



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние направления проката АМг5 на микроструктуру и свойства сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием

Анастасия Гусарова^{1, a, *}, Валерий Рубцов^{1, 2, b}, Евгений Колубаев^{1, 2, c}, Владимир Бакшаев^{3, d}, Юрий Никитин^{3, e}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

³ ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», ул. Ленинградская, 36, г. Чебоксары, 428021, Чувашская Республика, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-4208-7584>, gusarova@ispms.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-9777-0164>, vlba@sespel.com,

^e <https://orcid.org/0000-0002-6514-7383>, urni@sespel.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.1:620.184:620.178.152.341:620.172

История статьи:

Поступила: 01 сентября 2020
 Рецензирование: 14 сентября 2020
 Принята к печати: 21 сентября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием
 Алюминиевый прокат
 Направление проката
 Микроструктура
 Механические свойства

Финансирование:

Результаты получены при выполнении комплексного проекта «Создание производства высокотехнологичного крупногабаритного оборудования интеллектуальной адаптивной сварки трением с перемешиванием для авиакосмической и транспортной отраслей РФ» (соглашение о предоставлении субсидии от 22.11.2019 № 075-11-2019-033), реализуемого ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», НГТУ и ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

АННОТАЦИЯ

Введение. Выделение тепла и пластическая деформация при сварке трением с перемешиванием (СТП) вызывают глубокие изменения микроструктуры и структурных свойств сварных соединений. Размер зерна, эволюция кристаллографической текстуры и выделение вторичных фаз являются наиболее важными микроструктурными изменениями в процессе сварки алюминиевых сплавов, которые в значительной степени влияют на прочностные свойства сварных соединений. Кроме технологических параметров процесса СТП (усилия внедрения инструмента, его частоты вращения и скорости перемещения) значительным фактором, определяющим свойства получаемых сварных соединений, также является взаимная ориентация структурных элементов свариваемого материала и направления воздействия инструмента на материал в процессе сварки. **Цель данной работы:** исследование совместного влияния направления исходного проката и усилия прижима инструмента в процессе СТП на структуру и свойства сварных соединений из алюминиевого сплава АМг5. **Методы.** Методами исследования являются механические испытания на статистическое растяжение, определение микротвердости, а также металлографический анализ структуры сварных швов. **Результаты и обсуждения.** В результате было установлено, что при низких значениях величины осевого усилия на инструменте (7 кН) в сварных соединениях наблюдаются дефекты типа линии стыка и пустот как вдоль, так и поперек направления проката. При увеличении нагрузки от 8 до 12 кН формируются бездефектные сварные соединения с повышенными механическими свойствами. Установлено, что направление проката АМг5 в процессе СТП не влияет на структуру и предел прочности сварных швов, но влияет на относительное удлинение и микротвердость. Показано, что в зоне перемешивания сварных швов, полученных СТП поперек листового проката АМг5, относительное удлинение выше в 1,3...2 раза, а микротвердость выше на 4...10 %, чем в зоне перемешивания сварных швов, полученных СТП вдоль листового проката АМг5.

Для цитирования: Влияние направления проката АМг5 на микроструктуру и свойства сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / А.В. Гусарова, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, В.А. Бакшаев, Ю.В. Никитин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 124–136. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-124-136.

*Адрес для переписки

Гусарова Анастасия Владимировна, м.н.с.
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
 пр. Академический, 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: +7 (996) 937-71-35, e-mail: gusarova@ispms.ru

Введение

Известно, что алюминиевые сплавы широко используются для изготовления конструкций различного назначения, особенно в авиационной промышленности. Конструкционные детали из алюминиевых сплавов можно сваривать, используя традиционную сварку плавлением. Однако обычная сварка плавлением приводит к возникновению многочисленных дефектов, таких как пористость, горячее растрескивание и т. д. [1]. Сварка трением с перемешиванием (СТП) как метод соединения алюминиевых сплавов в твердом состоянии имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной сваркой плавлением. Поскольку температура, создаваемая в процессе СТП, ниже, чем температура плавления свариваемых материалов, то некоторые дефекты, такие как пористость, хрупкие междендритные и эвтектические фазы, образующиеся во время затвердевания, могут быть устранены [2–5]. Соответственно технология СТП привлекательна для современной промышленности своей высокопроизводительностью и возможностью широкого применения. Процесс СТП также используется для сборки разнородных материалов, которые становятся все более востребованными в промышленности из-за ряда технических и экономических преимуществ [6–8].

Согласно данным литературы, большинство предыдущих исследований по СТП сосредоточено на влиянии параметров процесса, таких как геометрия инструмента, скорость вращения, скорость сварки, угол наклона инструмента [9–13], основные материалы и их расположение на наступающей или отступающей стороне [14–17], толщина основного материала [18]. Совсем мало данных о влиянии направления проката алюминиевых сплавов на структуру и механические свойства сварных соединений. Например, в работе [19] авторы исследовали три типа комбинаций сварных швов в зависимости от направления соединяемого материала: «вдоль-вдоль», «вдоль-поперек», «поперек-поперек». Показано, что прочность и пластичность сварных соединений АА6111-Т4 толщиной 1,5 мм можно немного улучшить с помощью комбинированного типа «вдоль-поперек». Однако авторы отмечают, что в реальных условиях работы, когда на сварные соединения действуют силы с разных сторон,

значения механических свойств для данной комбинации могут существенно различаться, поэтому необходимы дополнительные исследования.

В работе [20] авторы исследовали влияние направления соединяемого материала на микроструктуру и механические свойства разнородных сварных соединений (АА2024-Т351 и АА7075-Т651) в процессе СТП. Прокат АА2024-Т351 и АА7075-Т651 соединяли с помощью шести различных комбинаций направлений проката: «вдоль-вдоль», «поперек-поперек», «вдоль-поперек», «45°-45°», «45°-вдоль», «поперек-45°». Показано, что комбинация «45°-вдоль» приводит к ухудшению механических свойств при испытаниях на растяжение, в то время как качественные соединения могут быть достигнуты с помощью других пяти типов комбинаций [20]. Установлено, что максимальный предел прочности на разрыв составляет 445,6 МПа для соединения «вдоль-поперек» в результате оптимального количества подводимого тепла и достаточного потока материала [20]. Таким образом, различные комбинации направления проката исходного материала существенно влияют на микроструктуру и свойства сварных соединений. Но в данной работе не отмечено, при каких технологических параметрах процесса СТП проводили исследования.

На основании анализа литературы можно сделать вывод о том, что исследований совместного влияния направления проката на структурные и прочностные свойства алюминиевых сплавов недостаточно. Кроме того, отсутствуют данные о влиянии технологических параметров на сварные соединения, полученные при различных комбинациях направления проката алюминиевых сплавов. Поэтому **в настоящей работе исследовалось** совместное влияние направления проката АМг5 и осевого усилия на сварочном инструменте в процессе СТП на структуру и свойства сварных соединений.

Методика исследований

В работе исследованы сварные соединения деформируемого алюминиевого сплава АМг5. С использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Niton 3xlt Goldd+ был исследован химический состав сплава: Mg 5,4 вес. %; Mn 0,4 вес. %; Fe 0,4 вес. %; Si 0,2 вес. %;

Zn 0,03 вес. %; Cu 0,02 вес. %; Al остальное. В качестве заготовок использовали пластины размерами 60×250 мм, вырезанные из листа АМг5 толщиной 2,5 мм. Свариваемые кромки заготовок были фрезерованы, прилегающая к ним лицевая часть также была фрезерована до толщины заготовки 2,0 мм. Для данного исследования было выбрано две комбинации направления проката АМг5: вдоль направления проката и поперек направления проката.

Сварку трением с перемешиванием заготовок из АМг5 проводили в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН на оборудовании для СТП (рис. 1, а) с использованием 12 технологических режимов, приведенных в таблице. Значения параметров при переходе от одного режима к другому изменялись в следующих диапазонах: частота вращения инструмента (ω) – от 800 до 1000 об/мин, скорость сварки (V) – от 200 до 400 мм/мин и осевое усилие на сварочном инструменте (P) – от 6,0 до 12,0 кН. В процес-

се СТП проводился тепловизионный контроль поверхности сварного соединения с использованием тепловизора Flir A655sc (рис. 1).

Полученные сварные соединения из АМг5 выдерживались при нормальных условиях в течение 72 ч. Образцы для испытаний на одноосное растяжение вырезались из соединений в поперечном направлении таким образом, чтобы сварное соединение располагалось в центре рабочей части образца. Испытания на одноосное растяжение проводили на универсальной испытательной машине УТС-110М-100 со скоростью движения захвата 10 мм/мин. Микротвердость образцов измеряли на микротвердомере Dura-min-5 по структурным зонам: в зоне перемешивания (stirred zone, SZ), в зоне термомеханического воздействия (thermomechanically affected zone, TMAZ) с отступающей стороны и в зоне основного материала (base material, BM). В каждой структурной зоне делали по пять уколов и рассчитывали среднее значение. Для металло-

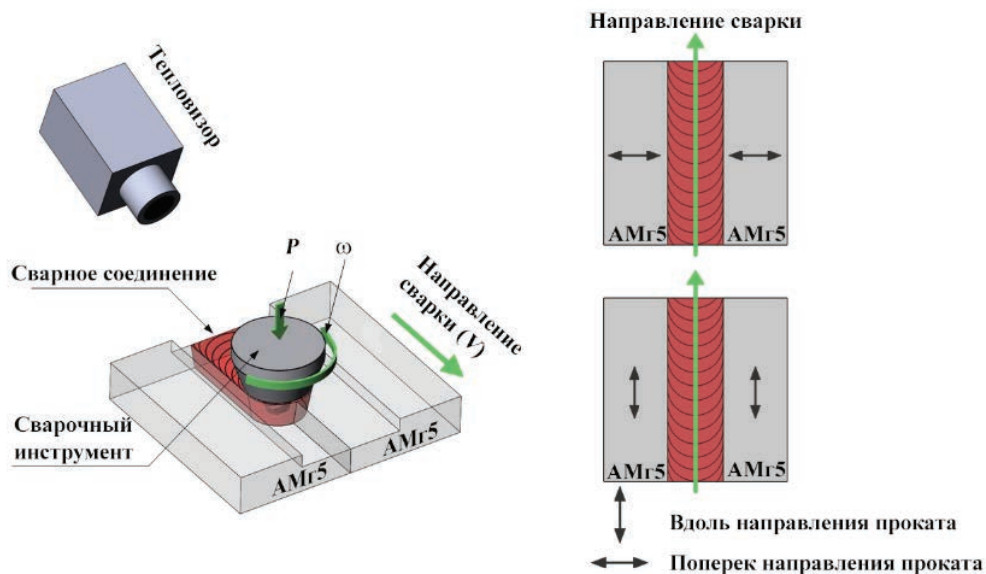


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием

Fig. 1. Friction stir welding process scheme

Технологические параметры процесса СТП
Technological parameters of the FSW process

Параметр / Parameter	Режим / Condition											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P , кН	7,0	7,0	7,0	7,0	8,0	8,0	8,5	6,0	9,0	10,0	11,0	12,0
V , мм/мин	200	200	200	300	300	300	300	300	300	300	350	400
ω , об/мин	800	800	900	900	900	1000	900	800	900	900	900	900

графических исследований электроэрозионным способом вырезались шлифы с их последующим полированием и травлением. Металлографические исследования проводили на металлографическом микроскопе «Альтами MET 1С».

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена макроструктура образцов из сплава АМг5 толщиной 2 мм, полученных при сварке по режимам 1–12 (см.

таблицу) вдоль и поперек направления проката. Из рисунка видно, что для всех образцов формируется сварной шов с характерными структурными зонами СТП соединения: зоной перемешивания (SZ), зоной термомеханического воздействия (ТМАЗ), зоной термического влияния (ТАЗ) и основного металла (ВМ).

В структуре сварных соединений, полученных по режимам 1–4 вдоль и поперек направления листового проката АМг5, присутствуют дефекты типа линии стыка, а в образцах по ре-

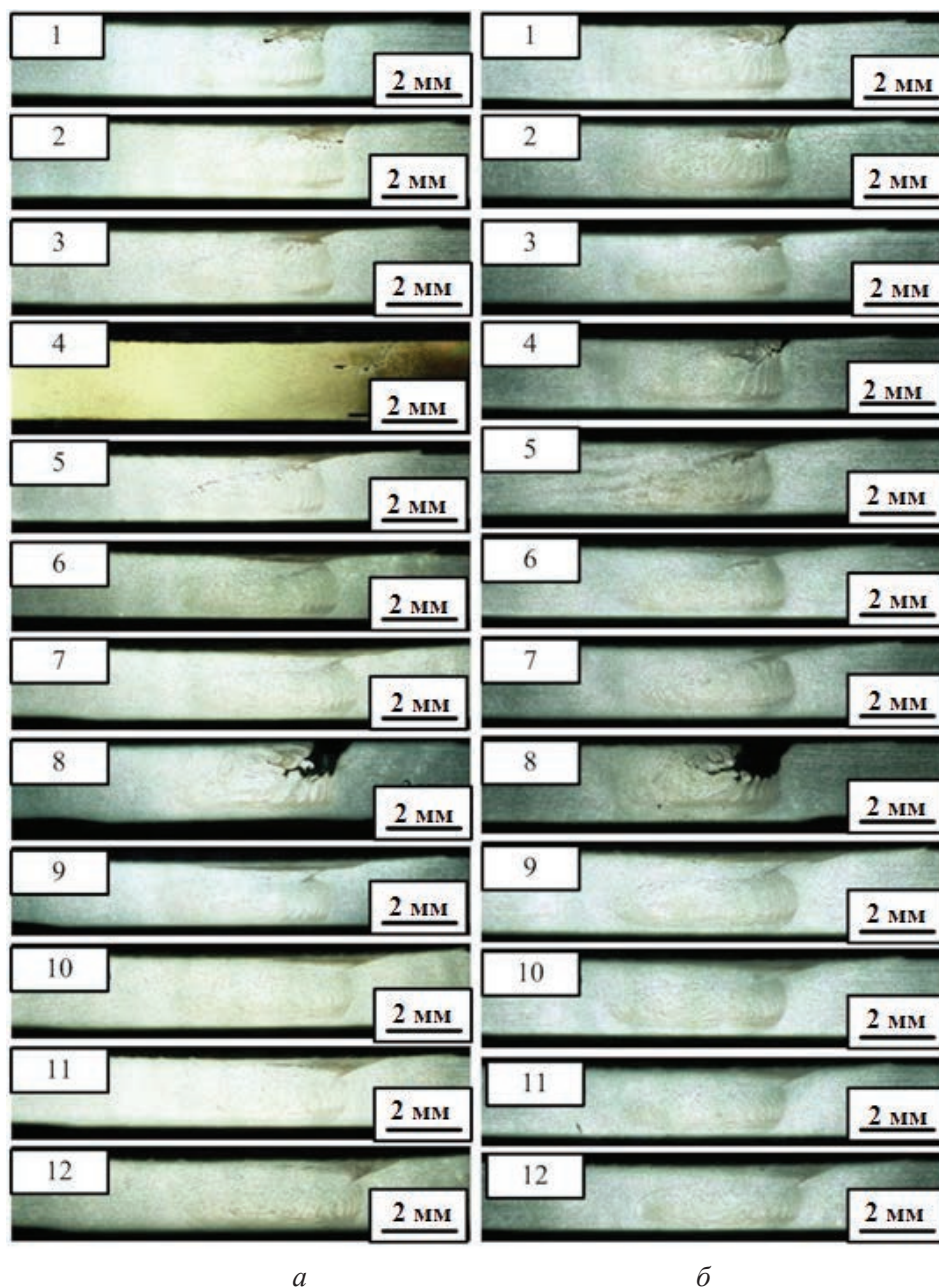


Рис. 2. Макроструктура сварных соединений сплава АМг5, полученных СТП по режимам 1–12 вдоль (а) и поперек (б) направления проката

Fig. 2. Macrostructure of weld joints of the AA5056 alloy obtained by FSW in modes 1–12 in the rolling (a) and transverse (b) directions

жимам 1, 2 и 4 присутствуют непровары с наступающей стороны сварного шва (рис. 2, а, б). Наличие непроваров обусловлено недостаточным усилием прижима инструмента к свариваемым материалам *P*, которое для режимов 1–4 составляет 7 кН. Анализ изменения профиля температуры в зоне сварки при получении образцов по режимам 1–4 как вдоль, так и поперек направле-

ния листового проката из АМг5 демонстрирует скачки температуры, свидетельствующие о неравномерном нагреве и переносе материала инструментом, что ведет к формированию дефектов в процессе сварки (рис. 3, а, б).

Увеличение осевого усилия на инструменте до 8,0...8,5 кН в режимах 5–7 позволяет устранить непровары в зоне перемешивания (см. та-

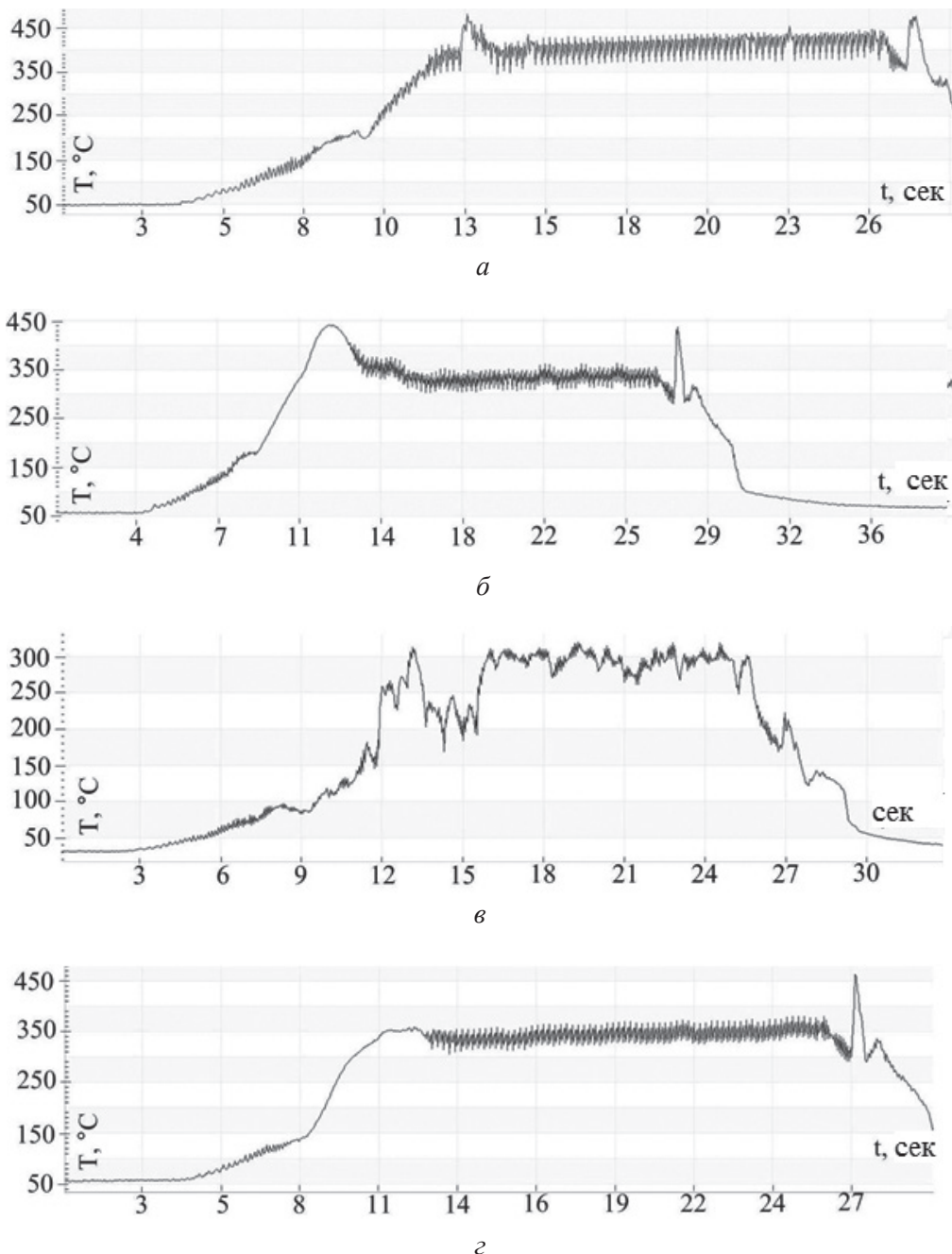


Рис 3. Температурный профиль СТП по режиму и относительно направления проката:

a – 4, вдоль; *б* – 3, поперек; *в* – 8, вдоль; *г* – 7, поперек

Fig. 3. FSW thermal profile by the mode and relative to the rolling direction:

a – 4, in the rolling direction; *б* – 3, in the transverse direction; *в* – 8, in the rolling direction; *г* – 7, in the transverse direction

блицу, рис. 2). Исключение составляет сварное соединение, полученное по режиму 8, для которого использовали очень низкое значение нагрузки ($P = 6$ кН) при $V = 300$ мм/мин и $\omega = 800$ об/мин. Такие технологические параметры привели к образованию крупного непровара при сварке вдоль и поперек направления проката (рис. 2, а, б). Это подтверждается данными тепловизора, согласно которому профиль температуры при сварке изменяется скачкообразно на протяжении всего процесса СТП и не превышает 330 ± 10 °С. Это подтверждает недогрев и неравномерный перенос материала инструментом, в результате чего образуется дефект (рис. 3, в).

Дальнейшее увеличение нагрузки инструмента на образцы с 9 до 12 кН в режимах 9–12 при практически тех же параметрах скорости перемещения инструмента (300...400 мм/мин) и частоте вращения инструмента 900 об/мин приводит к отсутствию видимых объемных дефектов, а наличие линии стыка в их структуре является наименее выраженным (рис. 2). Это указывает на то, что для достижения бездефектной структуры в образцах как вдоль, так и поперек направления листового проката из АМг5 необходимо использовать величину осевого усилия не менее 9 кН при скорости перемещения инструмента 300...400 мм/мин и частоте вращения инструмента 900 об/мин. Анализ температурных профилей образцов, сваренных вдоль и поперек направлений листового проката из АМг5, показал, что при режимах 5–7, 9–12 (т. е. при режимах без дефектов в виде пустот) температура во время процесса СТП изменяется незначительно и остается на уровне $0,6 \dots 0,8 T_{\text{пл}}$ (где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления АМг5), как, например, показано для режима 7 при сварке образцов поперек направления листового проката АМг5 (рис. 3, з). При всех режимах с образованием бездефектного соединения температура при выходе инструмента увеличивается относительно температуры при СТП на 10...20 %.

Металлографические исследования структуры сварных соединений показали, что структура их материала не изменяется существенно в зависимости от направления СТП относительно направления проката (рис. 4). Формируется типичное для процесса СТП-соединения строение зоны ТМАЗ и зоны SZ. Зона SZ всех сварных

соединений, кроме полученных по режиму 8 (рис. 4, в), характеризуется динамически рекристаллизованными зернами (рис. 4, а, б, з). Из рис. 4, в видно, что в сварном соединении, полученном по режиму 8, в зоне перемешивания имеется непровар, который тем не менее не влияет на распределение фаз в материале. В сварных соединениях АМг5, имеющих непровары в структуре (режимы 1–4), независимо от направления проката формируется типичная структура, представленная на рис. 4, а. Несмотря на дефект, в структурах соединений зона перемешивания имеет мелкозернистую рекристаллизованную структуру. В сварных соединениях, структура которых не имеет очевидных дефектов, независимо от направления проката наблюдается типичная микроструктура, представленная на (рис. 4, б, з).

На рис. 5 представлены результаты исследования микротвердости образцов, полученных по режимам 1–12. Из рис. 5, а видно, что микротвердость бездефектных образцов (по режимам 5–7, 9–12), полученных поперек направления проката, выше, чем у образцов, полученных вдоль направления проката. Исключение составляют образцы, полученные по режимам 1–4 и 8, имеющие дефекты. Стоит отметить, что с увеличением осевого усилия на сварочном инструменте увеличивается значение микротвердости в зоне перемешивания.

Существенных различий в значениях микротвердости зоны термомеханического воздействия соединений, полученных сваркой вдоль и поперек направления проката, не выявлено (рис. 5, б). Микротвердость базового материала в обоих направлениях относительно направления его проката характеризуется более низкими значениями – на 9...13 %, чем в зонах перемешивания и термомеханического воздействия, что может быть связано с грубокристаллическим строением его структуры (рис. 5, в).

На рис. 6 представлены результаты механических испытаний на растяжение для образцов в каждом из направлений при режимах 1–12. В результате проведения механических испытаний было установлено, что разрушение образцов происходит в основном с образованием двух взаимно пересекающихся трещин под углом 45° к оси образца либо взаимно не пересекающихся

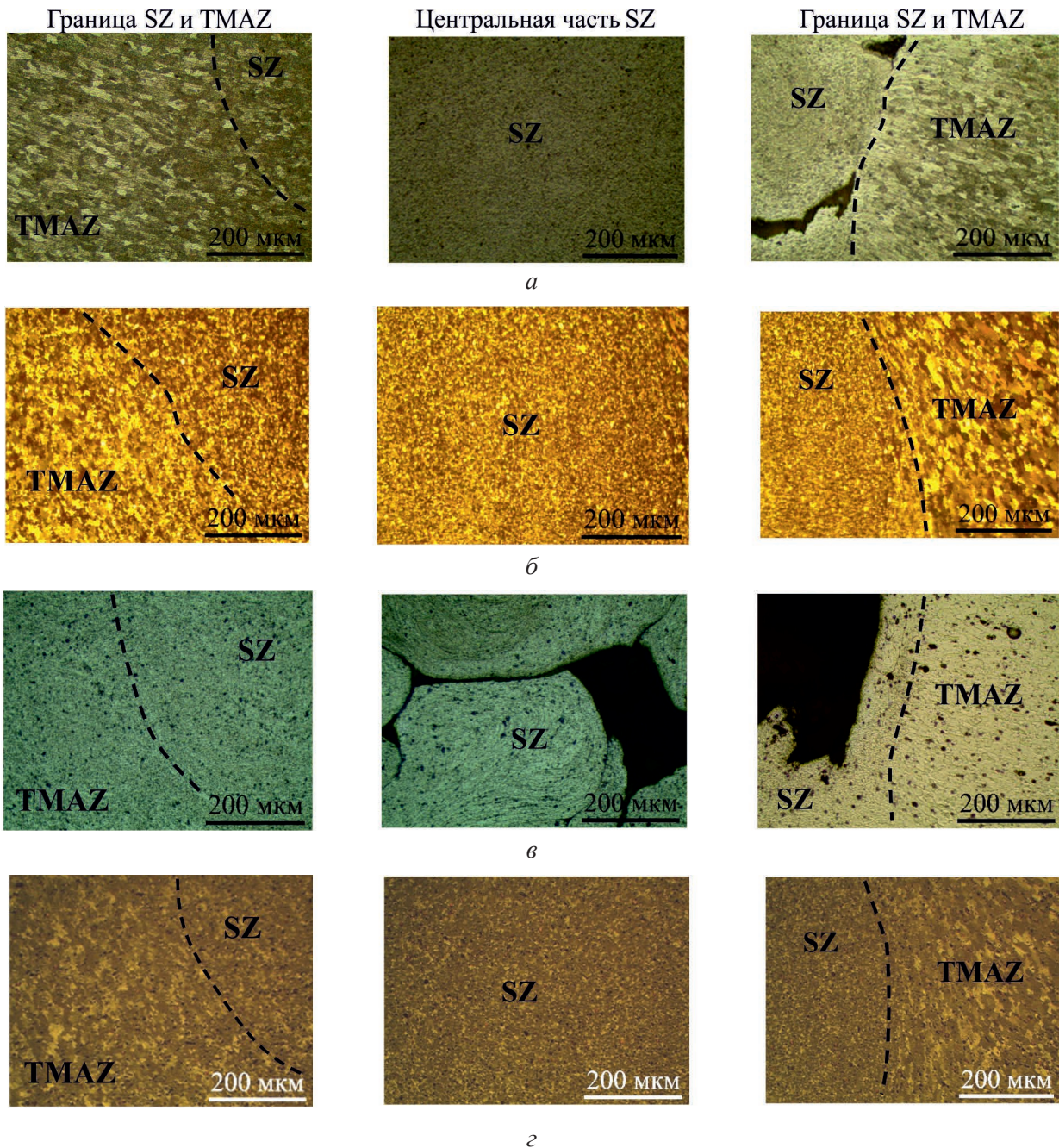


Рис. 4. Микроструктура соединений, сваренных по режиму и относительно направления проката:

a – 4, вдоль; *б* – 7, поперек; *в* – 8, вдоль; *г* – 9, поперек

Fig. 4. Microstructure of joints, welded by the mode and relative to the rolling direction:

a – 4, in the rolling direction; *б* – 7, in the transverse direction; *в* – 8, in the rolling direction; *г* – 9, in the transverse direction

трещин с образованием долома между ними. Как видно из рис. 6, *a*, для бездефектных образцов как вдоль, так и поперек направления листового проката АМг5 предел прочности варьируется в пределах 84...98 % от прочности основного металла АМг5, который составляет $333,50 \pm 0,8$ МПа. Значения относительного удлинения для бездефектных образцов, получен-

ных поперек направления листового проката АМг5 при режимах 5–7, выше в 1,3...2 раза, а при режимах 9, 10 и 12 – выше в 1,8...2 раза по сравнению с образцами, сваренными вдоль направления проката АМг5. Значения относительного удлинения хорошо коррелируют с данными по микротвердости в зоне перемешивания (рис. 5, *a*).

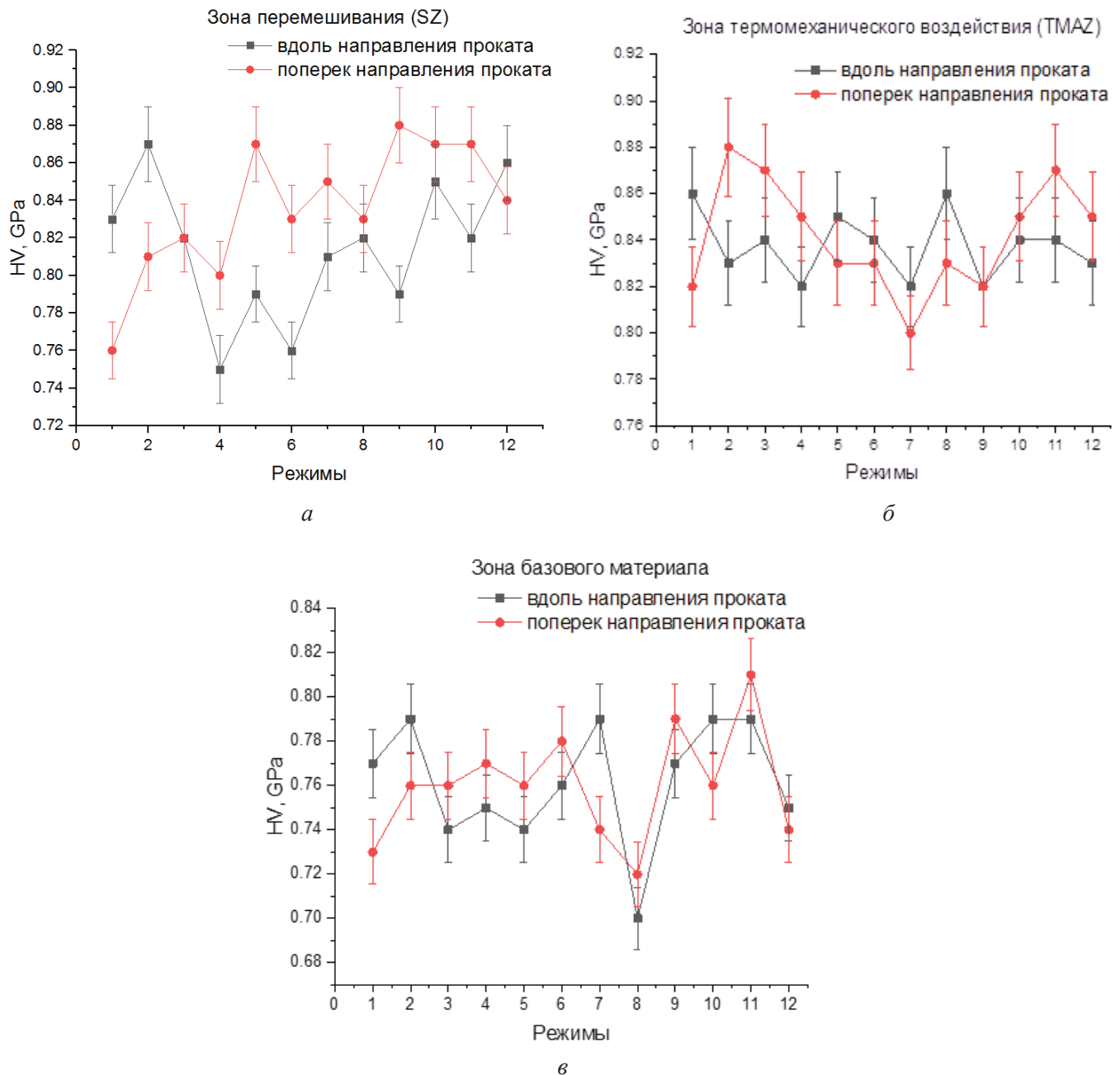


Рис. 5. Микротвердость образцов сплава АМг5 толщиной 2 мм, полученных при сварке вдоль и поперек направлений проката по режимам 1–12:

a – в зоне перемешивания; *б* – в зоне термомеханического воздействия; *в* – в зоне базового материала

Fig. 5. Microhardness of the AA5056 alloy samples 2 mm thick, obtained during welding in the rolling and transverse directions of rolling in modes 1–12:

a – in the stir zone; *b* – in the thermomechanical impact zone; *v* – in the base material zone

Заклучение

В работе было исследовано влияние направления проката листовых заготовок на структуру и свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов АМг5 при различных режимах в процессе СТП. Установлено, что при значении усиления инструмента, равном 7 кН (при

200...300 мм/мин, 800...900 об/мин), в сварных соединениях наблюдаются дефекты типа линии стыка и пустот как вдоль, так и поперек направления проката. Увеличение нагрузки от 8 до 12 кН позволяет получать бездефектные образцы с повышенными механическими свойствами. Показано, что для термонеупрочняемого сплава АМг5 направление проката в процессе СТП не влияет

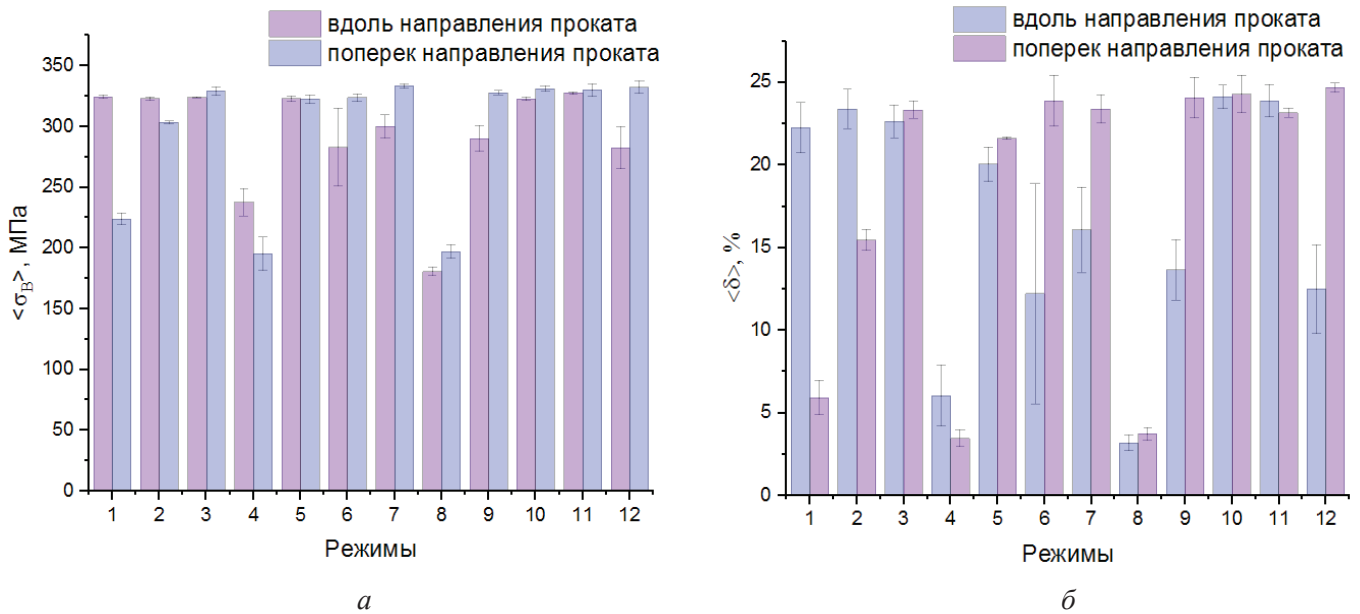


Рис. 6. Механические свойства образцов сплава АМг5 толщиной 2 мм, полученных при сварке вдоль и поперек направлений проката по режимам 1–12:

а – предел прочности; б – относительное удлинение

Fig. 6. Mechanical properties of the AA5056 alloy samples 2 mm thick, obtained during welding in the rolling and transverse directions of rolling in modes 1–12:

a – tensile strength; b – relative elongation

на структуру и предел прочности сварных швов при режимах 5–7 и 9–12, позволяющих получать структуру швов без дефектов в виде пустот. Направление проката АМг5 значительно влияет на относительное удлинение и микротвердость в зоне перемешивания образцов. Установлено, что в зоне перемешивания сварных швов, полученных СТП поперек листового проката АМг5, относительное удлинение выше в 1,3...2 раза, а микротвердость выше на 4...10%, чем в зоне перемешивания сварных швов, полученных СТП вдоль листового проката АМг5.

Список литературы

1. Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 36. – P. 571–600. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.10.005.
2. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H. Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties // Progress in Materials Science. – 2008. – Vol. 53. – P. 980–1023. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.
3. Friction stir welding of aluminium alloys / P. Threadgill, A. Leonard, H. Shercliff, P. Withers // Journal International Materials Reviews. – 2009. – Vol. 54. – P. 49–93. – DOI: 10.1179/174328009X411136.
4. Ma Z.Y. Friction stir processing technology: a review // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2008. – Vol. 39 (A). – P. 642–658. – DOI: 10.1007/s11661-007-9459-0.
5. Węglowski M.S. Friction stir processing – State of the art: review // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 18. – P. 114–129. – DOI: 10.1016/j.acme.2017.06.002.
6. Microstructure evolution of thermo-mechanically affected zone in dissimilar AA2024/7075 joint produced by friction stir welding / C. Zhang, G. Huang, Y. Cao, Y. Zhu, X. Huang, Y. Zhou, Q. Li, Q. Zeng, Q. Liu // Vacuum. – 2020. – Vol. 179. – P. 109515. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109515.
7. Gotawala N., Shrivastava A. Analysis of material distribution in dissimilar friction stir welded joints of Al 1050 and copper // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 57. – P. 725–736. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.043.
8. Influence of ultrasonic vibrations on the microstructure and mechanical properties of Al/Ti friction stir lap welds / M. Yu, H. Zhao, F. Xu, T. Chen, L. Zhou, X. Song, N. Ma // Journal of Materials Processing Technology. – 2020. – Vol. 282, P. 116676. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116676.
9. Influence of tool rotational speed on local microstructure, mechanical and corrosion behavior of dissimilar AA2024/7075 joints fabricated by friction stir welding / C. Zhang, Y. Cao, G. Huang, Q. Zeng, Y. Zhu,



X. Huang, N. Li, Q. Liu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 49. – P. 214–226. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.031.

10. Microstructure of AA 2024 fixed joints formed by friction stir welding / Eliseev A.A., Kalashnikova T.A., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Fortuna S.V., Kolubaev E.A. // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020047. – DOI: 10.1063/1.4932737.

11. Structure-property characteristics of Al-Cu joint formed by high-rotation-speed friction stir lap welding without tool penetration into lower Cu sheet / Q. Guan, H. Zhang, H. Liu, Q. Gao, M. Gong, F. Qu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 57. – P. 363–369. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.001.

12. Process parameters optimization of friction stir welding for optimum tensile strength in Al 6061-T6 alloy butt welded joints / D. Maneiah, D. Mishra, K.P. Rao, K.B. Raju // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 27, pt. 2. – P. 904–908. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.215.

13. Effect of friction stir welding parameters on defect formation / S.Yu. Tarasov, V.E. Rubtsov, A.A. Eliseev, E.A. Kolubaev, A.V. Filippov, A.N. Ivanov // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020230. – DOI: 10.1063/1.4932920.

14. Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy / S.Yu. Tarasov, A.V. Filippov, E.A. Kolubaev, T.A. Kalashnikova // *Tribology International*. – 2017. – Vol. 115. – P. 191–198. – DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.039.

15. Effect of material locations on properties of friction stir welding joints of dissimilar aluminium alloys / S.K. Park, S.T. Hong, J.H. Park, K.Y. Park,

Y.J. Kwon, H.J. Son // *Journal Science and Technology of Welding and Joining*. – 2010. – Vol. 15, iss. 4. – P. 331–336. – DOI: 10.1179/136217110X12714217309696.

16. Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding / P. Cavaliere, R. Nobile, F.W. Panella, A. Squillace // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. – Vol. 46, iss. 6. – P. 588–594. – DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.07.010.

17. Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys / R. Palanivel, P. Koshy Mathews, N. Murugan, I. Dinaharan // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 40. – P. 7–16. – DOI: 10.1016/j.matdes.2012.03.027.

18. Microstructural analysis of friction stir butt welded Al-Mg-Sc-Zr alloy heavy gauge sheets / T.A. Kalashnikova, A.V. Chumaevskii, K.N. Kalashnikov, S.V. Fortuna, E.A. Kolubaev, S.Yu. Tarasov // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 806. – P. 1–20. – DOI: 10.3390/met10060806.

19. Formability evaluation of friction stir welded 6111-T4 sheet with respect to joining material direction / D. Kim, W. Lee, J. Kim, C. Kim, K. Chung // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2010. – Vol. 52. – P. 612–625. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2010.01.001.

20. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA2024-7075 joints: Influence of joining material direction / C. Zhang, G. Huang, Y. Cao, Y. Zhu, W. Li, X. Wang, Q. Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – Vol. 766, iss. 24. – P. 138368. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138368.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 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



The Influence of the Rolling Direction of AA5056 on the Microstructure and Properties of Weld Joints obtained by Friction Stir Welding

Anastasia Gusarova^{1, a, *}, Valery Rubtsov^{1, 2, b}, Evgeny Kolubaev^{1, 2, c}, Vladimir Bakshaev^{3, d}, Yury Nikitin^{3, e}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

³SESPEL Cheboksary enterprise, CJSC, 36 Leningradskaya st., Cheboksary, 428021, Chuvash Republic, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-4208-7584>, gusarova@ispms.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-9777-0164>, vlba@sessel.com,

^e <https://orcid.org/0000-0002-6514-7383>, urni@sessel.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 01 September 2020

Revised: 14 September 2020

Accepted: 21 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Friction stir welding
 Rolled aluminum
 Rolling direction
 Microstructure
 Mechanical properties

Funding

The results were obtained in the framework of the Integrated Project “Establishment of production of high-tech large-sized equipment for intelligent adaptive friction stir welding for the aerospace and transport industries of the Russian Federation” (Agreement No. 075-11-2019-033 dated November 22, 2019) implemented by the CJSC “Cheboksary enterprise “SespeI”, NSTU and the ISPMS SB RAS with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of Decree of the Government of the Russian Federation No. 218 dated April 09, 2010.

ABSTRACT

Introduction. Heat emission and plastic deformation during friction stir welding (FSW) cause profound changes in the microstructure and structural properties of weld joints. The grain size, crystallographic texture evolution and second-phase precipitate are the most important microstructural changes during welding of aluminum alloys, which largely influence the strength properties of weld joints. In addition to process-dependent parameters (instrument sump force, its rotation frequency, and travel rate) of the FSW process, a significant factor, determining the properties of the obtained weld joints, is also a mutual orientation of structural elements of the weld material and the direction of the instruments impact on the material during welding. In this regard, the **purpose of the work** is to analyze the combined influence of the direction of the initial rolling and the instrument pressure during FSW on the structure and properties of weld joints from the AA5056 aluminum alloy. **Methods.** Research methods are mechanical tests for statistical tension, microhardness as well as metallographic analysis of the structure of welded joints. **Results and discussion.** As a result, it is established that at low values of the axial force on the instrument (7 kN), defects such as the joint line and voids are observed in welded joints both rolling and transverse directions. When the load increases from 8 kN to 12 kN, defect-free weld joints with enhanced mechanical properties form. It is determined that the rolling direction of AA5056 during FSW does not influence the structure and tensile strength of the weld joints, but it influences the relative elongation and microhardness. It is shown that in the stir zone of the weld joint, obtained by FSW in the transverse direction of AA5056 flats, the relative elongation is 1.3-2 times greater, and the microhardness is by 4-10% greater than that in the stir zone of weld joints, obtained by FSW in the rolling direction of AA5056 flats.

For citation: 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 (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 124–136. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-124-136. (In Russian).

* Corresponding author

Gusarova Anastasia V., Postgraduate, Junior researcher
 Institute of Strength Physics and Materials Science of
 Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
 2/4 pr. Akademicheskii,
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 (996) 937-71-35, e-mail: gusarova@ispms.ru

References

1. Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 36, pp. 571–600. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.10.005.
2. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H. Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2008, vol. 53, pp. 980–1023. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.
3. Threadgill P., Leonard A., Shercliff H., Withers P. Friction stir welding of aluminium alloys. *Journal International Materials Reviews*, 2009, vol. 54, pp. 49–93. DOI: 10.1179/174328009X411136.
4. Ma Z.Y. Friction stir processing technology: a review. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, vol. 39 (A), pp. 642–658. DOI: 10.1007/s11661-007-9459-0.
5. Węglowski M.S. Friction stir processing – State of the art: review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 18, pp. 114–129. DOI: 10.1016/j.acme.2017.06.002.
6. Zhang C., Huang G., Cao Y., Zhu Y., Huang X., Zhou Y., Li Q., Zeng Q., Liu Q. Microstructure evolution of thermo-mechanically affected zone in dissimilar AA2024/7075 joint produced by friction stir welding. *Vacuum*, 2020, vol. 179, p. 109515. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109515.
7. Gotawala N., Shrivastava A. Analysis of material distribution in dissimilar friction stir welded joints of Al 1050 and copper. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 725–736. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.043.
8. Yu M., Zhao H., Xu F., Chen T., Zhou L., Song X., Ma N. Influence of ultrasonic vibrations on the microstructure and mechanical properties of Al/Ti friction stir lap welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 282, p. 116676. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116676.
9. Zhang C., Cao Y., Huang G., Zeng Q., Zhu Y., Huang X., Li N., Liu Q. Influence of tool rotational speed on local microstructure, mechanical and corrosion behavior of dissimilar AA2024/7075 joints fabricated by friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 49, pp. 214–226. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.031.
10. Eliseev A.A., Kalashnikova T.A., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Fortuna S.V., Kolubaev E.A. Microstructure of AA 2024 fixed joints formed by friction stir welding. *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1683, p. 020047. – DOI: 10.1063/1.4932737.
11. Guan Q., Zhang H., Liu H., Gao Q., Gong M., Qu F. Structure-property characteristics of Al-Cu joint formed by high-rotation-speed friction stir lap welding without tool penetration into lower Cu sheet. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 363–369. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.001.
12. Maneiah D., Mishra D., Rao K.P., Raju K.B. Process parameters optimization of friction stir welding for optimum tensile strength in Al 6061-T6 alloy butt welded joints. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, pt. 2, pp. 904–908. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.215.
13. Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Eliseev A.A., Kolubaev E.A., Filippov A.V., Ivanov A.N. Effect of friction stir welding parameters on defect formation. *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1683, p. 020230. DOI: 10.1063/1.4932920.
14. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Kolubaev E.A., Kalashnikova T.A. Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy. *Tribology International*, 2017, vol. 115, pp. 191–198. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.039.
15. Park S.K., Hong S.T., Park J.H., Park K.Y., Kwon Y.J., Son H.J. Effect of material locations on properties of friction stir welding joints of dissimilar aluminium alloys. *Journal Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, vol. 15, iss. 4, pp. 331–336. DOI: 10.1179/136217110X12714217309696.
16. Cavaliere P., Nobile R., Panella F.W., Squillace A. Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46, iss. 6, pp. 588–594. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.07.010.
17. Palanivel R., Koshy Mathews P., Murugan N., Dinaharan I. Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys. *Materials and Design*, 2012, vol. 40, pp. 7–16. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.03.027.

18. Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Kalashnikov K.N., Fortuna S.V., Kolubaev E.A., Tarasov S.Yu. Microstructural analysis of friction stir butt welded Al-Mg-Sc-Zr alloy heavy gauge sheets. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 806, pp. 1–20. DOI: 10.3390/met10060806.
19. Kim D., Lee W., Kim J., Kim C., Chung K. Formability evaluation of friction stir welded 6111-T4 sheet with respect to joining material direction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, vol. 52, pp. 612–625. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2010.01.001.
20. Zhang C., Huang G., Cao Y., Zhu Y., Li W., Wang X., Liu Q. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA2024-7075 joints: Influence of joining material direction. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 766, iss. 24, p. 138368. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138368.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 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>).