



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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







К проблеме разрушения инструмента при получении неразъемных соединений толстостенных заготовок алюминиевых сплавов сваркой трением с перемешиванием





Кирилл Калашиников^{1, а, *}, Андрей Чумаевский^{1, б}, Татьяна Калашикова^{1, в},
Алексей Иванов^{1, д}, Валерий Рубцов^{1, е}, Евгений Колубаев^{1, ф}, Владимир Бакшаев^{2, г}



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

² ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», ул. Ленинградская 36, г. Чебоксары, 428021, Чувашская республика, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>,  kkn@ispms.tsc.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>,  tch7av@gmail.com,

^в  <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>,  gelombang@ispms.tsc.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0001-8959-8499>,  ivan@ispms.tsc.ru,

^е  <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>,  rvy@ispms.tsc.ru, ^ф  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>,  eak@ispms.tsc.ru,

^г  <https://orcid.org/0000-0001-9777-0164>,  bakshaeva@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.24:539.4.012.1:621.791.14

История статьи:

Поступила: 15 июня 2021
Рецензирование: 30 июня 2021
Принята к печати: 30 июля 2021
Доступно онлайн: 15 сентября 2021

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием
Сварочный инструмент
Алюминиевый сплав
Разрушение

Финансирование:

Работа выполнена в рамках 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.

Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

Для цитирования: К проблеме разрушения инструмента при получении неразъемных соединений толстостенных заготовок алюминиевых сплавов сваркой трением с перемешиванием / К.Н. Калашиников, А.В. Чумаевский, Т.А. Калашикова, А.Н. Иванов, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, В.А. Бакшаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 72–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-72-83.

*Адрес для переписки

Калашиников Кирилл Николаевич, м.н.с.

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

Тел.: 8 (382) 228-68-63, e-mail: kkn@ispms.tsc.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Среди технологий изготовления корпусов ракет и летательных аппаратов, морских судов и автомобилей в настоящее время все большее внимание уделяется технологии сварки трением с перемешиванием (СТП). В первую очередь использование данной технологии необходимо там, где требуется выполнять получение неразъемных соединений из высокопрочных алюминиевых сплавов. При этом особенное внимание необходимо уделять сварке толстостенных заготовок, так как неразъемные соединения толщиной 30,0 мм и выше являются целевыми изделиями в ракетно-космической и авиационной отраслях промышленности, но в то же время наиболее подвержены формированию дефектов ввиду неравномерного распределения тепла по высоте заготовки, что может привести к нарушению адгезионного взаимодействия свариваемого металла с инструментом и даже привести к разрушению сварочного инструмента. **Целью данной работы** являлось выявление закономерностей разрушения сварочного инструмента в зависимости от параметров процесса сварки трением с перемешиванием неразъемных соединений алюминиевого сплава АМг5 толщиной 35,0 мм. В работе были использованы следующие **методы исследований:** изготовление неразъемных соединений проводилось методом сварки трением с перемешиванием, изготовление образцов для исследований выполнялось методом электроэрозионной резки, исследование образцов выполнялось с использованием методов оптической металлографии. **Результаты и обсуждение.** В результате проведенных исследований обнаружено, что в образцах алюминиевого сплава толщиной 35,0 мм формируется неоднородная структура по высоте шва, в которой отчетливо выделяются зона влияния плеч инструмента и зона влияния пина, в которой формируются отдельные завихрения материала шва, обусловленные наличием канавок на поверхности инструмента. Показано, что зона влияния плеч наиболее подвержена формированию дефектов туннельного типа из-за низкого нагружающего усилия и высоких скоростей сварки. Выявлено, что разрушение инструмента происходит по касательной к поверхности канавок инструмента за счет высокой нагрузки инструмента и высоких скоростей сварки.

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – процесс, при котором соединение заготовок различных материалов (таких как алюминиевые и титановые сплавы, бронзы, стали и др.) происходит без образования жидкой фазы [1 – 3]. Процесс сварки осуществляется путем внедрения специального вращающегося инструмента под нагрузкой в стык двух жестко закрепленных заготовок, который, перемещаясь вдоль стыка, формирует сварное соединение. Ключевым преимуществом данного метода является то, что инструмент разогревает материал заготовок до температуры порядка 0,6...0,8 от температуры плавления, благодаря чему материал пластифицируется, фрагментируется и за счет адгезионного взаимодействия захватывается инструментом и послойно переносится, образуя сварной шов [4–6]. При этом в зависимости от свариваемого сплава инструменты могут быть изготовлены из быстрорежущих сталей [7, 8], жаропрочных никелевых сплавов [9] и других материалов, чтобы обеспечить как способность инструмента выдерживать тепловые условия процесса, так и оптимальное адгезионно-диффузионное взаимодействие для формирования зоны перемешивания. Благодаря тому что процесс происходит в твердой фазе, он нашел наибольшее применение в авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности, в частности, для сварки высокопрочных алюминиевых сплавов [10, 11]. Но в большинстве случаев для изготовления деталей авиационно-космического назначения требуется сварка толстостенных сварных заготовок с последующим фрезерованием, чтобы обеспечить максимально прочную и жесткую конструкцию. В связи с этим возникает проблема, связанная с получением качественных сварных соединений толщиной 30,0 и более миллиметров: температурное воздействие инструмента в зоне сварки неравномерно, из-за чего требуется контролировать параметры СТП, а также подбирать оптимальную форму сварочного инструмента [12]. Например, в работе [13] показано, что при сварке толстостенной заготовки размер зерна в зоне перемешивания изменяется при удалении от верхнего края сварного шва, что приводит к уменьшению микротвердости от верхнего края к нижнему. Помимо этого в работе [14] были

сделаны попытки оптимизации нагрева свариваемого материала заготовок толщиной до 25,0 мм за счет предварительного нагрева с использованием специально разработанной подложки и лазерного нагревающего устройства. Однако дополнительный нагрев оказывает влияние и на выбор параметров сварки. В результате неоптимально выбранных параметров в сварном соединении могут сформироваться дефекты, такие как пустоты, дефекты туннельного типа и стыковые линии, а также существует вероятность разрушения сварочного инструмента [15–20]. Таким образом, в настоящей работе было проведено исследование неразъемных соединений алюминиевого сплава АМг5 толщиной 35,0 мм, изготовленных методом сварки трением с перемешиванием, для выявления закономерностей формирования дефектов зоны перемешивания и разрушения сварочного инструмента в зависимости от параметров процесса СТП.

Методика исследований

Образцы для исследований были получены на специальном оборудовании для сварки трением с перемешиванием в ЗАО «Чебоксарское предприятие “Сеспель”», г. Чебоксары, Россия. Для изготовления неразъемных соединений были использованы сварочные инструменты из быстрорежущей стали с плечами диаметром 50 мм и подвижным пином длиной до 35 мм. Пин инструмента имел коническую форму с винтовыми канавками и тремя лысками под углом 120°. Сварка образцов проводилась в четырех режимах, представленных в таблице. Схема сварки трением с перемешиванием с разрушением инструмента и схема вырезки образцов для исследований показаны на рис. 1. Полученные неразъемные соединения подвергались электроэрозионной резке для получения исследовательских образцов в продольном и поперечном сечении сварного шва с использованием станка DK7750. Образцы для металлографических исследований были отшлифованы на абразивной бумаге, отполированы с использованием алмазной пасты и подвергнуты химическому травлению в реактиве Келлера для выявления микроструктуры материала.

Образцы материала с застрявшим в зоне перемешивания инструментом дополнительно

Параметры сварки трением с перемешиванием
Friction stir welding parameters

Номер образца / Sample number	Нагружающее усилие P , кг / Loading force P , kg	Скорость перемещения инструмента, V , мм/мин / Tool travel speed, V , mm/min	Скорость вращения инструмента, ω , об/мин / Tool rotation rate, ω , rpm	Угол наклона инструмента, град / Tool pitch angle, Deg
1	3700	60	300	2,5
2	3900	65	300	2,5
3	4100	60	280	2,5
4	4100	60	260	2,5

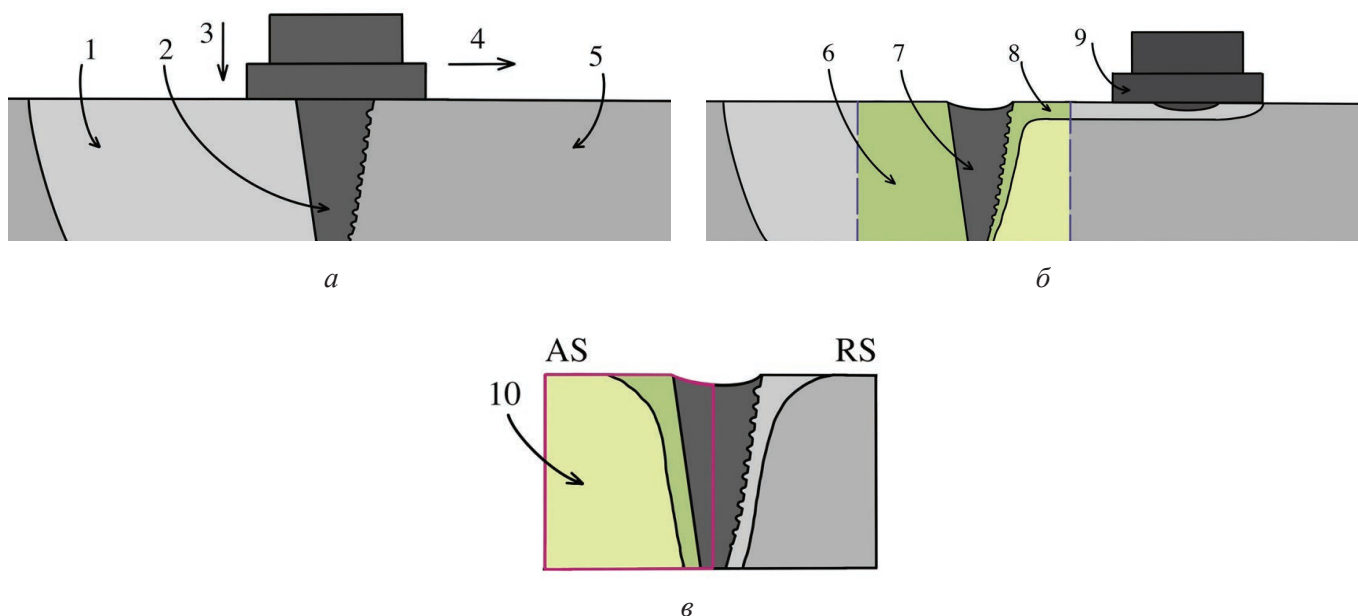


Рис. 1. Схема сварки трением с перемешиванием в продольном сечении (а), вырезки металлографических образцов после разрушения инструмента в продольном сечении (б) и поперечном сечении (в):

1 – зона перемешивания; 2 – пин инструмента; 3 – нагружающее усилие инструмента; 4 – направление перемещения инструмента; 5 – основной металл; 6 – продольный металлографический шлиф; 7 – застрявший обломок инструмента; 8 – зона перемешивания оставшейся части инструмента; 9 – оставшаяся часть инструмента; 10 – поперечный металлографический шлиф

Fig. 1. Scheme of friction stir welding in the longitudinal section (a), cutting of metallographic samples after tool destruction in the longitudinal section (b) and transverse section (c):

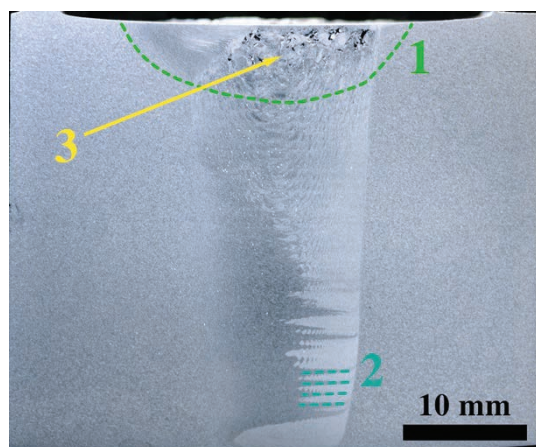
1 – stir zone; 2 – tool pin; 3 – tool loading force; 4 – direction of tool movement; 5 – base metal; 6 – longitudinal metallographic section; 7 – a stuck piece of tool; 8 – stir zone of remaining tool part; 9 – remaining tool part; 10 – transverse metallographic section

травились в водном растворе азотной кислоты HNO_3 . Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе Альтами MET 1С.

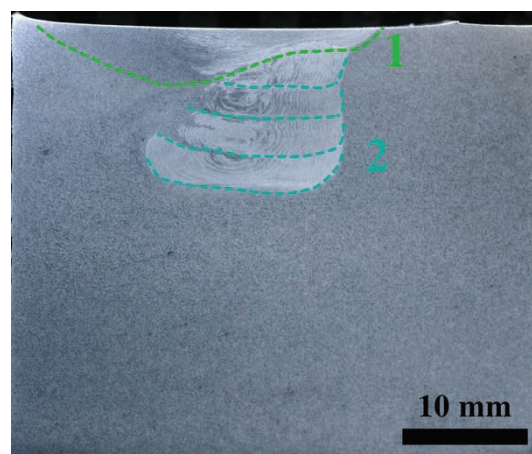
Результаты и их обсуждение

В результате методом сварки трением с перемешиванием были получены образцы сварных

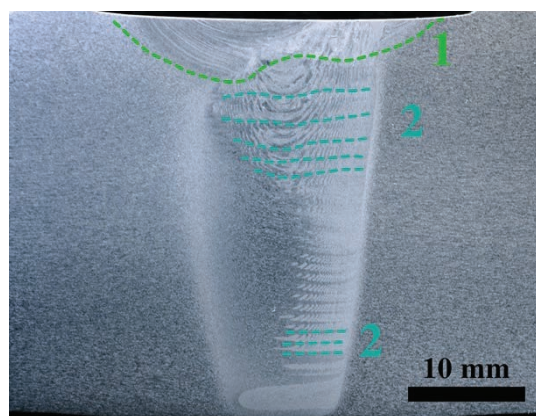
соединений с использованием четырех режимов, отличающихся нагружающим усилием и скоростями сварки (скоростью перемещения и скоростью вращения инструмента). На рис. 2 показаны панорамные изображения зоны перемешивания образцов в поперечном сечении. При сварке образцов 2 и 4 произошло разрушение инструмента, причем в образце 2 – на ранней стадии процесса. В связи с этим на рис. 2, б по-



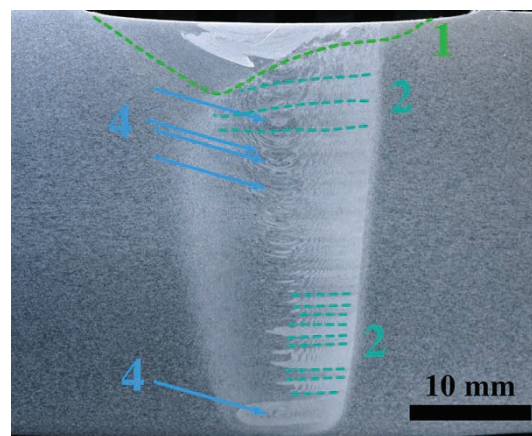
а



б



в



г

Рис. 2. Панорамные изображения зоны перемешивания сварных соединений, полученных по режимам 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) в поперечном сечении:

1 – зона влияния плеч инструмента; 2 – зоны перемешивания, образованные канавками инструмента; 3 – дефекты сварного соединения; 4 – ядра сварного соединения, сформированные локальными потоками материала

Fig. 2. Panoramic images of the stir zone of welded joints produced by modes 1 (а), 2 (б), 3 (в) and 4 (г) in cross-section:

1 – tool shoulder affected zone; 2 – stir zones formed by tool grooves; 3 – defects of the welded joint; 4 – weld cores formed by local material flows

казано поперечное сечение в зоне после поломки инструмента.

Как видно из рисунка, образец 1, полученный при высоких скоростях сварки, имеет наиболее узкую зону перемешивания, в то время как в образцах 3 и 4 зона перемешивания более широкая, с отчетливо различающимися зоной влияния плеч инструмента и концентрическими кольцами, также известными как «луковые кольца», составляющими ядро сварного соединения [21]. Стоит отметить, что в отличие от сварных соединений толщиной до 10 мм формируется не цельное ядро шва, а большое количество мелких ядер.

Такой характер формирования зоны перемешивания обусловлен неравномерностью нагрева материала шва по высоте [14], что приводит к неоднородности адгезионного взаимодействия материала со свариваемым инструментом. В результате слой переноса разбивается на более мелкие слои, в основном переносимые канавками инструмента, что отчетливо видно на рис. 2, в, г: в нижней части сварного шва выделяются полосы отдельно перенесенного материала, которые тем не менее имеют периодический характер.

Из рис. 2, а видно, что в образце 1 в зоне влияния плеч инструмента сформировалась струк-

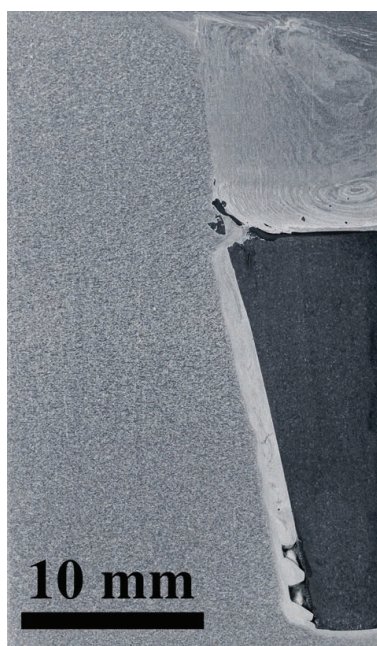
тура с дефектами туннельного типа и пустотами. Высокие скорости сварки при относительно низком нагружающем усилии привели к тому, что в верхней части образца тепловые условия формирования слоев переноса были нарушены. В свою очередь, это повлекло за собой ухудшение адгезионного взаимодействия в процессе сварки. Однако в данном случае разрушения инструмента не произошло, тогда как при сварке образца 2, полученного при более высоких нагружающем усилии и скорости перемещения, разрушение произошло на начальном этапе сварки. На рис. 3 показан обломок инструмента в образце 2 и продольное сечение зоны перемешивания, сформированной оставшейся частью инструмента.

Как видно из рис. 3, увеличение нагрузки позволило устранить дефект в зоне под плечами инструмента, но, вероятно, повысило сопротивление основного металла инструменту при перемещении в процессе сварки. Рис. 3, б, выполненный в продольном сечении образца, подтверждает влияние канавок инструмента на формирование отдельных потоков материала вокруг

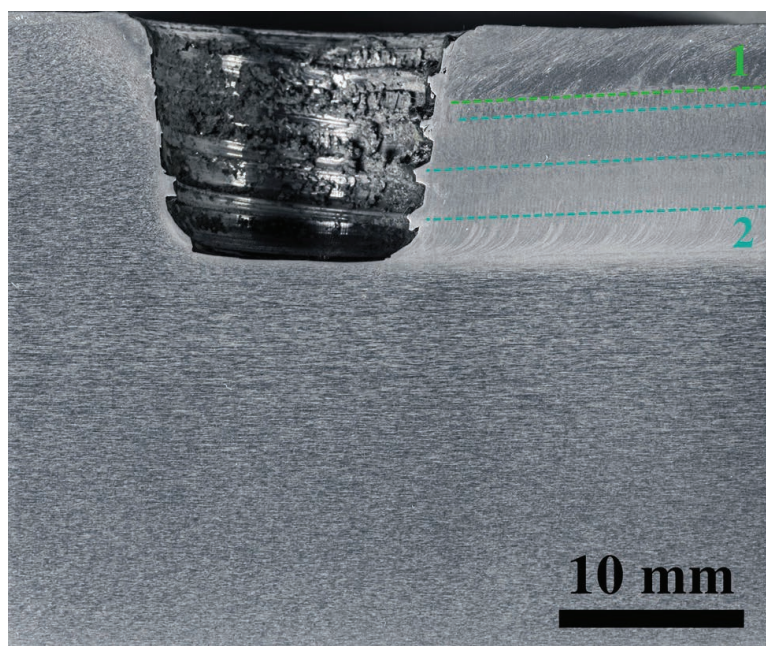
инструмента. Следовательно, локальные потоки металла воздействуют на зону канавок и создают там напряжения, касательные к их поверхности.

В образце 4, изготовленном при высоком нагружающем усилии, но более низких скоростях перемещения и вращения инструмента, наблюдается аналогичная картина. Из рис. 4 видно, что до разрушения инструмента зона перемешивания формировалась отдельными потоками материала, образованными плечами (1, рис. 4, а) и канавками инструмента, при этом высота слоев переноса уменьшается к середине сварного шва 3 и снова немного возрастает к нижней части 4. Таким образом, действие локальных потоков материала в области канавок инструмента протекает независимо от выбранного режима, но его интенсивность определяется как нагружающим усилием, так и скоростями сварки.

При этом образец 3, изготовленный при нагружающем усилии и скорости перемещения инструмента как у образца 4 (4100 кг и 60 мм/мин соответственно), но при большей скорости вращения (280 об/мин против 260 об/мин) демон-



а



б

Рис. 3. Поперечное сечение образца 2 с застрявшим обломком инструмента (а) и продольное сечение образца 2 в зоне выхода инструмента (б):

1 – зона перемешивания, сформированная плечами инструмента; 2 – зоны перемешивания, образованные канавками инструмента

Fig. 3. Cross-section of sample No. 2 with the stuck piece of tool (а) and longitudinal cross-section of sample No. 2 in the tool outlet zone (б):

1 – stir zone formed by tool shoulders; 2 – stir zones formed by tool grooves

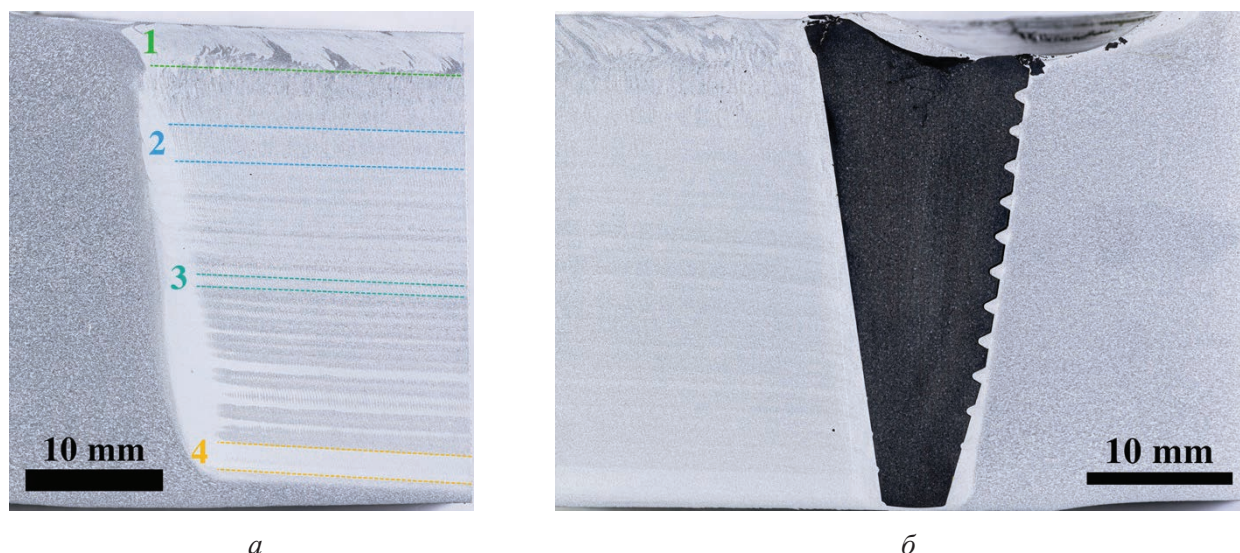


Рис. 4. Продольное сечение образца 4 с застрявшим обломком инструмента в начале (а) и конце сварного шва (б):

1 – зона перемешивания плечами инструмента; зона перемешивания, образованная канавкой инструмента; 2 – в верхней части шва; 3 – в середине шва; 4 – в нижней части шва

Fig. 4. Longitudinal cross-section of sample No. 4 with the stuck piece of tool at the beginning (a) and the end of the weld (b):

1 – stir zone formed by tool shoulders; stir zone formed by tool groove; 2 – in the upper part of the weld; 3 – in the middle of the weld; 4 – in the lower part of the weld

стрирует как отсутствие каких-либо дефектов сварного шва, так и полностью заверченный процесс сварки без разрушения сварочного инструмента.

После поломки инструмента на застрявшей части наблюдается наличие сильно деформированной зоны, представленной слоистой структурой (рис. 5, в), причем чем ближе к области контакта между застрявшей и оставшейся частью инструмента, тем расслоение материала становится более интенсивным и сопровождается формированием трещин, параллельных плоскости расслоения. При этом в области, расположенной ниже зоны расслоения, происходит распространение трещин в глубь инструмента, протяженность которых может достигать 20 мм и более (рис. 5, б, в). В результате взаимного износа при фрикционном контакте в зону перемешивания замешиваются включения осколков инструмента двух типов: включения, имеющие структуру сильно деформированной слоистой области, и включения со структурой недеформированного материала инструмента (рис. 1, а). Очевидно, что такие включения являются продуктами износа инструмента, при этом в процессе износа оставшаяся (подвижная) часть

инструмента не претерпевает значительной пластической деформации, необходимой для изменения структуры материала.

Из панорамного изображения (рис. 4, б) и увеличенного изображения (рис. 5, з) можно заметить, что неоднородность температурного воздействия оказывает значительное влияние на фрагментацию материала и формирование слоев переноса в зоне перед инструментом в процессе сварки трением с перемешиванием. Результатом такой неоднородности является изменение ширины зоны первично фрагментированного материала. Так, в верхней части инструмента ширина данной зоны минимальна и составляет всего 0,22 мм до поверхности инструмента, тогда как в нижней части инструмента ее ширина возрастает до 1,28 мм. Из рис. 4, б можно сделать вывод, что глубина канавок инструмента влияет на фрагментацию материала при сварке, так как там, где глубина канавок максимальна, ширина зоны первично фрагментированного материала минимальна. В то же время в нижней части, где наблюдается наибольшая толщина зоны фрагментации, глубина канавок минимальная.

Из рис. 4 видно, что разрушение инструмента в образце 4 произошло в верхней части, т. е. в той

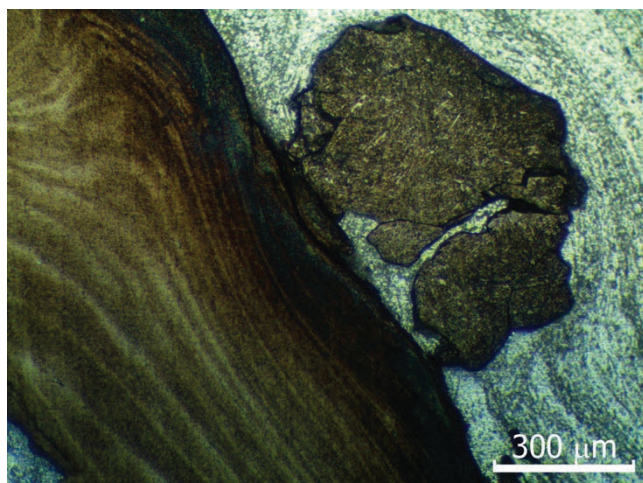
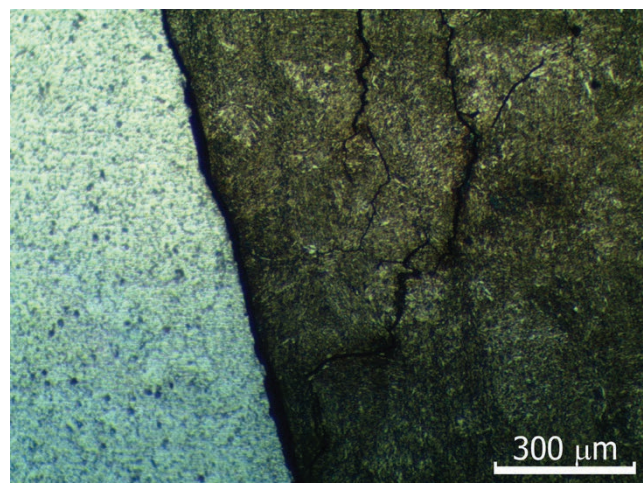
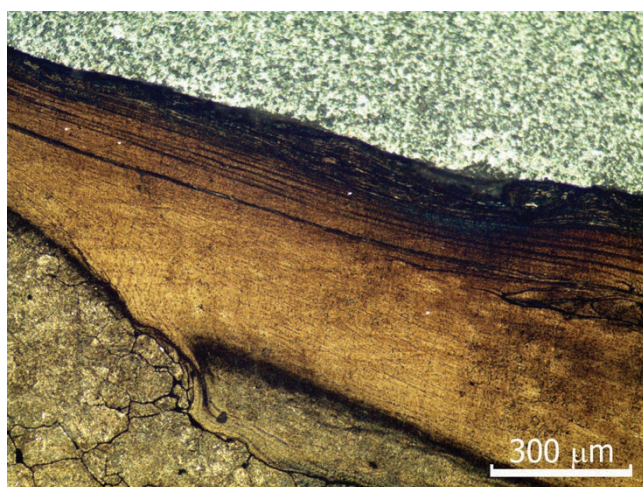
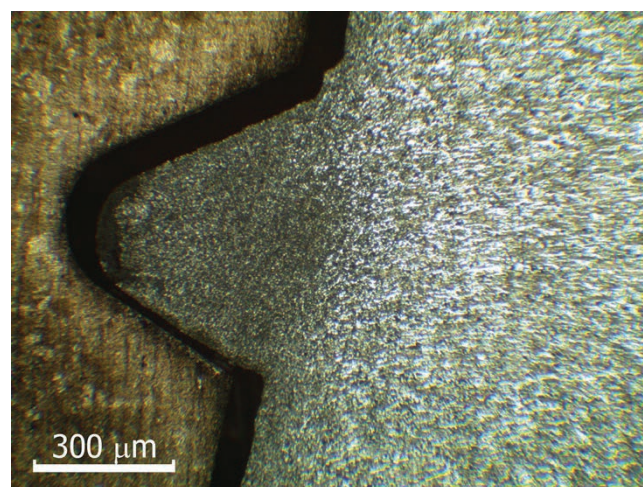

a

б

в

г

Рис. 5. Увеличенные изображения обломков инструмента в образце 2 (*а, б*) и в образце 4 (*в, г*)

Fig. 5. Magnified images of the tool fragments in the sample No. 2 (*a, б*) and in sample No. 4 (*в, г*)

зоне, где температурное воздействие инструмента на материал минимально. При этом излом инструмента имеет сферическую форму. Как было обсуждено выше, локальные потоки материала оказывают сопротивление движению инструмента в области канавок, увеличивая тем самым касательные напряжения в этих зонах [22]. Форма поверхности излома инструмента и низкая интенсивность фрагментации и пластификации материала в зоне перед инструментом привели к тому, что напряжения, действующие по касательной к поверхности канавки под плечами инструмента, достигли некоего критического значения, в результате чего началось формирование трещины, которая и привела к разрушению инструмента. Вероятно, в образце 2 процесс разрушения протекал по аналогичному сценарию. Однако в данном случае разрушение произошло

в середине сварного шва, что может быть обусловлено тем, что в данной области формируются наиболее узкие по высоте локальные потоки перенесенного материала (как показано на рис. 4, в поперечном сечении шва).

Таким образом, на устойчивость процесса сварки трением с перемешиванием и сварочного инструмента при получении неразъемных соединений толщиной 35 мм серьезное влияние оказывают как скорости сварки, так и нагружающее усилие на инструмент. При низком нагружающем усилии, но высоких скоростях сварки формируется дефектное сварное соединение с наличием дефектов туннельного типа в зоне влияния плеч инструмента в связи с ухудшением адгезионного взаимодействия свариваемого материала с инструментом. Увеличение нагрузки позволяет устранить дефект, но при высоких



скоростях сварки приводит к поломке инструмента за счет увеличения сопротивления материала движению инструмента и формирования узких локальных потоков материала, обусловленных формой инструмента. Для того чтобы стабилизировать влияние параметров, нагрузка на инструмент была увеличена, а скорости процесса снижены, что позволило получить бездефектное сварное соединение без разрушения инструмента. Однако дальнейшее снижение скорости вращения снова приводит к разрушению инструмента, в связи с тем что заданная скорость не обеспечивает требуемых тепловых условий сварки в зоне перемешивания, за счет чего в верхней части шва ширина зоны первично фрагментированного и пластифицированного материала очень мала, что также приводит к возрастанию сопротивления свариваемого материала инструменту.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований удалось подобрать оптимальный режим получения неразъемного соединения алюминиевого сплава АМг5 толщиной 35 мм методом сварки трением с перемешиванием, а также установить зависимости формирования дефектов и разрушения инструмента от параметров процесса сварки. Было обнаружено, что нагружающее усилие инструмента является определяющим фактором для формирования дефектов туннельного типа и пустот в зоне под плечами инструмента. На разрушение инструмента влияют как нагружающее усилие, так и скорости перемещения и вращения инструмента, но основным параметром в данном случае является скорость вращения. При избыточно высокой скорости вращения происходит разрушение инструмента в средней части шва, где происходит образование локальных объемов перенесенного материала канавками инструмента. При низкой скорости вращения инструмента разрушение происходит в зоне под плечами инструмента, что обусловлено неоднородным температурным воздействием в процессе сварки. При этом в обоих случаях разрушение инструмента происходит по касательной к поверхности канавки инструмента, так как углубления на поверхности инструмента испыты-

вают наибольшие касательные напряжения, вызванные повышенным сопротивлением свариваемого материала инструменту.

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. Yu P., Wu C., Shi L. Analysis and characterization of dynamic recrystallization and grain structure evolution in friction stir welding of aluminum plates // *Acta Materialia*. – 2021. – Vol. 207. – P. 116692. – DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116692.
4. Material transfer by friction stir processing / A.A. Eliseev, T.A. Kalashnikova, A.V. Filippov, E.A. Kolubaev // *Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems: In memory of Professor Sergey Psakhie* / ed. by G.-P. Ostermeyer, V.L. Popov, E.V. Shilko, O.S. Vasiljeva. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 169–188. – DOI: 10.1007/978-3-030-60124-9_8.
5. Friction stir welding of copper: numerical modeling and validation / P. Sahlot, A.K. Singh, V.J. Badheka, A. Arora // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2019. – Vol. 72, iss. 5. – P. 1339–1347. – DOI: 10.1007/s12666-019-01629-9.
6. Hwang Y.M., Fan P.L., Lin C.H. Experimental study on friction stir welding of copper metals // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 210, iss. 12. – P. 1667–1672. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019.
7. Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA 5052 – AA 6061 / V. RajKumar, M. VenkateshKannan, P. Sadeesh, N. Arivazhagan, K.D. Ramkumar // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 75. – P. 93–97. – DOI: 10.1016/j.proeng.2013.11.019.
8. Tarasov S.Y., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding (FSW) tools used on an aluminum alloy // *Wear*. – 2014. – Vol. 318, iss. 1. – P. 130–134. – DOI: 10.1016/j.wear.2014.06.014.
9. Wear of ZhS6U nickel superalloy tool in friction stir processing on commercially pure titanium / A. Amirov, A. Eliseev, E. Kolubaev, A. Filippov, V. Rubtsov // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 6. – DOI: 10.3390/met10060799.
10. Burford D., Widener C., Tweedy B. Advances in friction stir welding for aerospace applications //

6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO). – Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. – DOI: 10.2514/6.2006-7730.

11. Development of friction stir welding technologies for in-space manufacturing / W.R. Longhurst, C.D. Cox, B.T. Gibson, G.E. Cook, A.M. Strauss, I.C. Wilbur, B.E. Osborne // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 90, iss. 1. – P. 81–91. – DOI: 10.1007/s00170-016-9362-1.

12. Design and optimization of friction stir welding tool / M. Aissani, S. Gachi, F. Boubenider, Y. Benkedda // Materials and Manufacturing Processes. – 2010. – Vol. 25, iss. 11. – P. 1199–1205. – DOI: 10.1080/10426910903536733.

13. *Avettand-Fenoel M.-N., Taillard R.* Heterogeneity of the nugget microstructure in a thick 2050 Al friction-stirred weld // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 2015. – Vol. 46, iss. 1. – P. 300–314. – DOI: 10.1007/s11661-014-2638-x.

14. Friction stir welding of thick aluminium welds—challenges and perspectives / M. Imam, Y. Sun, H. Fujii, Y. Aoki, N. MA, S. Tsutsumi, H. Murakawa // Friction Stir Welding and Processing IX / ed. by Y. Hovanski, R. Mishra, Y. Sato, P. Upadhyay, D. Yan. – Cham: Springer, 2017. – P. 119–124. – DOI: 10.1007/978-3-319-52383-5_13.

15. *Das B., Pal S., Bag S.* Defect detection in friction stir welding process using signal information and fractal theory // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 144. – P. 172–178. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.05.021.

16. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 – Optimization of process pa-

rameters 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.

17. Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys / P. Kah, R. Rajan, J. Martikainen, R. Suoranta // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2015. – Vol. 10, iss. 1. – P. 26. – DOI: 10.1186/s40712-015-0053-8.

18. *Al-Moussawi M., Smith A.J.* Defects in friction stir welding of steel // Metallography, Microstructure, and Analysis. – 2018. – Vol. 7, iss. 2. – P. 194–202. – DOI: 10.1007/s13632-018-0438-1.

19. *Wang G., Zhao Y., Hao Y.* Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing // Journal of Materials Science and Technology. – 2018. – Vol. 34, iss. 1. – P. 73–91. – DOI: 10.1016/j.jmst.2017.11.041.

20. *Dialami N., Cervera M., Chiumenti M.* Defect formation and material flow in Friction Stir Welding // European Journal of Mechanics: A, Solids. – 2020. – Vol. 80. – P. 103912. – DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103912.

21. *Chen Z.W., Cui S.* On the forming mechanism of banded structures in aluminium alloy friction stir welds // Scripta Materialia. – 2008. – Vol. 58, iss. 5. – P. 417–420. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.10.026.

22. *Ávila R.E.* A variational model for shear stress in friction stir welding based on the weld shape in transverse sections // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2006. – Vol. 14, iss. 4. – P. 689–702. – DOI: 10.1088/0965-0393/14/4/011.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 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



On the problem of tool destruction when obtaining fixed joints of thick-walled aluminum alloy blanks by friction welding with mixing

*Kirill Kalashnikov^{1, a, *}, Andrey Chumaevskii^{1, b}, Tatiana Kalashnikova^{1, c}, Aleksey Ivanov^{1, d},
 Valery Rubtsov^{1, e}, Evgeny Kolubaev^{1, f}, Vladimir Bakshaev^{2, g}*

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

^a <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>, kkn@ispms.tsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, tch7av@gmail.com,
^c <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>, gelombang@ispms.tsc.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8959-8499>, ivan@ispms.tsc.ru,
^e <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.tsc.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.tsc.ru,
^g <https://orcid.org/0000-0001-9777-0164>, bakshaeva@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 June 2021

Revised: 30 June 2021

Accepted: 30 July 2021

Available online: 15 September 2021

Keywords:

Friction stir welding

Welding tool

Aluminum alloy

Destruction

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.

Acknowledgements

Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Among the technologies for manufacturing rocket and aircraft bodies, marine vessels, and vehicles, currently, more and more attention is paid to the technology of friction stir welding (FSW). First of all, the use of this technology is necessary where it is required to produce fixed joints of high-strength aluminum alloys. In this case, special attention should be paid to welding thick-walled blanks, as fixed joints with a thickness of 30.0 mm or more are the target products in the rocket-space and aviation industries. At the same time, it is most prone to the formation of defects due to uneven heat distribution throughout the height of the blank. It can lead to a violation of the adhesive interaction between the weld metal and the tool and can even lead to a destruction of the welding tool. The **purpose of this work** is to reveal regularities of welding tool destruction depending on parameters of friction stir welding process of aluminum alloy AA5056 fixed joints with a thickness of 35.0 mm. Following **research methods** were used in the work: the obtaining of fixed joints was carried out by friction welding with mixing, the production of samples for research was carried out by electric erosion cutting, the study of samples was carried out using optical metallography methods. **Results and discussion.** As a result of performed studies, it is revealed that samples of aluminum alloy with a thickness of 35.0 mm have a heterogeneous structure through the height of weld. There are the tool shoulder effect zone and the pin effect zone, in which certain whirling of weld material caused by the presence of grooves on tool surface is distinctly distinguished. It is shown that the zone of shoulders effect is the most exposed to the formation of tunnel-type defects because of low loading force and high welding speeds. It is revealed that tool destruction occurs tangentially to the surface of the tool grooves due to the high tool load and high welding speeds.

For citation: Kalashnikov K.N., Chumaevskii A.V., Kalashnikova T.A., Ivanov A.N., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Bakshaev V.A. On the problem of tool destruction when obtaining fixed joints of thick-walled aluminum alloy blanks by friction welding with mixing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 72–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-72-83. (In Russian).

* Corresponding author

Kalashnikov Kirill N., Junior 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:** kkn@ispms.tsc.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. Yu P., Wu C., Shi L. Analysis and characterization of dynamic recrystallization and grain structure evolution in friction stir welding of aluminum plates. *Acta Materialia*, 2021, vol. 207, p. 116692. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116692.
4. Eliseev A.A., Kalashnikova T.A., Filippov A.V., Kolubaev E.A. Material transfer by friction stir processing. Multiscale biomechanics and tribology of inorganic and organic systems: in memory of Professor Sergey Psakhie. Ed. by G.-P. Ostermeyer, V.L. Popov, E.V. Shilko., O.S. Vasiljeva. Cham, Springer International Publishing, 2021, pp. 169–188. DOI: 10.1007/978-3-030-60124-9_8.
5. Sahlot P., Singh A.K., Badheka V.J., Arora A. Friction stir welding of copper: numerical modeling and validation. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2019, vol. 72, iss. 5, pp. 1339–1347. DOI: 10.1007/s12666-019-01629-9.
6. Hwang Y.M., Fan P.L., Lin C.H. Experimental study on friction stir welding of copper metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, iss. 12, pp. 1667–1672. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019.
7. RajKumar V., VenkateshKannan M., Sadeesh P., Arivazhagan N., Ramkumar K.D. Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA 5052 – AA 6061. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 75, pp. 93–97. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.11.019.
8. Tarasov S.Y., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding (FSW) tools used on an aluminum alloy. *Wear*, 2014, vol. 318, iss. 1, pp. 130–134. DOI: 10.1016/j.wear.2014.06.014.
9. Amirov A., Eliseev A., Kolubaev E., Filippov A., Rubtsov V. Wear of ZhS6U nickel superalloy tool in friction stir processing on commercially pure titanium. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 6, p. 799. DOI: 10.3390/met10060799.
10. Burford D., Widener C., Tweedy B. Advances in friction stir welding for aerospace applications. *6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO)*, Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-7730.
11. Longhurst W.R., Cox C.D., Gibson B.T., Cook G.E., Strauss A.M., Wilbur I.C., Osborne B.E. Development of friction stir welding technologies for in-space manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 90, iss. 1, pp. 81–91. DOI: 10.1007/s00170-016-9362-1.
12. Aissani M., Gachi S., Boubenider F., Benkedda Y. Design and optimization of friction stir welding tool. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, vol. 25, iss. 11, pp. 1199–1205. DOI: 10.1080/10426910903536733.
13. Avettand-Fenoel M.-N., Taillard R. Heterogeneity of the nugget microstructure in a thick 2050 Al friction-stirred weld. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2015, vol. 46, iss. 1, pp. 300–314. DOI: 10.1007/s11661-014-2638-x.
14. Imam M., Sun Y., Fujii H., Aoki Y., MAN., Tsutsumi S., Murakawa H. Friction stir welding of thick aluminium welds—challenges and perspectives. *Friction Stir Welding and Processing IX*. Ed. by Y. Hovanski, R. Mishra, Y. Sato, P. Upadhyay, D. Yan. Cham, Springer, 2017, pp. 119–124. DOI: 10.1007/978-3-319-52383-5_13.
15. Das B., Pal S., Bag S. Defect detection in friction stir welding process using signal information and fractal theory. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 144, pp. 172–178. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.05.021.
16. 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.
17. Kah P., Rajan R., Martikainen J., Suoranta R. Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2015, vol. 10, iss. 1, p. 26. DOI: 10.1186/s40712-015-0053-8.
18. Al-Moussawi M., Smith A.J. Defects in friction stir welding of steel. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2018, vol. 7, iss. 2, pp. 194–202. DOI: 10.1007/s13632-018-0438-1.
19. Wang G., Zhao Y., Hao Y. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing. *Journal of Materials Science and Technology*, 2018, vol. 34, iss. 1, pp. 73–91. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.11.041.

20. Dialami N., Cervera M., Chiumenti M. Defect formation and material flow in Friction Stir Welding. *European Journal of Mechanics: A, Solids*, 2020, vol. 80, p. 103912. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103912.
21. Chen Z.W., Cui S. On the forming mechanism of banded structures in aluminium alloy friction stir welds. *Scripta Materialia*, 2008, vol. 58, iss. 5, pp. 417–420. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.10.026.
22. Ávila R.E. A variational model for shear stress in friction stir welding based on the weld shape in transverse sections. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2006, vol. 14, iss. 4, pp. 689–702. DOI: 10.1088/0965-0393/14/4/011.

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/>).