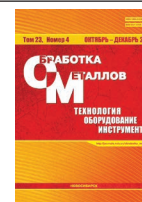




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Закономерности течения материала по контуру инструмента и стабильность механических свойств материала зоны перемешивания при СТП образцов сплава АМг5 больших толщин

Татьяна Калашникова^{1, 2, а, *}, Владимир Белобородов^{1, б}, Ксения Осипович^{1, в}, Андрей Воронцов^{1, д}, Кирилл Калашников^{1, е}

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

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, 634050, г. Томск, Российская Федерация

^а <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>, gelombang@ispms.tsc.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, vabel@ispms.ru,

^в <https://orcid.org/0000-0001-9534-775X>, osipovich_k@ispms.ru, ^д <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>, vav@ispms.tsc.ru,

^е <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>, kkn@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.1:620.184:620.178.152.341

История статьи:

Поступила: 16 сентября 2021

Рецензирование: 28 сентября 2021

Принята к печати: 05 октября 2021

Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием
Фрикционная перемешивающая обработка

Структурно-фазовое состояние
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 НГТУ и ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

АННОТАЦИЯ

Введение. Обработка и сварка трением с перемешиванием являются практически идентичными процессами интенсивной пластической деформации в условиях повышенной температуры. Различаются технологии в основном целью использования: формирование упрочненного поверхностного слоя или получение неразъемного соединения. Однако известно, что как при сварке, так и при обработке трением с перемешиванием заготовок больших толщин возникают температурные градиенты. В результате происходит изменение условий адгезионного взаимодействия, пластического течения материала и формирования зоны перемешивания по сравнению с тонколистовыми заготовками с принципиально отличными показателями отвода тепла. В связи с этим **целью работы** является определение закономерностей организации структуры и стабильности механических свойств в различных направлениях в материале заготовки из алюминий-магниевого сплава толщиной 35 мм, полученном методом сварки/обработки трением с перемешиванием. **Методика исследований.** Описаны техника и режимы сварки, обработки трением с перемешиванием заготовок сплава АМг5 толщиной 35 мм. Приведены данные по используемому для исследований оборудованию для механических испытаний и структурных исследований. **Результаты и обсуждение.** Полученные данные свидетельствуют о превышении механических свойств материала зоны обработки над механическими свойствами материала основного металла во всех направлениях относительно направления обработки. Неоднородности структуры материала после обработки/сварки трением с перемешиванием образцов больших толщин не оказывают определяющего влияния на свойства материала зоны перемешивания. При этом четкой корреляции между значениями прочностных показателей и направлением приложения усилия не выявляется, как не обнаруживается существенного отличия механических свойств от расположения образцов внутри зоны перемешивания. Средние значения предела прочности в вертикальном, поперечном и продольном направлениях составляют 302, 295 и 303 МПа, предела текучести – 155, 153 и 152 МПа, относительного удлинения после разрыва 27,2, 27,5, 28,7 % соответственно.

Для цитирования: Закономерности течения материала по контуру инструмента и стабильность механических свойств материала зоны перемешивания при СТП образцов сплава АМг5 больших толщин / Т.А. Калашникова, В.А. Белобородов, К.С. Осипович, А.В. Воронцов, К.Н. Калашников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 140–154. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-140-154.

*Адрес для переписки

Калашникова Татьяна Александровна, научный сотрудник
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4,
634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (913) 883-69-62, e-mail: gelombang@ispms.ru

Введение

Обработка трением с перемешиванием (ОТП), или фрикционная перемешивающая обработка, и сварка трением с перемешиванием (СТП) являются практически идентичными процессами интенсивной пластической деформации в условиях повышенной температуры [1–3]. Различаются эти технологии в основном целью использования: формирование упрочненного поверхностного слоя или получение неразъемного соединения. При погружении вращающегося инструмента в заготовку и при дальнейшем его продвижении материал разогревается и подвергается пластической деформации, происходит фрагментация зеренной структуры, а затем остывание перенесенного материала и его одновременная рекристаллизация, что приводит к значительным изменениям в структуре материала и его механических свойствах. В основном указанные технологии применяются для сварки или обработки различных алюминиевых сплавов [4–16]. Наиболее применимыми являются алюминий-магниево-скандиевые сплавы AMg5, AMg6 [5, 7, 9, 12], сплавы системы Al-Mg-Sc, Al-Mg-Sc-Zr [13, 15], Al-Cu-Li [11], Al-Zn-Mg-Cu [14, 16], Al-Cu-Mg [16] и др. Возможно получение соединений и покрытий на основе разнородных металлов и сплавов системы Al-Cu [17], Cu-Fe [18] и других, а также формирование различных упрочненных композиционных материалов с металлической матрицей [18–20]. Достаточно высокую степень применимости имеет технология фрикционной перемешивающей обработки для упрочнения материалов, полученных методами аддитивных технологий [12, 18]. Обработку трением с перемешиванием можно проводить как по всей толщине заготовки, так и регулировать глубину обрабатываемой области за счет размера инструмента. Сварка трением с перемешиванием возможна как встык, так и внахлест, а также с различной разделкой кромок до сварки. В зависимости от толщины заготовки структура зоны перемешивания значительно отличается: в заготовках больших толщин характерного для СТП- или ОТП-образцов толщиной 2...10 мм монолитного ядра не образуется, что подробно показано на примере СТП-соединения из сплава системы Al-Mg-Sc-Zr толщиной 35 мм в работе [13]. В данном случае ввиду большой толщины

заготовки и возникающих температурных градиентов происходит изменение условий адгезионного взаимодействия, пластического течения материала и формирования зоны перемешивания по сравнению с тонколистовыми заготовками с принципиально отличными показателями отвода тепла. В связи с этим одной из наиболее актуальных задач для исследований является определение закономерности течения материала по контуру инструмента и формирование механических свойств обработанного материала или сварного шва в различных направлениях при проведении обработки или сварки заготовок больших толщин. Целью настоящей работы является получение экспериментальных образцов зоны перемешивания большой толщины и исследования стабильности ее формирования и однородности механических свойств.

Методика исследований

Обработка/сварка трением с перемешиванием (фрикционная перемешивающая обработка) проводилась на установке в ЗАО «Чебоксарское предприятие “Сеспель” на плитах шириной 200 мм листового проката сплава AMg5 толщиной 35 мм. Обработку/сварку проводили по схеме, представленной на рис. 1. Заготовку 1 обрабатывали инструментом 2 путем внедрения пина 3 при вращении 4 инструмента с последующим перемещением вдоль линии стыка 5. Такая технология была использована не для создания соединения, а с целью определения граничных значений параметров процесса интеллектуальной адаптивной сварки трением с перемешиванием для плит сплава AMg5 толщиной 35 мм. Скорость вращения инструмента (ω) составляла 250 об/мин, скорость продольного перемещения инструмента (v) была 250 мм/мин, сила прижатия инструмента к заготовке (P) – 3600 кг, угол наклона инструмента составлял 3,0 град. Параметры процесса подбирались опытным путем. Длина соединения обрабатываемой области составляла 250 мм. Образцы для механических испытаний вырезали на участке шва 6. Образцы из зоны обработки 7 вырезали в вертикальном направлении 8, поперечном направлении 9 и продольном направлении 10 в количестве восьми образцов для каждого направления. Размер исследуемой области не соответствует Межго-

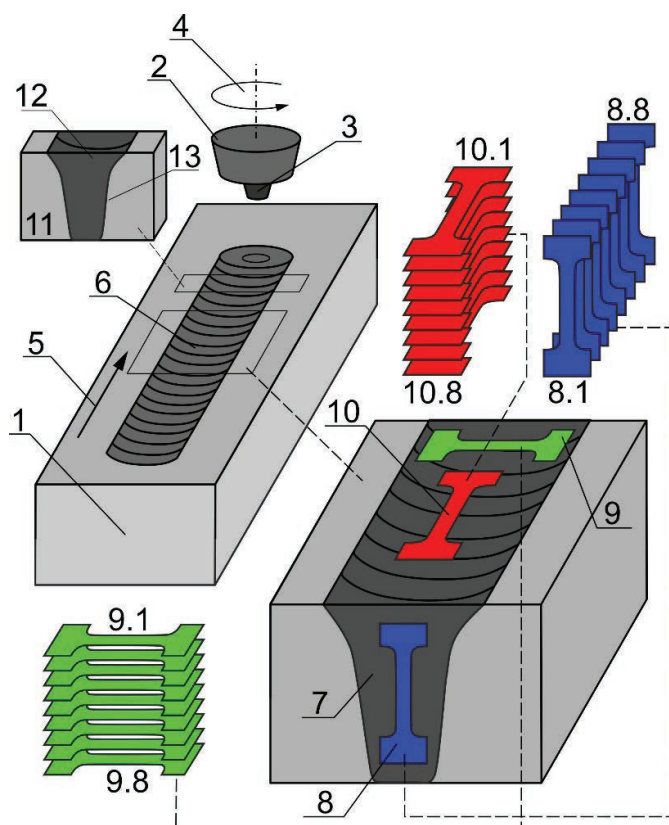


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием и вырезки образцов для механических испытаний и поперечных шлифов:

1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – пин инструмента; 4 – направление вращения инструмента; 5 – направление обработки/сварки трением с перемешиванием; 6 – область вырезки образцов для механических испытаний; 7 – зона обработки; 8 – вырезка лопаток в вертикальном направлении; 9 – вырезка лопаток в поперечном направлении; 10 – вырезка лопаток в продольном направлении; 11 – вырезка поперечных шлифов; 12 – зона перемешивания; 13 – зоны термомеханического и термического влияния

Fig. 1. Scheme of the friction stir welding process and cutting out samples for mechanical tests and metallography:

1 – workpiece; 2 – tool; 3 – tool pin; 4 – direction of tool rotation; 5 – direction of friction stir processing/welding; 6 – cutting area of the specimens for mechanical tests; 7 – processing zone; 8 – cutting of the blade-shaped test specimens in the vertical direction; 9 – cutting of the blade-shaped test specimens in transverse direction; 10 – cutting of the blade-shaped test specimens in longitudinal direction; 11 – metallographic sections; 12 – stir zone; 13 – thermomechanically affected and heat affected zones

сударственным стандартам, поэтому вырезались образцы в уменьшенном виде с сохранением стандартных пропорций. Размер лопаток составлял 2,7×2,2×12 мм. Для исследования структуры материала в поперечном сечении вырезали шлиф 11. В данном случае на шлифе четко выделяется зона

перемешивания 12 и околошовные зоны термического и термомеханического влияния 13.

Образцы для исследования изменения структуры по толщине в горизонтальной плоскости вырезались из заготовки после обработки трением с перемешиванием на электроискровом станке в планарном сечении, после чего делились на две части (рис. 2) для изучения зоны, где инструмент входит в заготовку (образцы 1.1–1.5), и зоны с отверстием от выхода инструмента (образцы 2.1–2.5). Изменение микроструктуры металла исследовалось на полированных и травленных шлифах с использованием металлографического микроскопа АЛЪТАМИ МЕТ 1С. Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине УТС 110М-100. Микротвердость измерялась на микротвердоме Duramin 5.

Результаты и их обсуждение

При фрикционной перемешивающей обработке, как и при сварке трением с перемешиванием (СТП), в зоне перемешивания по всей толщине заготовки на глубину погружения инструмента образуется сложная структура, представляющая собой результат формирования потоков материала по контуру инструмента в процессе сварки/обработки (рис. 3). В зоне перемешивания алюминиевого сплава АМг5 толщиной 35 мм, характерного для сварки образцов толщиной 2...10 мм, монолитного ядра в данном случае не обнаружено, однако формируется несколько ядер в виде завихрений слоев под плечами инструмента и в корне зоны перемешивания (см. рис. 3). Аналогичная закономерность наблюдалась при анализе структуры сплава Al-Mg-Sc-Zr в работе [13]. Однако за счет более качественно подобранных параметров процесса на этапе предварительных исследований в данной работе удалось избежать крупных несплошностей в верхней части образца. Режимы подобраны таким образом, что в обрабатываемой зоне не образуются дефекты, которые часто встречаются при сварке заготовок больших толщин. Пунктирными линиями выделены характерные структурные зоны, образующиеся в СТП-соединениях: зона перемешивания 1, зона термомеханического воздействия 2, зона термического влияния 3 и основной металл 4. Зона термомеханического

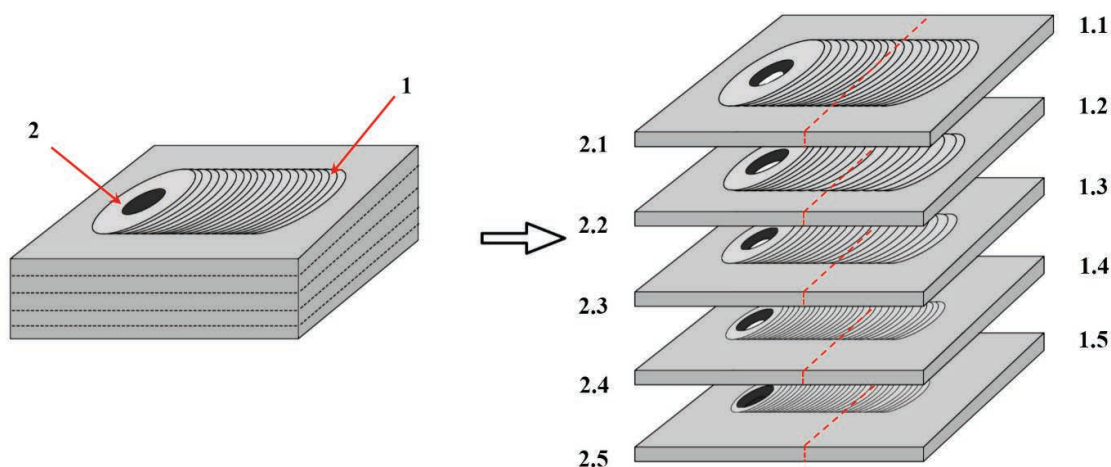


Рис. 2. Схема вырезки образцов в горизонтальном сечении для исследования пластического течения материала в зоне перемешивания по толщине обрабатываемого материала:

1 – зона входа инструмента; 2 – отверстие от выхода инструмента

Fig. 2. Scheme of cutting out samples in horizontal section to study the material plastic flow in the stir zone through the thickness of the processed material:

1 – tool inlet zone; 2 – tool outlet zone

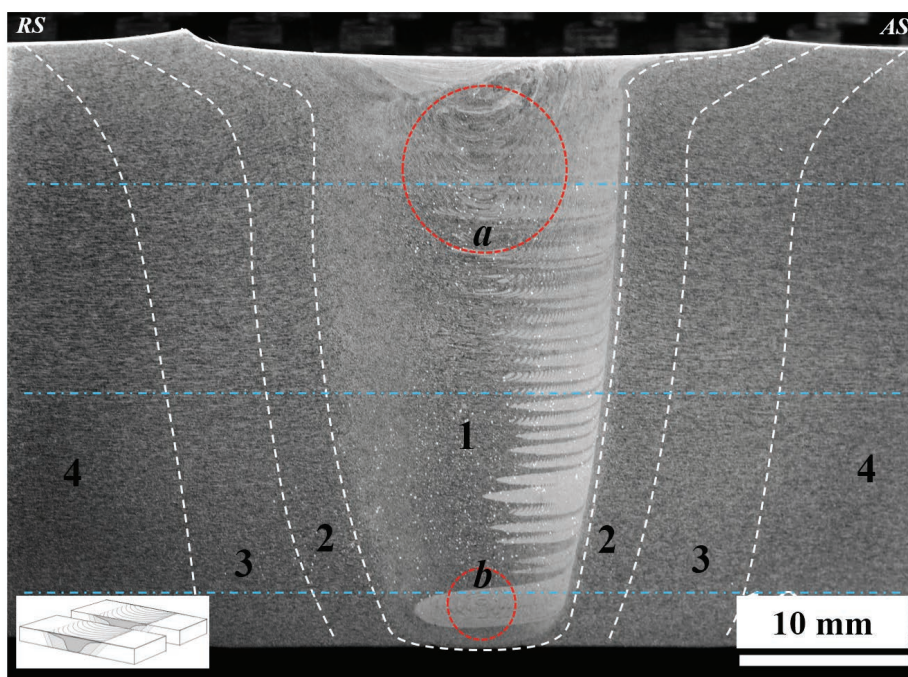


Рис. 3. Макроструктура образца, вырезанного в поперечном сечении, после фрикционной перемешивающей обработки:

1 – зона перемешивания; 2 – зона термомеханического воздействия; 3 – зона термического влияния; 4 – основной металл; а – формирование ядра в зоне под плечами инструмента; б – формирование ядра в корне обработанной заготовки; RS – отступающая сторона; AS – наступающая сторона. Линии, вдоль которых проводилось измерение микротвердости, обозначены пунктиром

Fig. 3. Macrostructure of a sample cut in cross section after friction stir processing:

1 – stir zone; 2 – thermomechanically affected zone; 3 – heat affected zone; 4 – base metal; а – nugget formation in the near-shoulder area; б – nugget formation in the weld root; RS – retreating side; AS – advancing side. Lines along which the microhardness measurement was carried out are indicated with dashed lines

влияния с наступающей стороны AS имеет резкую границу с зоной перемешивания, с отступающей стороны RS имеется плавный переход от зоны термомеханического влияния к зоне шва.

Макроструктура образцов в горизонтальном сечении представлена на рис. 4 и 5. В структуре образцов в верхней части зоны перемешивания

можно выделить существенную неоднородность строения 4 (рис. 4, а). Такое положение может быть связано с влиянием на структуру в верхней части образца пластической деформации от плеч инструмента при обработке. В зоне начала движения на всех участках по толщине соединения формируется неоднородность структуры 1 (рис. 4 и 5).

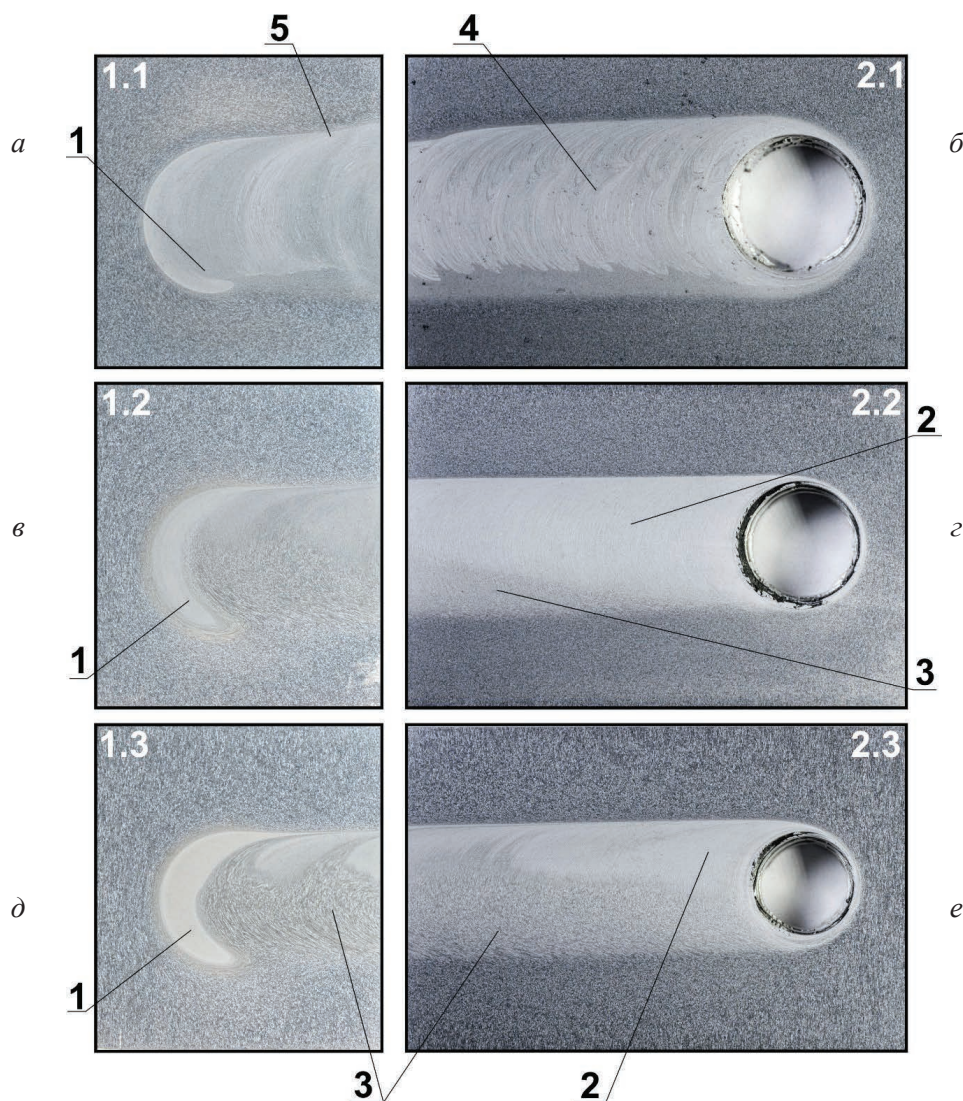


Рис. 4. Макроструктура образцов 1.1 – 1.3 (а, в, д) и 2.1 – 2.3 (б, г, е), вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1:

1 – неоднородности строения материала в зоне входа инструмента; 2 – зона с преимущественно протравленной структурой со слоистым строением зоны перемешивания; 3 – зона с преимущественно протравленными зернами в зоне перемешивания; 4 – неоднородности строения зоны перемешивания в подплечевой зоне; 5 – изменение ширины зоны обработки в начале перемещения инструмента

Fig. 4. Macrostructure of samples 1.1 – 1.3 (a, в, д) and 2.1 – 2.3 (б, г, е) cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1:

1 – inhomogeneities of material structure in the tool inlet zone; 2 – area with a predominantly etched structure with a layered structure of the stir zone; 3 – area with predominantly etched grains in the stir zone; 4 – inhomogeneities of the stir zone structure in the near-shoulder area; 5 – change in the width of the processing zone at the beginning of the tool movement

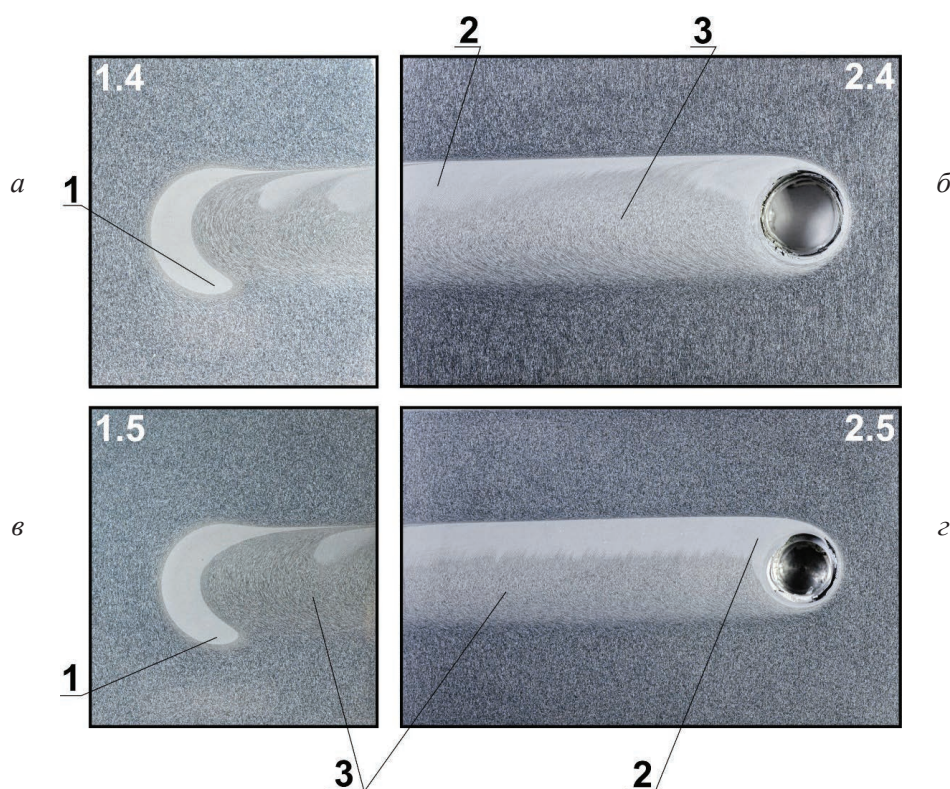


Рис. 5. Макроструктура образцов 1.4–1.5 (а, в) и 2.4–2.5 (б, г), вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1:

1 – неоднородности строения материала в зоне входа инструмента; 2 – зона с преимущественно протравленной структурой со слоистым строением зоны перемешивания; 3 – зона с преимущественно протравленными зернами в зоне перемешивания

Fig. 5. Macrostructure of samples 1.4–1.5 (a, в) and 2.4–2.5 (б, г) cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1:

1 – inhomogeneities of material structure in the tool inlet zone; 2 – area with a predominantly etched layered structure of the stir zone; 3 – area with predominantly etched grains in the stir zone

Это связано с достаточно сложными условиями вначале движения инструмента за счет неустановившегося теплового режима. Далее по длине шва можно выделить утолщение зоны перемешивания 5 (рис. 4), в которой инструмент после прогрева материала полностью прижимается плечами к заготовке и формирует зону перемешивания той ширины, которой она является на этапе установившегося режима сварки/обработки.

В более нижних слоях структура металла на этапе установившегося режима формируется с большей стабильностью по длине шва (рис. 4, б, в). В структуре образцов горизонтального сечения после травления четко выделяются два типа структуры, которые содержат элементы с различным характером травления. В первом из них 2 (рис. 4 и 5) четко выделяются слои переносимого металла, расстояние между которыми

коррелирует со значением подачи на один оборот инструмента. Во второй области структура демонстрирует склонность к травлению на зерно 3 (рис. 4, 5) и не проявляет слоистой структуры зоны перемешивания.

В нижней части зоны перемешивания (рис. 5, а, б) структура металла представлена достаточно стабильным строением. Кроме того, присутствуют зоны, в которых травление выявляет слои в зоне перемешивания 2 (рис. 5) и зерна 3 (рис. 5). Следует отметить, что распределение данных зон по толщине образцов достаточно неоднородно и изменяется от одного образца к другому неравномерно. В целом в нижних слоях образца структура зоны перемешивания более однородна, чем в верхних слоях. Такое положение может объяснить большее давление от прижатия сварочного инструмента в нижней зоне перемешивания, чем в верхней.

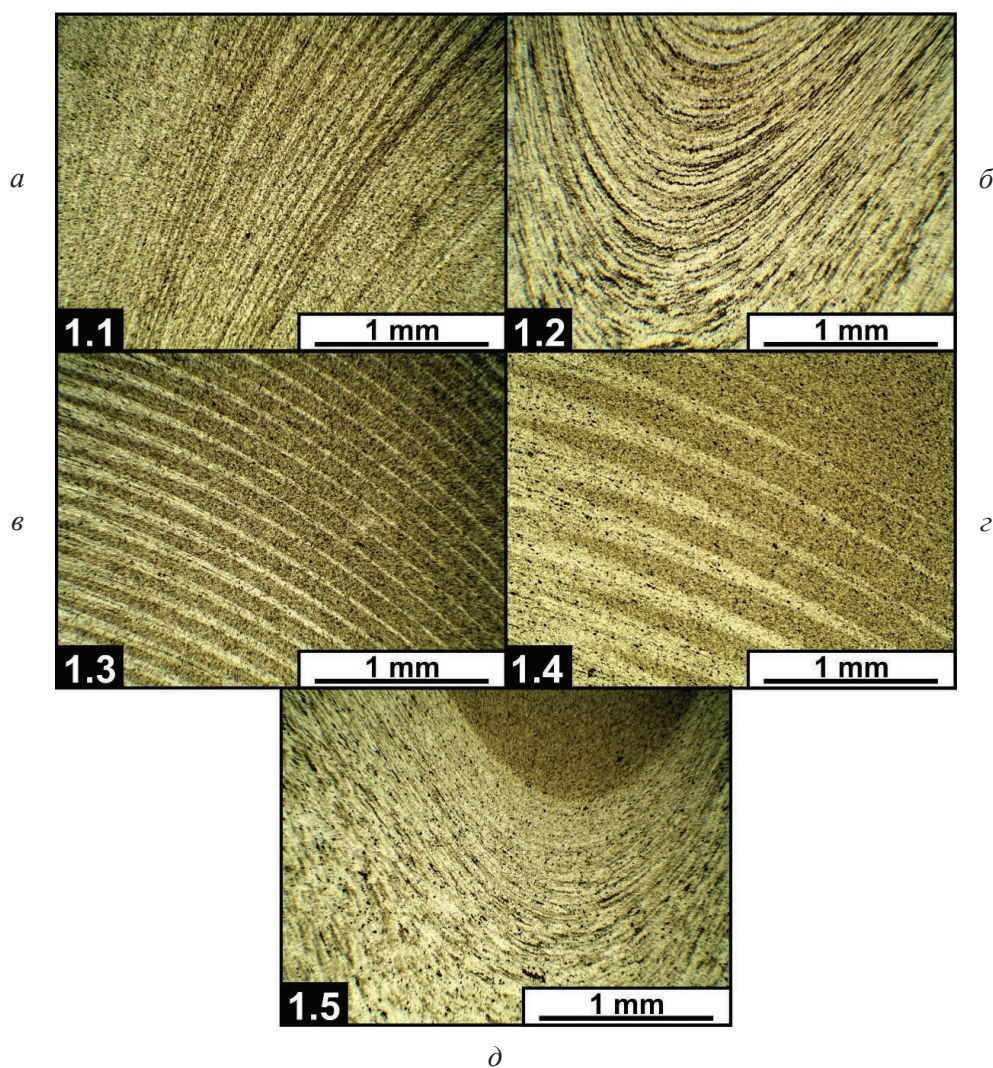


Рис. 6. Структура образцов 1.1–1.5 (а–д) в зоне входа инструмента, вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1

Fig. 6. Structure of samples 1.1–1.5 (a–d) in the tool inlet zone, cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1

Отчасти это может подтвердить механика процесса сварки/обработки.

Структура в зоне входа инструмента имеет аналогичное строение на всех участках по толщине образца (рис. 6). Как видно из рис. 6, а–г, структура представлена смесью протравленных слоев и протравленных зерен. Неоднородности структуры проявляются четко в виде сложных форм в организации зоны перемешивания (рис. 6, б, д). Размер слоев близок к величине подачи на оборот при движении инструмента. Причина, по которой в одних участках травление проявляет слои, а в других зерна, до конца не ясна. Можно предположить, что на границе потоков металла, формирующих соединение, травимость границ зерен меньше,

чем травимость слоев переноса, а внутри потоков травимость границ зерен выше. В структуре образцов не выявлено образования дефектов сварных швов, характерных для сварки трением с перемешиванием, что может свидетельствовать о потенциально высоких механических свойствах материала в различных направлениях.

В зоне выхода инструмента (рис. 7, 8) структура металла, наоборот, существенно зависит от расстояния от плеч инструмента. В верхней части образца (вблизи плеч) можно подробно увидеть строение неоднородностей, описанных ранее при анализе макроструктуры (рис. 7, а). Различные по глубине параметры в структуре можно выделить в форме и раз-

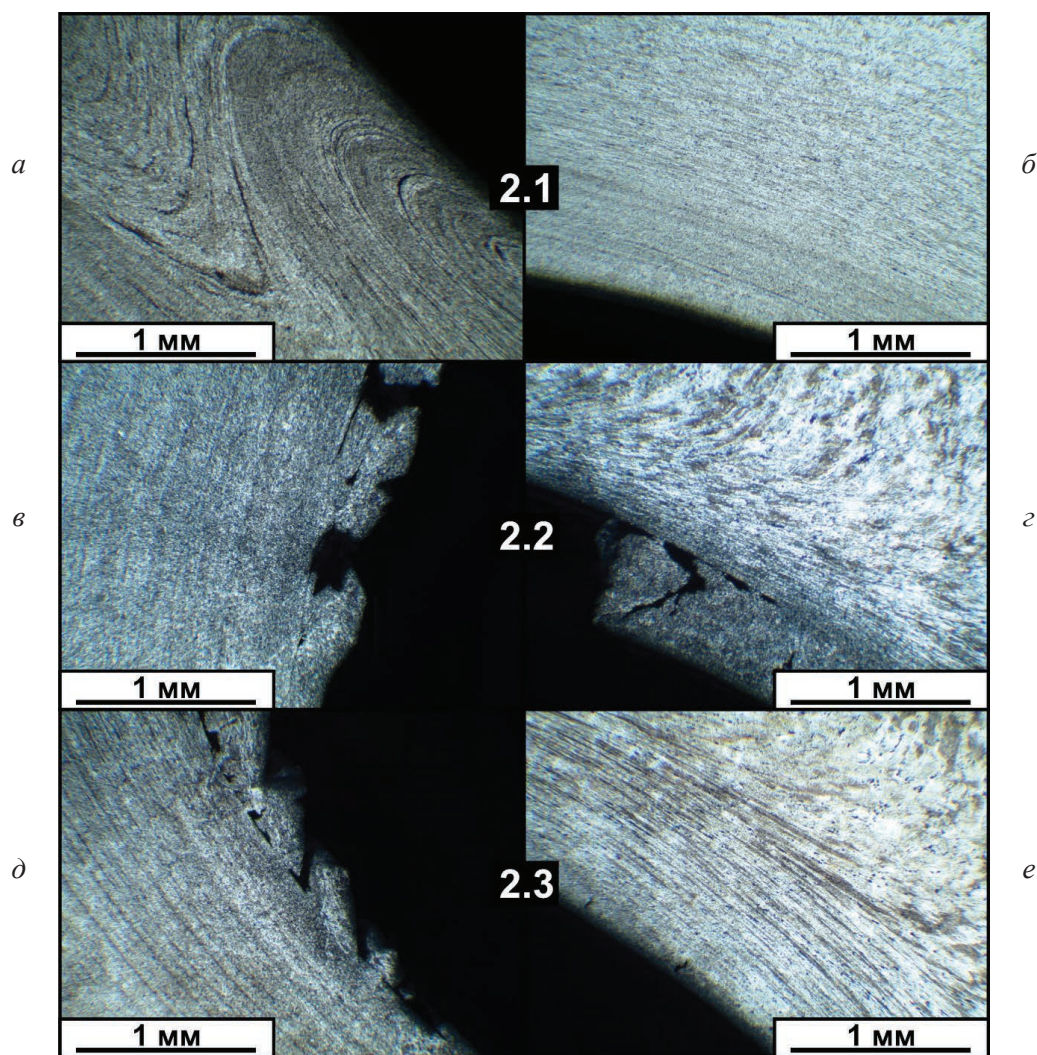


Рис. 7. Структура образцов 2.1 (а, б), 2.2 (в, г) и 2.3 (д, е) в зоне выхода инструмента, вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1

Fig. 7. Structure of samples 2.1 (a, б), 2.2 (в, г) and 2.3 (д, е) in the tool outlet zone, cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1

мерах слоя переноса, а также в особенностях его состояния в зоне выхода инструмента (рис. 7, в–е и 8, а–г). Наименьшая толщина слоя переноса, как и зоны перемешивания ожидаемо находится в нижней части зоны обработки, где диаметр пина инструмента минимален (рис. 8, в, г). Кроме того, встречаются частично оторванные от зоны перемешивания слои переноса практически на каждом уровне по высоте образца (рис. 7, в–д и 8, а). Отрыв части зоны перемешивания при выходе инструмента обусловлен адгезией алюминиевого сплава к стальному инструменту, а также тем фактом, что достаточно большая часть материала при обработке находится между витками нарезки винтового пина.

Определение микротвердости материала шва и околошовной зоны неразъемных со-

единений показывает, что в материале основных для СТП-соединения структурных зон из сплава АМг5 толщиной 35 мм не происходит разупрочнения материала по сравнению с твердостью основного металла соответствующего сплава (рис. 9). Данные, полученные в ходе измерений микротвердости основных структурных зон по Виккерсу, также показывают отсутствие существенного упрочнения материала и небольшие различия в значениях твердости на разных по толщине участках соединения. При этом разброс значений микротвердости в целом по образцу достаточно существенный (от 745 до 1045 МПа, т. е. 40 % от минимальной величины), что значительно выше, чем увеличение микротвердости в центральной части

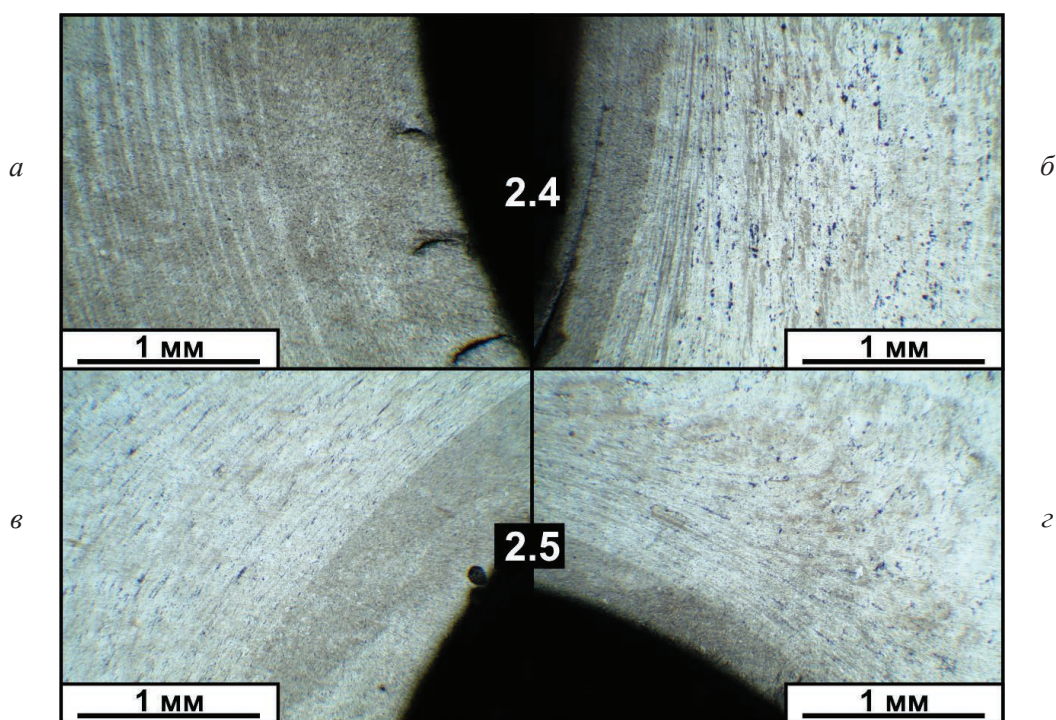


Рис. 8. Структура образцов 2.4 (а, б) и 2.5 (в, г) в зоне выхода инструмента, вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1

Fig. 8. Structure of samples 2.4 (a, б) and 2.5 (в, г) in the tool outlet zone, cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1

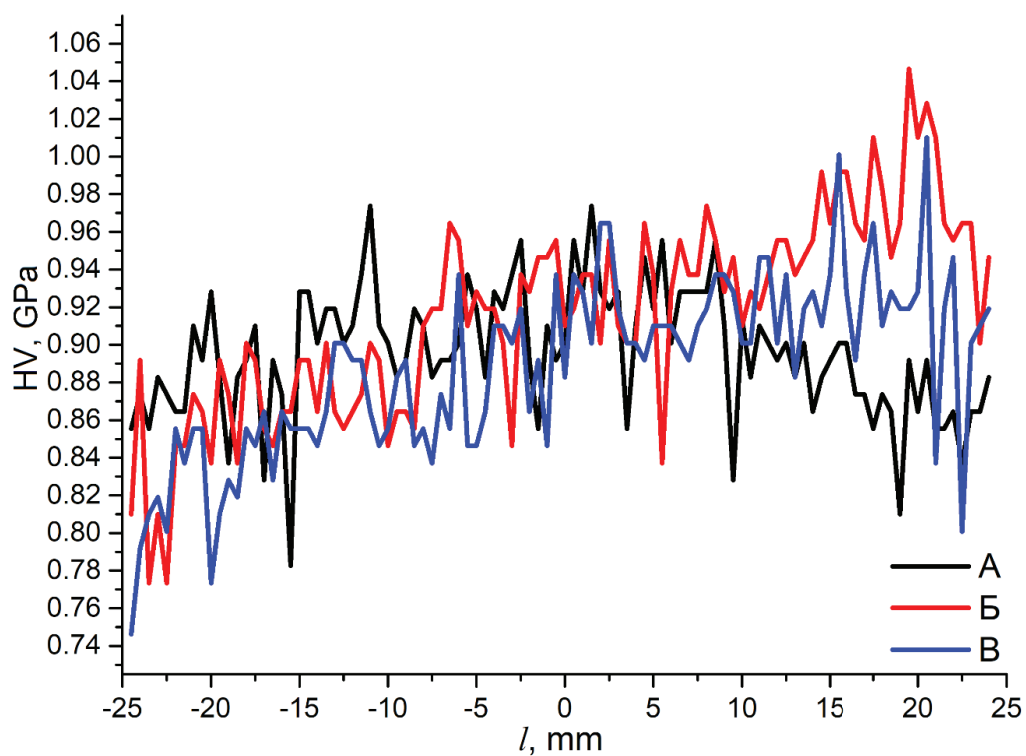


Рис. 9. Изменение микротвердости в зоне перемешивания и околошовной зоне образцов в соответствии со схемой, изображенной на рис. 2

Fig. 9. Change of microhardness measured according to the scheme shown in Fig. 2 in the stir zone and near-weld zone

зоны перемешивания (от 745 до 975 МПа, или 31 % от минимального значения) относительно микротвердости основного металла.

Механические испытания образцов, вырезанных в различных направлениях из зоны перемешивания (см. рис. 1), говорят о типичном деформационном поведении для алюминиево-магниевого сплава с присущим ему эффектом прерывистой пластичности (рис. 10). Испытания основного металла плит сплава АМг5 толщиной 35 мм показывают средние значения временного сопротивления 301 МПа. Механические испытания показали, что для исследуемых образцов характерны достаточно высокие механические свойства в вертикальном (рис. 10, а), поперечном (рис. 10, б) и продольном (рис. 10, в) направлении в сравнении с характеристиками основного металла. Средние значения временного сопротивления в вертикальном, поперечном и продольном направлении составляют 302, 295 и 303 МПа, предела

текучести – 155, 153 и 152 МПа, относительного удлинения после разрыва – 27,2, 27,5 и 28,7 % соответственно. Помимо достаточно близких значений предела прочности, текучести и относительного удлинения после разрыва для образцов также можно отметить высокую стабильность деформационного поведения при растяжении, о чем свидетельствует наложение графиков друг на друга.

Оценка стабильности временного сопротивления для разных направлений приложения усилия (рис. 11) позволяет уточнить, что в целом в поперечном направлении прочностные свойства несколько ниже на всех участках измерения, но во всех направлениях прочность материала шва выше прочности материала исходного листового проката. В центральной части соединения также имеется некоторая тенденция к снижению механической прочности по сравнению со значениями в верхней и нижней части листа.

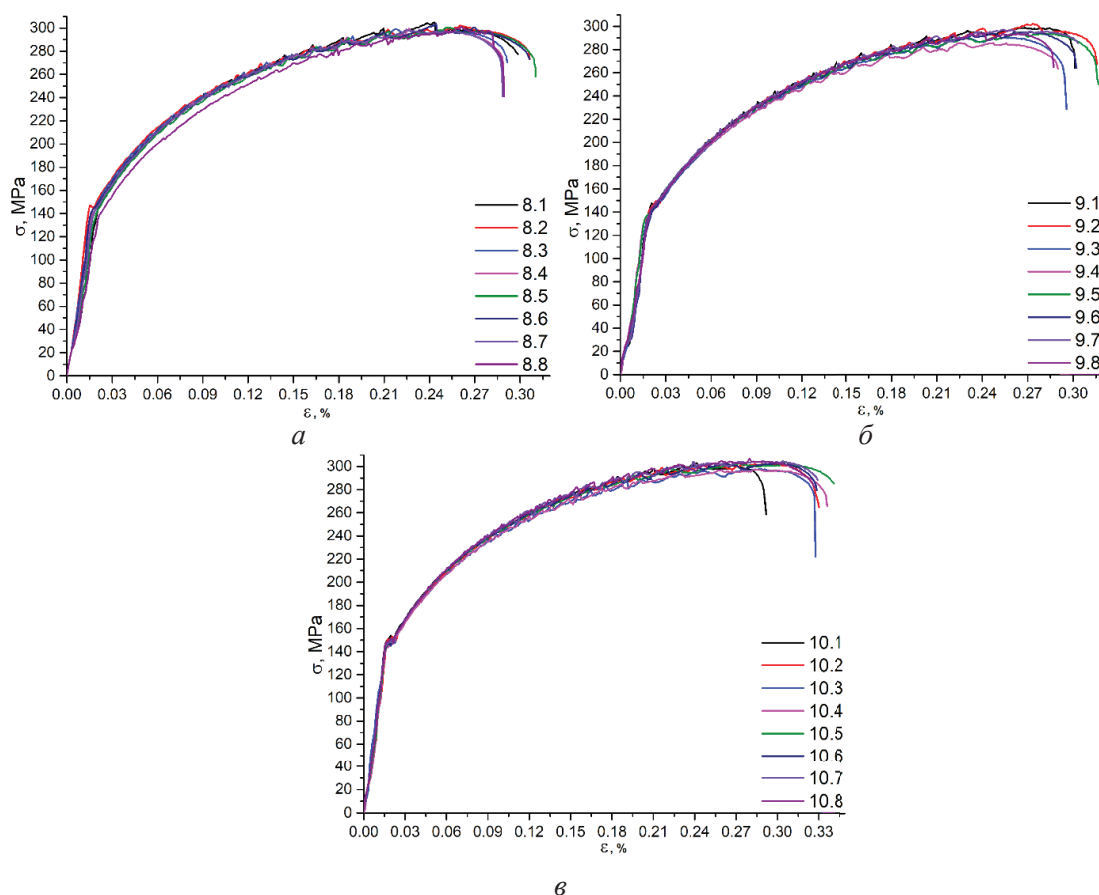


Рис. 10. Диаграммы испытаний образцов, вырезанных в вертикальном (а), поперечном (б) и продольном (в) направлении по схеме, представленной на рис. 1

Fig. 10. Test diagrams for specimens cut in vertical (а), transverse (б) and longitudinal (в) directions according to the scheme shown in Fig. 1

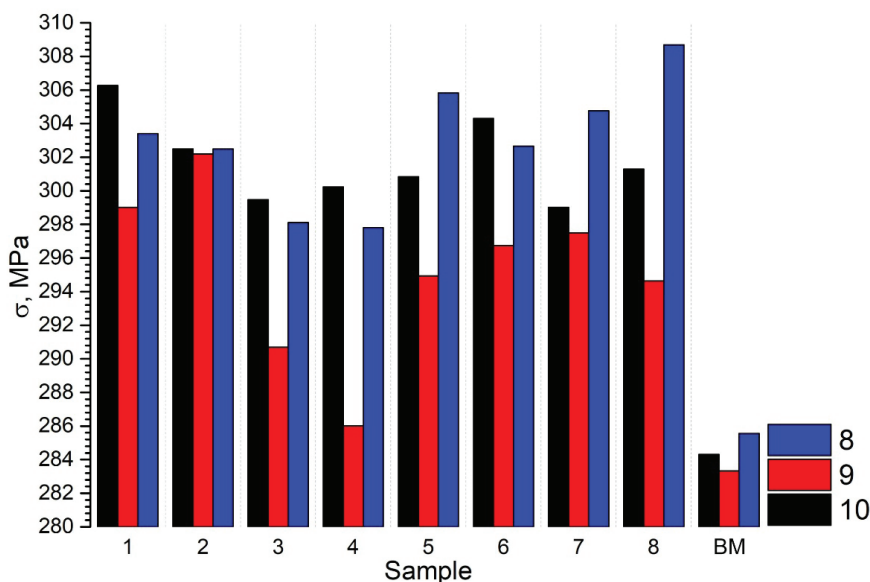


Рис. 11. Сопоставление временного сопротивления образцов, вырезанных из различных участков зоны перемешивания со свойствами основного металла

Fig. 11. Comparison of the ultimate tensile strength of test samples cut from different areas of the stir zone with the base metal one

Закключение

Проведенные исследования показывают, что несмотря на наличие неоднородностей структуры образцов, полученных путем обработки трением с перемешиванием толстолистовых заготовок толщиной 35 мм, механические свойства материала зоны обработки превышают свойства материала основного металла во всех направлениях относительно линии обработки. Неоднородности структуры материала после обработки/сварки трением с перемешиванием образцов больших толщин не оказывают определяющего влияния на свойства материала зоны перемешивания. Четкой корреляции между значениями прочностных показателей и направлением приложения усилия не выявляется, как не обнаруживается и существенного отличия механических свойств от расположения образцов внутри зоны перемешивания. Средние значения предела прочности в вертикальном, поперечном и продольном направлении составляют 302, 295 и 303 МПа, предела текучести – 155, 153 и 152 МПа, относительного удлинения после разрыва – 27,2, 27,5 и 28,7 % соответственно. Деформационное поведение образцов при испытаниях имеет схожий характер, и для каждой группы образцов можно выделить лишь небольшие от-

личия в процессе пластической деформации и разрушения. Значения микротвердости также достаточно близки и не проявляют тенденции к увеличению или уменьшению в зоне перемешивания на величину более 31 %, в то время как разброс значений микротвердости в целом по образцу составляет порядка 40 %. Полученные данные дают возможность сделать вывод о высокой степени применимости технологий сварки и обработки трением с перемешиванием для получения неразъемных соединений и упрочненных поверхностных структур заготовок из алюминиево-магниевого сплава АМг5, в том числе больших толщин.

Список литературы

1. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2005. – Vol. 50, iss. 1. – P. 1–78. – DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
2. Friction stir welding of aluminium alloys / P.L. Threadgill, A.J. Leonard, H.R. Shercliff, P.J. Withers // International Materials Reviews. – 2009. – Vol. 54, iss. 2. – P. 49–93. – DOI: 10.1179/174328009X411136.
3. Balasubramanian V. Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 480, iss. 1–2. – P. 397–403. – DOI: 10.1016/j.msea.2007.07.048.



4. Effects of Sc and Zr on mechanical property and microstructure of tungsten inert gas and friction stir welded aerospace high strength Al-Zn-Mg alloys / Y. Deng, B. Peng, G. Xu, Q. Pan, Z. Yin, R. Ye, Y. Wang, L. Lu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 639. – P. 500–513. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.05.052.

5. Optimum condition by mechanical characteristic evaluation in friction stir welding for 5083-O Al alloy / M.S. Han, S.J. Lee, J.C. Park, S.C. Ko, Y.B. Woo, S.J. Kim // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2009. – Vol. 19. – P. 17–22. – DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60238-5.

6. Miranda A.C.O., Gerlich A., Walbridge S. Aluminum friction stir welds: Review of fatigue parameter data and probabilistic fracture mechanics analysis // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2015. – Vol. 147. – P. 243–260. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.09.007.

7. Chennaiah M.B., Kumar K.R., Sridhar V. Influence of tool profiles on similar Al-5083 alloys using friction stir welding // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 46. – P. 8032–8037. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.787.

8. Sabari S.S., Malarvizhi S., Balasubramanian V. Characteristics of FSW and UWFSW joints of AA2519-T87 aluminium alloy: Effect of tool rotation speed // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 22. – P. 278–289. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.03.014.

9. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 – Optimization of process parameters using Taguchi technique / M. Koilraj, V. Sundareswaran, S. Vijayan, S.R. Koteswara Rao // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 42. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.matdes.2012.02.016.

10. Fracture behaviour of friction stir welded dissimilar aluminium alloys / N.Z. Khan, A. Maqbool, T. Ahmad, A.N. Siddiquee, Z.A. Khan // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 46. – P. 6688–6691. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.158.

11. Microstructural evolution and mechanical performance of Al-Cu-Li alloy joined by friction stir welding / A. Naumov, F. Isupov, E. Rylkov, P. Polyakov, M. Panteleev, A. Skupov, S.T. Amancio-Filho, O. Panchenko // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9, iss. 6. – P. 14454–14466. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.008.

12. Structural heredity of the aluminum alloy obtained by the additive method and modified under severe thermomechanical action on its final structure

and properties / T.A. Kalashnikova, A.V. Chumaevskii, V.E. Rubtsov, K.N. Kalashnikov, E.A. Kolubaev, A.A. Eliseev // *Russian Physics Journal*. – 2020. – Vol. 62, iss. 9. – P. 1565–1572. – DOI: 10.1007/s11182-020-01877-z.

13. Microstructural analysis of friction stir butt welded Al-Mg-Sc-Zr alloy heavy gauge sheets / T. Kalashnikova, A. Chumaevskii, K. Kalashnikov, S. Fortuna, E. Kolubaev, S. Tarasov // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 6. – P. 1–20. – DOI: 10.3390/met10060806.

14. Severe friction stir processing of an Al-Zn-Mg-Cu alloy: Misorientation and its influence on superplasticity / A. Orozco-Caballero, O.A. Ruano, E.F. Rauch, F. Carreño // *Materials and Design*. – 2018. – Vol. 137. – P. 128–139. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.008.

15. Multifractal analyses of serrated flow in friction stir processed Al-Mg-Sc alloy / J. Xie, X.P. Chen, L. Mei, P. Ren, G.J. Huang, Q. Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 786. – P. 139436. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.139436.

16. Anil Kumar K.S., Murigendrappa S.M., Kumar H. A bottom-up optimization approach for friction stir welding parameters of dissimilar AA2024-T351 and AA7075-T651 alloys // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2017. – Vol. 26, iss. 7. – P. 3347–3367. – DOI: 10.1007/s11665-017-2746-z.

17. Microstructure of in-situ friction stir processed Al-Cu transition zone / A. Zykova, A. Chumaevskii, A. Gusarova, T. Kalashnikova, S. Fortuna, N. Savchenko, E. Kolubaev, S. Tarasov // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 6. – P. 818. – DOI: 10.3390/met10060818.

18. Regularities of structural changes after friction stir processing in materials obtained by the additive method / A.V. Gusarova, A.V. Chumaevskii, K.S. Osipovich, K.N. Kalashnikov, T.A. Kalashnikova // *Nanoscience and Technology: An International Journal*. – 2020. – Vol. 11, iss. 3. – P. 195–205. – DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033694.

19. A review of friction stir processing of structural metallic materials: process, properties, and methods / A.P. Zykova, S.Yu. Tarasov, A.V. Chumaevskiy, E.A. Kolubaev // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 6. – P. 772. – DOI: 10.3390/met10060772.

20. The mechanical properties of different alloys in friction stir processing: a review / A. Chaudhary, A. Kumar Dev, A. Goel, R. Butola, M.S. Ranganath // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5, iss. 2. – P. 5553–5562. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.146.

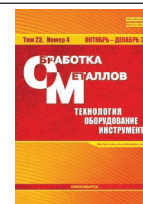
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Stir zone material flow patterns during friction stir welding of heavy gauge AA5056 workpieces and stability of its mechanical properties

Tatiana Kalashnikova^{1, 2, a, *}, Vladimir Beloborodov^{1, b}, Kseniya Osipovich^{1, c}, Andrey Vorontsov^{1, d}, Kirill Kalashnikov^{1, e}

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

² National Research Tomsk State University, 36 Lenin ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>, gelombang@ispms.tsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, vabel@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-9534-775X>, osipovich_k@ispms.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>, vav@ispms.tsc.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>, kkn@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 September 2021

Revised: 28 September 2021

Accepted: 05 October 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Friction stir welding
Friction stir processing
Structural-phase state
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 NSTU and ISPMS SB RAS at 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. Friction stir welding and processing are almost identical processes of severe plastic deformation at elevated temperatures. These technologies differ mainly in the purpose of its use: the formation of a hardened surface layer or producing a welded joint. However, it is known that both during welding and during processing of heavy gauge workpieces temperature gradients occur. As a result, the conditions of adhesive interaction, material plastic flow, and the formation of the stir zone change as compared to thin-sheet workpieces with fundamentally different heat dissipation rates. In this connection, **the purpose of the work** is to determine the regularities of the structure formation and stability of the mechanical properties in different directions in the material of 35-mm-thick aluminum-magnesium alloy samples produced by friction stir welding/processing. **Research Methodology.** The technique and modes of friction stir welding and processing of AA5056 alloy workpieces with a thickness of 35 mm are described. Data on the equipment used for mechanical tests and structural research are given. **Results and discussion.** The data obtained show the excess mechanical properties of the processing zone material over the base metal ones in all studied directions. Material structure heterogeneities after friction stir welding/processing of heavy gauge workpieces have no determining effect on the stir zone properties. At the same time, there is no clear correlation between the tensile strength values and the load application direction, nor is there any significant difference in mechanical properties depending on the location of the samples inside the stir zone. The average ultimate tensile strength values in the vertical, transverse, and longitudinal directions are 302, 295 and 303 MPa, respectively, with the yield strength values of 155, 153 and 152 MPa, and the relative elongation of 27.2, 27.5, 28.7 %.

For citation: Kalashnikova T.A., Beloborodov V.A., Osipovich K.S., Vorontsov A.V., Kalashnikov K.N. Stir zone material flow patterns during friction stir welding of heavy gauge AA5056 workpieces and stability of its mechanical properties. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 140–154. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-140-154. (In Russian).

* Corresponding author

Kalashnikova Tatiana A., Research Officer
Institute of Strength Physics and Materials Science
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
2/4, pr. Akademicheskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: 8 (382) 228-68-63, e-mail: gelombang@ispms.ru

References

1. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, vol. 50, iss. 1, pp. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
2. Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J. Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 2009, vol. 54, iss. 2, pp. 49–93. DOI: 10.1179/174328009X411136.
3. Balasubramanian V. Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 480, iss. 1–2, pp. 397–403. DOI: 10.1016/j.msea.2007.07.048.
4. Deng Y., Peng B., Xu G., Pan Q., Yin Z., Ye R., Wang Y., Lu L. Effects of Sc and Zr on mechanical property and microstructure of tungsten inert gas and friction stir welded aerospace high strength Al-Zn-Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 639, pp. 500–513. DOI: 10.1016/j.msea.2015.05.052.
5. Han M.S., Lee S.J., Park J.C., Ko S.C., Woo Y.B., Kim S.J. Optimum condition by mechanical characteristic evaluation in friction stir welding for 5083-O Al alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, vol. 19, pp. 17–22. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60238-5.
6. Miranda A.C.O., Gerlich A., Walbridge S. Aluminum friction stir welds: Review of fatigue parameter data and probabilistic fracture mechanics analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, vol. 147, pp. 243–260. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.09.007.
7. Chennaiah M.B., Kumar K.R., Sridhar V. Influence of tool profiles on similar Al-5083 alloys using friction stir welding. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, pp. 8032–8037. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.787.
8. Sabari S.S., Malarvizhi S., Balasubramanian V. Characteristics of FSW and UWFSW joints of AA2519-T87 aluminium alloy: Effect of tool rotation speed. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, vol. 22, pp. 278–289. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.03.014.
9. Koilraj M., Sundareswaran V., Vijayan S., Koteswara Rao S.R. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 – Optimization of process parameters using Taguchi technique. *Materials and Design*, 2012, vol. 42, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.02.016.
10. Khan N.Z., Maqbool A., Ahmad T., Siddiquee A.N., Khan Z.A. Fracture behaviour of friction stir welded dissimilar aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 46, pp. 6688–6691. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.158.
11. Naumov A., Isupov F., Rylkov E., Polyakov P., Panteleev M., Skupov A., Amancio-Filho S.T., Panchenko O. Microstructural evolution and mechanical performance of Al-Cu-Li alloy joined by friction stir welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, iss. 6, pp. 14454–14466. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.008.
12. Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Rubtsov V.E., Kalashnikov K.N., Kolubaev E.A., Eliseev A.A. Structural heredity of the aluminum alloy obtained by the additive method and modified under severe thermomechanical action on its final structure and properties. *Russian Physics Journal*, 2020, vol. 62, iss. 9, pp. 1565–1572. DOI: 10.1007/s11182-020-01877-z.
13. Kalashnikova T., Chumaevskii A., Kalashnikov K., Fortuna S., Kolubaev E., Tarasov S. Microstructural analysis of friction stir butt welded Al-Mg-Sc-Zr alloy heavy gauge sheets. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 6, pp. 1–20. DOI: 10.3390/met10060806.
14. Orozco-Caballero A., Ruano O.A., Rauch E.F., Carreño F. Severe friction stir processing of an Al-Zn-Mg-Cu alloy: Misorientation and its influence on superplasticity. *Materials and Design*, 2018, vol. 137, pp. 128–139. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.008.
15. Xie J., Chen X.P., Mei L., Ren P., Huang G.J., Liu Q. Multifractal analyses of serrated flow in friction stir processed Al-Mg-Sc alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 786, p. 139436. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139436.
16. Anil Kumar K.S., Murigendrappa S.M., Kumar H. A bottom-up optimization approach for friction stir welding parameters of dissimilar AA2024-T351 and AA7075-T651 alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, vol. 26, iss. 7, pp. 3347–3367. DOI: 10.1007/s11665-017-2746-z.
17. Zykova A., Chumaevskii A., Gusarova A., Kalashnikova T., Fortuna S., Savchenko N., Kolubaev E., Tarasov S. Microstructure of in-situ friction stir processed Al-Cu transition zone. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 6, p. 818. DOI: 10.3390/met10060818.
18. Gusarova A.V., Chumaevskii A.V., Osipovich K.S., Kalashnikov K.N., Kalashnikova T.A. Regularities of structural changes after friction stir processing in materials obtained by the additive method. *Nanoscience*

and Technology: An International Journal, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 195–205. DOI: 10.1615/NanoSciTechno-IntJ.2020033694.

19. Zykova A.P., Tarasov S.Yu., Chumaevskiy A.V., Kolubaev E.A. A review of friction stir processing of structural metallic materials: process, properties, and methods. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 6, p. 772. DOI: 10.3390/met10060772.

20. Chaudhary A., Kumar Dev A., Goel A., Butola R., Ranganath M.S. The mechanical properties of different alloys in friction stir processing: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 2, pp. 5553–5562. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.146.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 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/>).