083 aluminum alloy

Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Угол наклона инструмента к вертикали, °	Глубина внедрения заплечика инструмента в образец, мм
450–1400	31,5–120,0	2	0,05–0,40

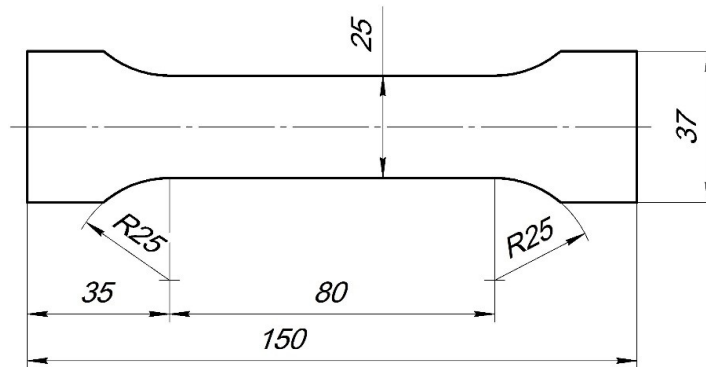


Рис. 2. Геометрические размеры образца для испытаний на статическое растяжение
Fig. 2. Geometrical dimensions of the specimen for static tensile tests



Рис. 3. Образцы для проведения испытаний на статическое растяжение
Fig. 3. Specimens for static tensile tests

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После проведения экспериментальных исследований в выбранном диапазоне параметров режима сварки был рассмотрен внешний вид сварных соединений и выполнены макрошлифы поперечных сечений сваренных образцов для выявления возможных дефектов сплошности.

Анализ макрошлифов показал, что при сварке образцов инструментами с цилиндрической и конической поверхностями пина (рис. 1 а, 1 б) сварное соединение без дефектов сплошности было получено при следующих режимах сварки: частота вращения инструмента 450–560 об/мин, скорость сварки 31,5–50 мм/мин, глубина внедрения заплечика инструмента в образец 0,05–0,4 мм. Отметим, что при частоте вращения инструмента 710 об/мин, скорости сварки 50 мм/мин и глубине внедрения заплечика инструмента в деталь от 0,1...0,15 до 0,4 мм также были получены сварные соединения без дефектов в зоне соединения. При глубине внедрения заплечика в деталь до 0,1...0,15 мм в корне сварного шва, как правило, наблюдался непровар. При глубине более 0,4 мм на периферии сварного соединения наблюдался значительный грат вследствие выдавливания большого объема металла в эту зону. Примеры внешнего вида и макрошлифов сварных соединений, полученных инструментами с цилиндрической и конической

поверхностями пина на разных режимах сварки, показаны на рис. 4, 5.

Анализ макрошлифов, полученных при сварке образцов инструментом с конической поверхностью пина (рис. 1 с), который имеет резьбу на наружной поверхности и спиральную канавку на торцевой поверхности заплечика, показал, что сварное соединение без дефектов сплошности было получено при следующих режимах сварки: частота вращения инструмента 450–1120 об/мин, скорость сварки 31,5–125 мм/мин. Примеры внешнего вида и макрошлифов сварных соединений, полученных на разных режимах сварки, показаны на рис. 6, 7.

Значения диапазонов параметров режима (частоты вращения инструмента и скорости сварки) для всех рассмотренных инструментов представлены на рис. 8.

Вне зон 1 и 2, указанных на рис. 8, сварное соединение без дефектов сплошности получить не удалось. Виды основных дефектов сварных соединений, полученных при СТП, представлены на рис. 9.

При использовании инструментов с гладкой поверхностью пина (рис. 1 а, 1 б) на макрошлифах поперечных сечений сварных соединений луковичная структура отсутствовала (рис. 4 б, 5 б). При применении инструмента с резьбой на наружной поверхности пина (рис. 1 с) на макрошлифах была видна луковичная структура (рис. 6 б, 7 б).

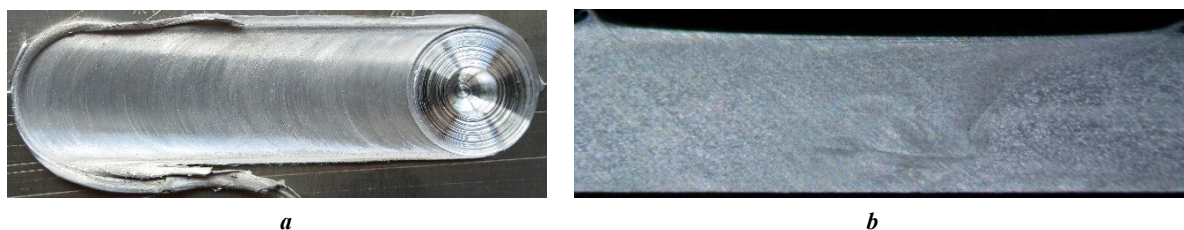


Рис. 4. Внешний вид (а) и макрошлиф (б) поперечного сечения сварного соединения, полученного инструментом с цилиндрической формой пина (рис. 1 а).

Параметры режимов сварки: частота вращения инструмента 560 об/мин, скорость сварки 50 мм/мин, глубина внедрения заплечика инструмента в образец 0,07 мм

Fig. 4. Appearance (a) and macrosection (b) of the cross section of the welded joint produced by a tool with a cylindrical pin shape (Fig. 1 a).

Welding mode parameters: tool rotation frequency is 560 rpm, welding speed is 50 mm/min, and the depth of tool shoulder penetration into the sample is 0.07 mm

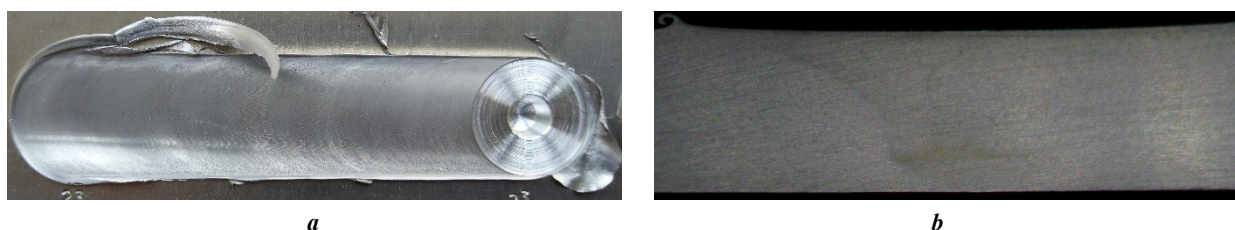


Рис. 5. Внешний вид (а) и макрошлиф (б) поперечного сечения сварного соединения, полученного инструментом с конической формой пина (рис. 1 б).

Параметры режимов сварки: частота вращения инструмента 450 об/мин, скорость сварки 31,5 мм/мин, глубина внедрения заплечика инструмента в образец 0,05 мм

Fig. 5. Appearance (a) and macrosection (b) of the cross section of the welded joint produced by a tool with a conical pin shape (Fig. 1 b).

Welding mode parameters: tool rotation frequency is 450 rpm, welding speed is 31.5 mm/min, and the depth of tool shoulder penetration into the sample is 0.05 mm

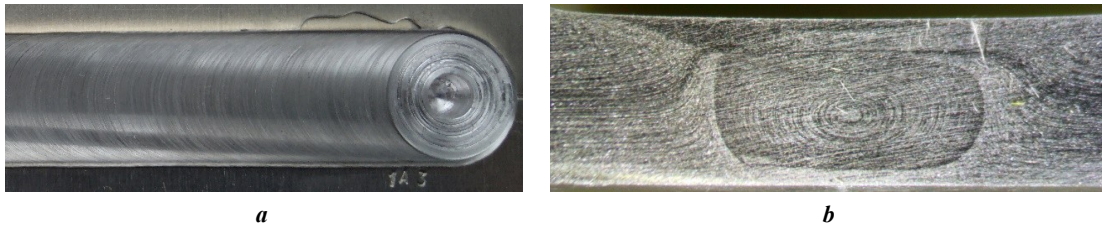


Рис. 6. Внешний вид (а) и макрошлиф (b) поперечного сечения сварного соединения, полученного инструментом с конической формой пина с резьбой и спиральной канавкой на торцевой поверхности заплечика инструмента (рис. 1 с).
 Параметры режимов сварки: частота вращения инструмента 710 об/мин, скорость сварки 50 мм/мин, глубина внедрения заплечика инструмента в образец 0,06 мм

Fig. 6. Appearance (a) and macrosection (b) of the cross section of the welded joint produced by a tool with a conical pin shape with a thread and a spiral groove on the end surface of the tool shoulder (Fig. 1 c).
 Welding mode parameters: tool rotation frequency is 710 rpm, welding speed is 50 mm/min, and the depth of tool shoulder penetration into the sample is 0.06 mm

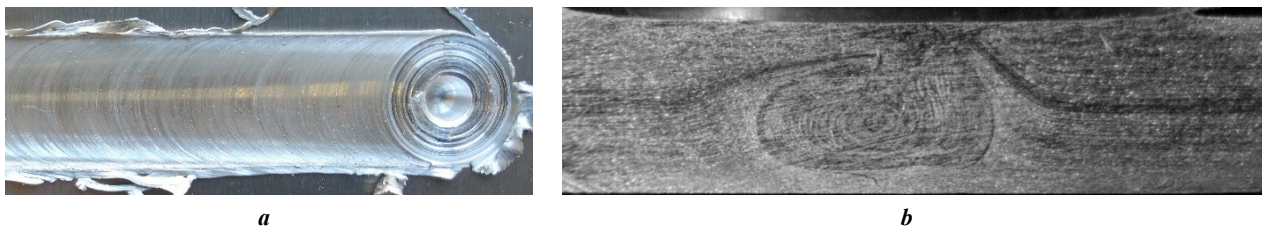


Рис. 7. Внешний вид (а) и макрошлиф (b) поперечного сечения сварного соединения, полученного инструментом с конической формой пина с резьбой и спиральной канавкой на торцевой поверхности заплечика инструмента (рис. 1 с).
 Параметры режимов сварки: частота вращения инструмента 1120 об/мин, скорость сварки 125 мм/мин, глубина внедрения заплечика инструмента в образец 0,07 мм

Fig. 7. Appearance (a) and macrosection (b) of the cross section of the welded joint produced by a tool with a conical pin shape with a thread and a spiral groove on the end surface of the tool shoulder (Fig. 1 c).
 Welding mode parameters: tool rotation frequency is 1120 rpm, welding speed is 125 mm/min, and the depth of tool shoulder penetration into the sample is 0.07 mm

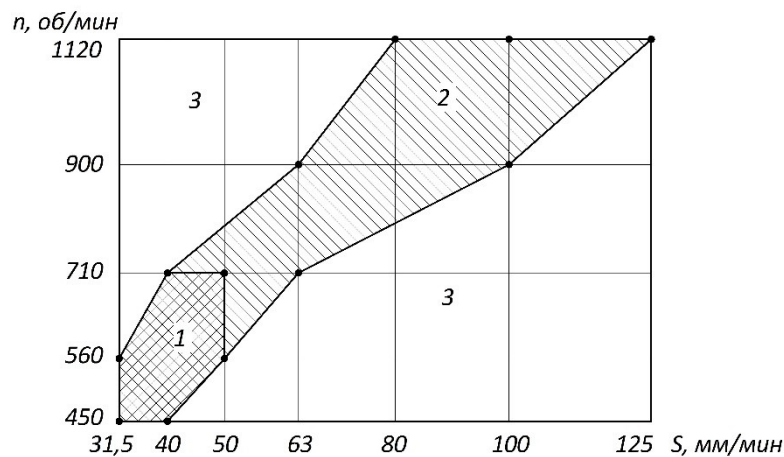


Рис. 8. Частота вращения (n) и скорость сварки (s) при получении стыковых соединений СТП:
 1 – зона отсутствия дефектов сплошности (цилиндрическая и коническая форма пина инструмента без резьбы);
 2 – зона отсутствия дефектов сплошности (коническая форма пина с резьбой и спиральной канавкой на торцевой поверхности заплечика инструмента), включающая в себя зону 1;
 3 – зона наличия дефектов сплошности (для всех типов инструментов)

Fig. 8. Rotation frequency (n) and welding speed (s) when producing butt joints by friction stir welding:
 1 – zone without continuity defects (cylindrical and conical shapes of the tool pin without a thread);
 2 – zone without continuity defects (conical shape of the pin with a thread and a spiral groove on the end surface of the tool shoulder), including zone 1;
 3 – zone with continuity defects (for all tool types)

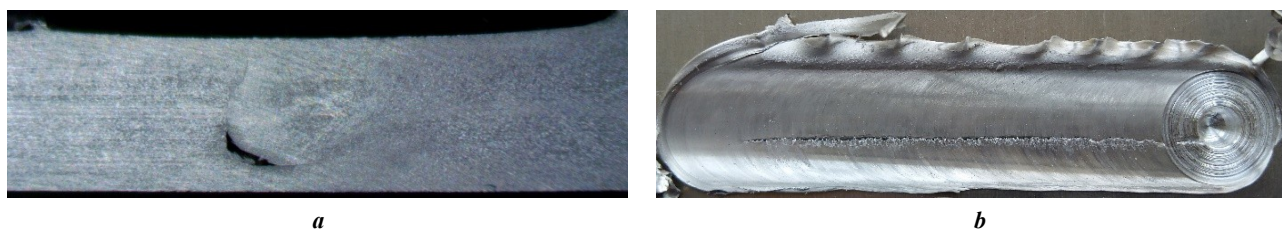


Рис. 9. Основные виды дефектов сварных соединений, полученных при СТП:
a – непровар в корне сварного шва; **b** – неславление
Fig. 9. Main types of defects of welded joints produced by friction stir welding:
a – faulty root fusion; **b** – lack of fusion

Таблица 2. Параметры режимов сварки и пределы прочности сварных соединений, при которых обеспечивалось получение сварного соединения без дефектов сплошности
Table 2. Welding mode parameters and ultimate stress limits of welded joints, which ensured the production of a welded joint without continuity defects

Параметры режимов сварки			Диапазон предела прочности, (среднее значение), МПа
Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Глубина внедрения заплечика инструмента в образец, мм	
Инструмент с цилиндрической формой пина (рис. 1 а)			
450–560	31,5–50,0	0,05–0,40	304,3–318,8 (310,4)
710	50,0	(>0,10...0,15)–0,40	
Инструмент с конической формой пина (рис. 1 б)			
450–560	31,5–50,0	0,05–0,40	308,5–313,6 (311,5)
710	50,0	(>0,10...0,15)–0,40	
Инструмент с конической формой пина с резьбой и канавкой на торцевой поверхности заплечика (рис. 1 с)			
450–1120	31,5–125,0	0,05–0,40	306,0–313,4 (309,7)

При проведении испытаний на статическое растяжение сварных образцов без дефектов сплошности, полученных с применением разной формы инструмента, были получены значения предела прочности, представленные в таблице 2. В таблице представлены значения предела прочности с указанием диапазонов режимов сварки.

Прочность основного металла на статическое растяжение согласно экспериментальным данным составила 327,1 МПа (среднее значение). Направление проката в этих образцах совпадало с направлением растягивающего усилия при испытаниях на статическое растяжение.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов показал, что в случае всех рассмотренных форм рабочей поверхности инструмента были получены сварные соединения без дефектов сплошности.

Информация об изменении диапазонов параметров режима сварки (частоты вращения инструмента и скорости сварки) для получения бездефектных сварных соединений с указанием значений этих па-

раметров при применении инструмента без резьбы на пине, а также с резьбой на пине и спиральной канавкой на торце заплечика инструмента в работах других авторов отсутствует.

Установлено, что для цилиндрической и конической форм пина совпадают диапазоны частоты вращения и скорости сварки, при которых обеспечивается получение сварного соединения без дефектов сплошности. Влияния замены цилиндрической формы пина на коническую на параметры режимов сварки для получения бездефектных сварных соединений в настоящей работе выявлено не было.

Резьба на наружной поверхности пина и спиральная канавка на торцевой поверхности заплечика инструмента (рис. 1 с) значительно улучшают условия формирования сварного соединения, что позволило получить сварные соединения без дефектов сплошности в более широком диапазоне параметров режима сварки (частоты вращения и скорости сварки) по сравнению с инструментом с более простой геометрией (рис. 1 а, 1 б). Благодаря увеличению скорости сварки можно увеличить производительность процесса.

Непровар в корне шва (рис. 9 а), как правило, характерен для небольшого числа оборотов и большой скорости сварки, что приводит к недостаточному перемешиванию и пластификации металла и подводу тепла в зону сварки. Несплавление (рис. 9 б) часто наблюдалось при большом числе оборотов и различной скорости сварки, что, вероятно, обусловлено чрезмерным тепловыделением в зоне соединения металлов.

Наличие луковичной структуры в сварных соединениях, полученных инструментом с пином, имеющим резьбу на наружной поверхности, и со спиральной канавкой на торцевой поверхности заплечика объясняется тем, что слои металла выдавливаются по резьбовой канавке пина при каждом обороте инструмента. Форма луковичных колец, обусловленная различным распределением размеров зерен по спирали [18], характерна при применении инструмента с пином, имеющим резьбу на поверхности, для получения сварных соединений из алюминиевых сплавов, в том числе из сплава АМг5 [19]. При применении инструмента с гладкой наружной поверхностью пина металл перемешивается в зоне сварки постоянно и монотонно, а не прерывисто. Наличие луковичной структуры характеризует лучшие условия формирования сварного шва, что позволяет использовать более высокие скорости сварки для получения сварных соединений без дефектов сплошности.

Резьба на поверхности пина способствует большему измельчению зерна в зоне сварного соединения. Согласно уравнению Холла – Петча уменьшение размера зерна приводит к повышению прочности на разрыв [20]. Проведенные в работе экспериментальные исследования показали, что максимальные значения предела прочности, полученные для всех рассмотренных форм геометрии инструмента, близки между собой и составляют около 95 % от прочности основного металла, т. е. геометрия инструмента не повлияла на максимальные значения предела прочности.

Установлено, что при использовании цилиндрической формы пина и глубине внедрения заплечика инструмента в образец, не превышающей 0,1...0,15 мм, максимальное значение предела прочности достигало 213,6 МПа (65 % от прочности основного металла). Для конической формы пина при той же глубине внедрения заплечика максимальное значение предела прочности достигало 295,7 МПа (90 % от прочности основного металла). В работе [21] при получении сварных соединений из алюминиевых сплавов, включая алюминиевый сплав АМг5М толщиной 0,8...3 мм, инструментом с коническим пином без резьбы рекомендовано внедрять заплечик инструмента в образец на глубину 0,1...0,15 мм, поскольку при других значениях глубины в сварном шве образуются дефекты. В нашем случае при использовании пина с резьбой на наружной поверхности и спиральной канавкой на торцевой поверхности заплечика максимальные значения предела прочности не зависели от глубины внедрения заплечика инструмента в образец. Отметим, что при глубине внедрения заплечика, не превышающей 0,1...0,15 мм, последующая механическая обработка сварного соединения для удаления грата, как правило, не требуется.

Вышесказанное свидетельствует о том, что при небольших глубинах внедрения заплечика инструмента в образец особое влияние на процессы перемешивания

металлов в зоне сварки оказывает его геометрия. Известно, что заплечик инструмента отвечает за перемешивание металла в верхней трети толщины образца, и это перемешивание усиливается при наличии спиральной канавки [9]. Наличие такой канавки способствует улучшению перемешивания благодаря вовлечению большего объема металла в процесс пластического деформирования и перемешивания, большей площади поверхности контакта инструмента с металлом, что приводит к более высокой температуре в зоне соединения и более низкой вязкости металла. Применение заплечика инструмента со спиральной канавкой на торцевой поверхности совместно с пином, имеющим резьбу, способствует достижению более высокого предела прочности на растяжение по сравнению с плоской формой заплечика при внедрении в образец на глубину не более 0,10...0,15 мм.

Исследования, направленные на анализ глубины внедрения инструмента в образец, при которой обеспечивается максимальная прочность сварного соединения, для случаев рассмотренных в работе геометрии инструмента и алюминиевого сплава АМг5 ранее не проводились. Полученные результаты важны с точки зрения выполнения сварки при минимальных величинах внедрения заплечика инструмента в образец. В этом случае отсутствует необходимость в последующей механической обработке сварного шва для удаления грата, что уменьшает себестоимость изготовления сварных изделий.

Экспериментальные исследования показали, что цилиндрическим инструментом без резьбы на пине можно получить прочность сварного соединения на том же уровне, что и инструментом, имеющим резьбу на пине и канавку на торцевой поверхности заплечика.

В работе [22] при анализе влияния параметров режима сварки алюминиевого сплава АМг5М на дефектность структуры сварного соединения отмечена важность коэффициента тепловложения, определяемого как отношение скорости сварки к частоте вращения инструмента, и характеризующего тепло, вводимое в зону сварки. В работе [23] бездефектные сварные соединения из алюминиевого сплава АМг5 были получены при данном отношении в диапазоне 0,05...0,26 мм/об. Автор [21] установил, что коэффициент тепловложения при формировании сварных соединений из алюминиевого сплава АМг5 без дефектов сплошности соответствовал диапазону 0,058...0,187 мм/об. Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных в настоящей работе, показал, что коэффициент тепловложения в зонах 1 и 2 (рис. 8) соответствует значениям, входящим в диапазон 0,056...0,110, что согласуется с данными [21; 23].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменение формы рабочей поверхности пина инструмента с цилиндрической на коническую не оказало влияния на выбор диапазона параметров режима сварки, обеспечивавшего отсутствие дефектов сплошности, а также на предел прочности на статическое растяжение.

Наличие резьбы на рабочей поверхности пина инструмента и спиральной канавки на торцевой поверхности заплечика приводит к образованию сварного соединения без дефектов сплошности в более широком

диапазоне параметров режима по сравнению с инструментами без вышеуказанных элементов.

Максимальные значения предела прочности для соединений, полученных с помощью цилиндрического и конического пинов без резьбы, обеспечиваются при внедрении заплечика в образец на глубину более 0,1...0,15 мм, а для конического пина с резьбой – от 0,05 мм.

При всех рассмотренных формах геометрии инструмента максимальные значения предела прочности на статическое растяжение достигали 95 % прочности основного металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Arbegast W.J. Friction stir welding after a decade of development // *Welding Journal*. 2006. Vol. 85. № 3. P. 28–35.
- Okamura H., Aota K., Ezumi M. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure // *Journal of Japan Institute of Light Metals*. 2000. Vol. 50. № 4. P. 166–172. DOI: [10.2464/jilm.50.166](https://doi.org/10.2464/jilm.50.166).
- Manigandan K., Senthilkumar S. Review of friction stir welding tools // *Journal of Advanced Engineering Research*. 2018. Vol. 5. № 1. P. 41–51.
- Chandrashekar A., Ajay Kumar B.S., Reddappa H.N. Friction stir welding: tool Material and geometry // *AKGEK International Journal of Technology*. 2015. Vol. 6. № 1. P. 16–20.
- Yang Min, Bao Rui-jun, Liu Xiu-zhong, Song Chao-qun. Thermo-mechanical interaction between aluminum alloy and tools with different profiles during friction stir welding // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29. № 3. P. 495–506. DOI: [10.1016/S1003-6326\(19\)64958-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64958-7).
- Kumar P.M., Anbumalar V., Ramesh Babu K.R. A review on progress of different types of friction stir welding tool geometry design // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2014. Vol. 16. № 8. P. 364–371.
- Ratković N., Jovanović Pešić Ž., Arsić D., Pešić M., Džunić D. Tool geometry effect on material flow and mixture in FSW // *Advanced Technologies & Materials*. 2022. Vol. 47. № 2. P. 33–36. DOI: [10.24867/ATM-2022-2-006](https://doi.org/10.24867/ATM-2022-2-006).
- Zhang Y.N., Cao X., Larose S., Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and Processing // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2012. Vol. 51. № 3. P. 250–261. DOI: [10.1179/1879139512Y.0000000015](https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015).
- Ambrosio D., Morisada Y., Ushioda Y., Fujii H. Material flow in friction stir welding: A review // *Journal of Materials Processing Technology*. 2023. Vol. 320. Article number 118116. DOI: [10.1016/j.jmatprot.2023.118116](https://doi.org/10.1016/j.jmatprot.2023.118116).
- Kumar R., Pancholi V. Three-dimensional material flow during friction stir welding of AA5083 // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 68-A. P. 1214–1223. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.06.051](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.051).
- Mohanty H.K., Mahapatra M.M., Kumar P., Biswas P., Mandal N.R. Effect of tool shoulder and pin probe profiles on friction stirred aluminum welds – a comparative study // *Journal of Marine Science and Application*. 2012. Vol. 11. P. 200–207. DOI: [10.1007/s11804-012-1123-4](https://doi.org/10.1007/s11804-012-1123-4).
- Meshram S., Madhusudhan Reddy G., Venugopal Rao V. Role of threaded tool pin profile and rotational speed on generation of defect free friction stir AA 2014 aluminum alloy welds // *Defence Science Journal*. 2016. Vol. 66. № 1. P. 57–63. DOI: [10.14429/dsj.66.8566](https://doi.org/10.14429/dsj.66.8566).
- Hassan Kh.A.A., Prangnell P.B., Norman A.F., Price D.A., Williams S.W. Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2003. Vol. 8. № 4. P. 257–268. DOI: [10.1179/136217103225005480](https://doi.org/10.1179/136217103225005480).
- Jiang Tao, Wu Chuan Song, Shi Lei. Effects of tool pin thread on temperature field and material mixing in friction stir welding of dissimilar Al/Mg alloys // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 74. P. 112–122. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.12.008](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.008).
- Vijayavel P., Balasubramanian V., Sundaram S. Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength and ductility of friction stir processed LM25AA-5% SiCp metal matrix composites // *Materials and Design*. 2014. Vol. 57. P. 1–9. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.12.008](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.008).
- Vijayavel P., Sundararajan T., Rajkumar I., Ananthakumar K. Effect of tool diameter ratio of tapered cylindrical profile pin on wear characteristics of friction stir processing of Al–Si alloy reinforced with SiC ceramic particles // *Metal Powder Report*. 2021. Vol. 76. № 2. P. 75–89. DOI: [10.1016/j.mprp.2020.04.005](https://doi.org/10.1016/j.mprp.2020.04.005).
- Гусарова А.В., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Бакшаев В.А., Никитин Ю.В. Влияние направления проката АМг5 на микроструктуру и свойства сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 4. С. 124–136. DOI: [10.17212/1994-6309-2020-22.4-124-136](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.4-124-136).
- Alemdar A.S.A., Jalal S.R., Mulapeer M.M. Effect of exfoliation corrosion on the efficient hybrid joint of AA2024-T3 and AA2198-T8 formed by friction stir welding // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. № 6. Article number e16577. DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e16577](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16577).
- Сизова О.В., Колубаев А.В., Колубаев Е.А., Заикина А.А., Рубцов В.Е. Разрушение стыковых соединений алюминий-магниевого сплава, выполненных способом сварки трением с перемешиванием // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2014. № 3. С. 14–20. EDN: [SKXOBD](https://www.edn.net/SKXOBD).
- Dawood H.I., Mohammed K.S., Rahmat A., Uday M.B. Effect of small tool pin profiles on microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy by friction stir welding // *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*. 2015. Vol. 25. № 9. P. 2856–2865. DOI: [10.1016/S1003-6326\(15\)63911-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63911-5).
- Покляцкий А.Г. Параметры процесса сварки трением с перемешиванием тонколистных алюминиевых сплавов // *Вестник Полоцкого государственного университета*. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2015. № 11. С. 53–58. EDN: [УОНВАН](https://www.edn.net/УОНВАН).
- Сизова О.В., Колубаев А.В., Колубаев Е.А., Заикина А.А., Рубцов В.Е. Влияние основных параметров процесса сварки трением с перемешиванием на дефектность структуры сварного соединения // *Обработка металлов (технология, оборудование, инст-*

- рументы). 2017. № 4. С. 19–29. DOI: [10.17212/1994-6309-2017-4-19-29](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2017-4-19-29).
23. Овчинников В.В., Дриц А.М. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием соединений из алюминиевых сплавов системы Al–Mg // Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 3. С. 7–20. DOI: [10.30987/article_5c7434ed5317f2.05345899](https://doi.org/10.30987/article_5c7434ed5317f2.05345899).
- ### REFERENCES
1. Arbegast W.J. Friction stir welding after a decade of development. *Welding Journal*, 2006, vol. 85, no. 3, pp. 28–35.
 2. Okamura H., Aota K., Ezumi M. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 2000, vol. 50, no. 4, pp. 166–172. DOI: [10.2464/jilm.50.166](https://doi.org/10.2464/jilm.50.166).
 3. Manigandan K., Senthilkumar S. Review of friction stir welding tools. *Journal of Advanced Engineering Research*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 41–51.
 4. Chandrashekar A., Ajay Kumar B.S., Reddappa H.N. Friction stir welding: tool Material and geometry. *AKGEEK International Journal of Technology*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 16–20.
 5. Yang Min, Bao Rui-jun, Liu Xiu-zhong, Song Chao-qun. Thermo-mechanical interaction between aluminum alloy and tools with different profiles during friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, vol. 29, no. 3, pp. 495–506. DOI: [10.1016/S1003-6326\(19\)64958-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64958-7).
 6. Kumar P.M., Anbumalar V., Ramesh Babu K.R. A review on progress of different types of friction stir welding tool geometry design. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2014, vol. 16, no. 8, pp. 364–371.
 7. Ratković N., Jovanović Pešić Ž., Arsić D., Pešić M., Džunić D. Tool geometry effect on material flow and mixture in FSW. *Advanced Technologies & Materials*, 2022, vol. 47, no. 2, pp. 33–36. DOI: [10.24867/ATM-2022-2-006](https://doi.org/10.24867/ATM-2022-2-006).
 8. Zhang Y.N., Cao X., Larose S., Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and Processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2012, vol. 51, no. 3, pp. 250–261. DOI: [10.1179/1879139512Y.0000000015](https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015).
 9. Ambrosio D., Morisada Y., Ushioda Y., Fujii H. Material flow in friction stir welding: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, vol. 320, article number 118116. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2023.118116](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118116).
 10. Kumar R., Pancholi V. Three-dimensional material flow during friction stir welding of AA5083. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68-A, pp. 1214–1223. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.06.051](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.051).
 11. Mohanty H.K., Mahapatra M.M., Kumar P., Biswas P., Mandal N.R. Effect of tool shoulder and pin probe profiles on friction stirred aluminum welds – a comparative study. *Journal of Marine Science and Application*, 2012, vol. 11, pp. 200–207. DOI: [10.1007/s11804-012-1123-4](https://doi.org/10.1007/s11804-012-1123-4).
 12. Meshram S., Madhusudhan Reddy G., Venugopal Rao V. Role of threaded tool pin profile and rotational speed on generation of defect free friction stir AA 2014 aluminum alloy welds. *Defence Science Journal*, 2016, vol. 66, no. 1, pp. 57–63. DOI: [10.14429/dsj.66.8566](https://doi.org/10.14429/dsj.66.8566).
 13. Hassan Kh.A.A., Prangnell P.B., Norman A.F., Price D.A., Williams S.W. Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, vol. 8, no. 4, pp. 257–268. DOI: [10.1179/136217103225005480](https://doi.org/10.1179/136217103225005480).
 14. Jiang Tao, Wu Chuan Song, Shi Lei. Effects of tool pin thread on temperature field and material mixing in friction stir welding of dissimilar Al/Mg alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 74, pp. 112–122. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.12.008](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.008).
 15. Vijayavel P., Balasubramanian V., Sundaram S. Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength and ductility of friction stir processed LM25AA-5% SiCp metal matrix composites. *Materials and Design*, 2014, vol. 57, pp. 1–9. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.12.008](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.008).
 16. Vijayavel P., Sundararajan T., Rajkumar I., Ananthakumar K. Effect of tool diameter ratio of tapered cylindrical profile pin on wear characteristics of friction stir processing of Al–Si alloy reinforced with SiC ceramic particles. *Metal Powder Report*, 2021, vol. 76, no. 2, pp. 75–89. DOI: [10.1016/j.mprp.2020.04.005](https://doi.org/10.1016/j.mprp.2020.04.005).
 17. Gusarova A.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Bakshaev V.A., Nikitin Yu.V. The influence of the rolling direction of AA5056 on the microstructure and properties of weld joints obtained by friction stir welding. *Obrabotka metallov / Metal working and material science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 124–136. DOI: [10.17212/1994-6309-2020-22.4-124-136](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.4-124-136).
 18. Alemdar A.S.A., Jalal S.R., Mulapeer M.M. Effect of exfoliation corrosion on the efficient hybrid joint of AA2024-T3 and AA2198-T8 formed by friction stir welding. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 6, article number e16577. DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e16577](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16577).
 19. Sizova O.V., Kolubaev A.V., Kolubaev E.A., Zaikina A.A., Rubtsov V.E. Fracture of friction stir welded butt joints structure of aluminum-magnesium alloy. *Obrabotka metallov / Metal working and material science*, 2014, no. 3, pp. 14–20. EDN: [SKXOBD](https://www.edn.net/SKXOBD).
 20. Dawood H.I., Mohammed K.S., Rahmat A., Uday M.B. Effect of small tool pin profiles on microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy by friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 2015, vol. 25, no. 9, pp. 2856–2865. DOI: [10.1016/S1003-6326\(15\)63911-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63911-5).
 21. Poklyatskiy A.G. Parameters of FSW process of thin sheet aluminium alloys. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, 2015, no. 11, pp. 53–58. EDN: [UOHBAH](https://www.edn.net/UOHBAH).
 22. 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 / Metal working and material science*, 2017, no. 4, pp. 19–29. DOI: [10.17212/1994-6309-2017-4-19-29](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2017-4-19-29).
 23. Ovchinnikov V.V., Drits A.M. Technological peculiarities of friction welding with Al–Mg aluminum alloys stir. *Science intensive technologies in mechanical*, 2019, no. 3, pp. 7–20. DOI: [10.30987/article_5c7434ed5317f2.05345899](https://doi.org/10.30987/article_5c7434ed5317f2.05345899).

Influence of tool geometry on the formation of welded joint during friction stir welding of the AA5083 aluminum alloy

© 2024

Igor N. Zybin*¹, PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chair “Technologies of Connection and Processing of Materials”

Darya A. Buzyreva, graduate student

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga (Russia)

*E-mail: igor.zybin@bmstu.ru,
igor.zybin@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5738-4231>

Received 18.10.2023

Accepted 08.02.2024

Abstract: One of the important parameters influencing the formation of a weld during friction stir welding is the tool geometry, which affects the processes of heat generation and stirring of metals in their connection zone. These processes influence the formation of a high quality and strength welded joint without continuity defects. In this regard, it is relevant to analyze the influence of tool geometry on the welding mode parameters, at which the welded joint is formed without continuity defects, as well as on the welded joint strength under static tension. The work considers the influence of the cylindrical and conical shapes of the tool pin, as well as the conical shape of the pin with a thread on its outer surface and a spiral groove on the end surface of the tool shoulder on the welding mode parameters, at which the welded joint is formed without continuity defects. The study shows that changing the shape of the pin working surface from cylindrical to a conical one had no effect on the range of welding mode parameters, at which the welded joint is formed without continuity defects. It has been found that the presence of a thread on the pin outer surface and a groove on the end surface of a tool shoulder allows producing welded joints without continuity defects in a wider range of welding mode parameters compared to a simpler tool geometry. The macrostructure of the resulting welded joints was considered. It has been found that the studied tool geometry has almost no influence on the maximum strength values of welded joints produced by friction stir welding and reaches 95 % of the strength of the base metal.

Keywords: friction stir welding; AA5083; tool geometry; strength of the welded joint without continuity defects.

For citation: Zybin I.N., Buzyreva D.A. Influence of tool geometry on the formation of welded joint during friction stir welding of the AA5083 aluminum alloy. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 2, pp. 43–52. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-4.