

УДК 621.658.512 (035)

**Харламов Ю. А., Денисова Н. А., Петров П. А., Орлов А. А.*

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТАДИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 2: СВАРИВАЕМОСТЬ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

В статье систематизированы состояние проблемы свариваемости легких сплавов трением с перемешиванием и перспективы ее дальнейшего развития. Рассмотрена классификация алюминиевых сплавов и оценка их свариваемости. Проблема свариваемости сплавов алюминия является наиболее изученной, как и в целом проблема получения неразъемных соединений между ними. Описаны возможности получения сваркой трением с перемешиванием соединений между алюминиевыми сплавами различных систем легирования. Показаны перспективы использования сплавов магния и дана оценка их свариваемости. Рассмотрены особенности применения и сварки титановых сплавов с оценкой их свариваемости.

Ключевые слова: *инструмент, режим сварки, система легирования, свариваемость, сварка плавлением, сварка трением с перемешиванием, технологичность сварных конструкций.*

Введение. Легкие сплавы являются основными конструкционными материалами для изделий авиационно-космической техники и транспортного машиностроения. Их развитие и усовершенствование приводит к разработке новых облегченных конструкций. С начала XX века за счет развития металлургии алюминиевых, титановых и магниевых сплавов наука и техника смогла совершить прорыв, обеспечив появление высокоэффективных изделий авиационной техники и средств наземного транспорта [1]. Алюминий, например, в настоящее время является вторым самым широко используемым металлом, и его производство прогнозируемо должно расти более быстрыми темпами, чем темпы роста всех других конструкционных металлов. Применение широко известных алюминиевых и магниевых сплавов в последнее время приобретает все большее распространение, особенно там, где имеет значение снижение веса. Большинство этих сплавов устойчиво против коррозии. Известные марки алюминиевых сплавов широко применяются в настоящее время в авиационной, судостроительной, вагоностроительной, химической и нефтяной промышленности, энергетике, автомобильном транспорте и др. Титан

и его сплавы обладают уникальным сочетанием свойств и находят множество областей применения в авиационной и химической промышленности.

Выбор сплавов для конкретной конструкции должен осуществляться с учетом условий работы как узла в целом, так и отдельных деталей, требуемого ресурса, рабочей среды и пр. Для сварных конструкций особое значение приобретает технологическая свариваемость выбираемых материалов. Однако неразъемные соединения заготовок и деталей из легких сплавов трудно получить традиционными способами сварки плавлением. Это обусловило развитие работ по сварке легких сплавов трением с перемешиванием (СТП). Анализ и отработка на технологичность сварных конструкций под сварку трением с перемешиванием затруднена из-за отсутствия доступных обобщений практического опыта в этой сфере. Результаты исследований технологии и применения СТП в России и за рубежом изложены главным образом в огромном количестве научных и технологических публикаций.

Цель данной статьи заключается в систематизации и анализе многочисленных

разработок и исследований сварки легких сплавов для обеспечения обоснованного их выбора при проектировании сварных конструкций с учетом свариваемости трением с перемешиванием.

1. Алюминиевые сплавы (АС) получают все более широкое использование вместо стали и других металлов из-за их превосходных свойств, таких как коррозионная стойкость [1], легкий вес (30 % плотности стали), хорошая обрабатываемость, высокая тепло- и электропроводность, эффективность методов производства и т. д. Алюминиевые сплавы по химическому составу подразделяют на 8 серий, характеристики которых приведены в таблице 1, составленной главным образом по данным [2] и др. При сварке АС методами плавления в сварных соединениях возникают такие дефекты, как пористость, непровар, неполное проплавление, горячие трещины и коррозия под напряжением и др.

Сплавы серии 1xxx относятся к технически чистому алюминию, хорошо поддающемуся сварке плавлением. При сварке трением с перемешиванием (СТП) технического алюминия АД0 инструментом с частотой вращения 1000 об/мин и подачей 23 мм/мин металл шва обладает большей прочностью

(92,9 МПа) по сравнению с основным металлом (80,8 МПа), разрушение образцов происходит по основному металлу [3].

Сплавы серии 2xxx относятся к системе Al–Cu. В зависимости от дополнительных легирующих элементов их можно разделить на три основные подсерии: по существу — бинарные Al–Cu, такие как AA2219, содержащие до 6 мас. % Cu; сплавы на основе системы Al–Cu–Mg, такие как AA2024, и сплавы на основе системы Al–Cu–Li, такие как AA2050, AA2198 и AA2196 [4].

Медь как легирующий элемент в сплавах Al серии 2xxx при сварке плавлением приводит к образованию горячих трещин, плохой микроструктуре затвердевания и пористости в зоне сплавления [5]. СТП позволяет получить соединения с улучшенными механическими свойствами, например, высокопрочный алюминиевый сплав AA2024-T3 обладает высокой прочностью на разрыв, усталостной прочностью, гладкой поверхностью и затрудненным распространением трещин. При этом использовали частоту вращения инструмента 360 об/мин и скорость подачи 3,3 мм/с. Варьированием параметрами СТП можно управлять неоднородностью микроструктуры швов и сопротивлением их разрушению.

Таблица 1

Классификация и свариваемость алюминиевых сплавов

Серия алюминиевых сплавов	1xxx	2xxx	3xxx	4xxx	5xxx	6xxx	7xxx	8xxx
Основной легирующий элемент	Нет (технический Al)	Cu (1,9–6,8 %)	Mn (0,3–1,5 %)	Si (3,6–13,5 %)	Mg (0,5–5,6 %)	Mg (0,4–1,5 %) + Si (0,2–1,7 %)	Zn (1,0–8,2 %)	Прочие
Термоупрочняемость	НТ	Т	НТ	НТ	НТ	Т	Т	Т/НТ
Свариваемость при сварке плавлением	С	НС	С	С	С	С	НС	С/НС
Свариваемость при сварке трением с перемешиванием	С	С	С	С	С	С	С	С

Примечание: Т — термоупрочняемые; НТ — нетермоупрочняемые; С — в основном свариваемые; НС — в основном несвариваемые.

Для сплава 1163 системы Al (3,8–4,5)–Cu (1,2–1,6)–Mg выбраны наиболее оптимальные параметры СТП [6]: частота вращения инструмента $n=400\dots600$ об/мин; скорость подачи $v=150$ мм/мин; глубина осаждения инструмента $t=0,15$ мм; конструкция инструмента — со спиральными пином и заплечиком. Прочность шва составляла 75–80 % от прочности исходного материала. При высокоскоростной сварке трением с перемешиванием их уровень находится в пределах 90...95 % прочности основного материала, а в некоторых случаях превышает прочностные характеристики основного материала свариваемой конструкции [7].

Повышение параметров режима, позволяющее вести СТП сплава Д16 (3,8...4,9% Cu, 1,2...1,8 % Mg) при температуре 450...500 °С, обеспечивает степень пластификации материала, при которой получаются сварные соединения с качественной структурой и высокими механическими свойствами [8]. В этих условиях направление сварки относительно направления прокатки исходного материала оказывает влияние: при сварке вдоль направления прокатки предел прочности соединения достигает значения 92 %, а при сварке поперек — 95 % от предела прочности исходного материала.

Оптимизация режима СТП в сочетании с приложением ультразвукового воздействия обеспечивает прочность сварных соединений на уровне 89–93 % от прочности исходного сплава Д16Т, что соответствует уровню прочностных характеристик ответственных сварных соединений в конструкциях и способствует повышению прочности сварных соединений на величину не менее 13 % [9].

При СТП сплава Д16 инструментом типа bobbin tool происходит экструзия материала из сварного соединения и его разуплотнение [10]. В результате образуются протяженные дефекты, причем в конце сварного шва независимо от режима сварки. Получение бездефектных сварных соединений

требует обязательного использования различных методов неразрушающего контроля в сочетании с адаптивным регулированием технологических параметров непосредственно в процессе СТП.

СТП позволяет получить высокое качество сварных соединений из алюминиевого сплава Al — 2 %, Cu — 2 %, Mn — 0,4 %, Si — 0,2 % Zr % (мас.), который отличается от марочных сплавов серии 2xxx более высоким содержанием дисперсоидов на основе Mn [11]. Сварной шов практически сохраняет исходную прочность основного металла ($\sigma_b=280\text{--}290$ МПа) при существенном повышении относительного удлинения δ (от 3 до 12–16 %). Повышение пластичности обусловлено формированием в зоне шва ультрамелкозернистой структуры (размер зерна менее 5 мкм), что объясняется протеканием динамической рекристаллизации в процессе СТП.

Сплавы серии 3xxx относятся к системе Al–Mn (АМц), отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью. Хорошо свариваются газовой, атомно-водородной, аргонодуговой и контактной сваркой. Сплавы серии 3xxx хорошо деформируются в холодном состоянии и в горячем в температурном интервале 320–470 °С. Термической обработкой не упрочняются. Пластическая деформация упрочняет сплавы почти в 2 раза.

Сплавы серии 4xxx относятся к системе Al–Si, являются литейными и хорошо свариваются.

Сплавы серии 5xxx относятся к системе Al–Mg. Это термически неупрочняемые сплавы, обладающие хорошими прочностными свойствами, которые получили широкое распространение благодаря высокой коррозионной стойкости и свариваемости [12]. В отожженном состоянии эти сплавы показывают низкий предел текучести, который варьируется от 90 до 160 МПа в зависимости от содержания магния. Использование сварки трением с перемешиванием (СТП), в основе которой лежат

процессы интенсивной пластической деформации (ИПД) при повышенной температуре, позволяет повысить прочностные характеристики Al-Mg сплавов. В сварном шве формируется мелкозернистая или ультрамелкозернистая структура (УМЗ), которая обеспечивает высокие механические свойства. В зависимости от режима СТП прочность шва в термически неупрочняемых сплавах может не только достигать прочности основного материала в отожженном состоянии, но и превосходить его. Применение СТП эффективно вместо сварки плавлением для изготовления из алюминиевых сплавов системы Al-Mg конструкций, работающих в условиях переменных нагрузок. Долговечность стыковых соединений листов, выполненных СТП, практически достигает уровня основного материала, тогда как для соединений, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, она почти в 2 раза ниже.

В настоящее время отмечается существенный рост интереса к применению алюминиевых деформируемых сплавов в автомобилестроении, вагоностроении, судостроении и ряде других отраслей промышленности [13]. Легирование цинком в количестве до 1 % системы Al-Mg с концентрацией магния на уровне 5,2–5,6 % позволило создать новую композицию сплава 1565ч, обладающую большей прочностью по сравнению с традиционным сплавом АМг5. Это позволяет снизить массу сварной конструкции за счет использования для изготовления деталей полуфабрикатов меньшей толщины. Сплав 1565ч обладает хорошей свариваемостью. Коэффициент прочности сварных соединений при сварке плавлением составляет 0,8–0,85, а при сварке трением с перемешиванием — 0,92–0,95. Сплав 1565ч и его сварные соединения обладают высокой коррозионной стойкостью. Термической обработки сварных соединений, в отличие от сплавов системы Al-Zn-Mg, после сварки не требуется. Сварные конструкции, изготовленные из сплава 1565ч, могут

эксплуатироваться в широком диапазоне температур, вплоть до криогенных. Получают развитие сплавы системы Al-Mg-Zn, Al-Mg-Si и Al-Mg-Sc. Использование сплава 1565ч (Al-Mg-Zn) вместо сплава АМг5 позволяет снизить массу конструкции на 8–10 % за счет большей прочности сплава в сравнении с АМг5. Коэффициент прочности сварных соединений при сварке плавлением составляет 0,8–0,85, а при СТП — 0,92–0,95. Сплав 1565ч и сварные соединения обладают высокой коррозионной стойкостью. Термообработки сварных соединений, в отличие от сплавов Al-Zn-Mg, после сварки не требуется.

Выбор сплавов системы Al-Mg-Sc дает возможность обеспечения достаточно высокого уровня прочностных свойств без применения трудно реализуемой на практике упрочняющей термической обработки (заковки и старения) крупногабаритных деталей [14]. Сплавы системы Al-Mg-Sc обладают высокими показателями свариваемости при сварке плавлением, как с применением присадочной проволоки, так и без нее. Сварка трением с перемешиванием является перспективной технологией получения герметичных неразъемных соединений из листов и толстостенных плит сплава 1570С, прочность сварного шва может достигать уровня 95–100 % прочности основного металла. Удорожание полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, легированных скандием, по сравнению со стоимостью полуфабрикатов, не содержащих его, составляет 60–80 %. Такое удорожание компенсируется увеличением запаса прочности и существенным снижением веса конструкций.

При устранении дефектов швов повторные проходы СТП не оказывают существенного влияния на структуру и свойства сварных соединений листов из сплава 1565чМ [15]. Возможно использование двух- и трехкратных повторных проходов для подварки дефектных участков в виде протяженных несплавлений и несплавлений в корневой части шва. Если суммарная длина дефектных участков превышает 25–30 % от общей длины шва,

то, как правило, осуществляют повторную переварку сварного шва на полную длину. Для выполнения подварки на всю длину шва для гарантированного устранения дефектов рекомендуется использовать инструмент, аналогичный по профилю рабочему инструменту, но с увеличенными размерами бурта и стержня примерно на 20–25 %. Допускается исправление непротяженных дефектов соединений СТП свариваемых алюминиевых сплавов типа 1565чМ ручной аргонодуговой сваркой.

Сварные соединения сплавов типа 1565чМ, выполненные сваркой трением, по сопротивлению усталости, ударной вязкости и твердости сварного шва имеют преимущество по сравнению с аргонодуговой и плазменной сваркой [16].

Сплавы серии 6xxx относятся к системе Al–Mg–Si. Различают два типа сплавов серии 6xxx [4]: сплавы с низким содержанием меди и сплавы с высоким содержанием меди. Сплавы с избытком Si также могут образовывать фазу чистого Si. Помимо основных легирующих элементов (Mg и Si), обеспечивающих твердорастворное и дисперсионное упрочнение, сплавы 6xxx серии дополнительно легируют медью (с целью дальнейшего повышения механических свойств), хромом (с целью компенсации неблагоприятного воздействия меди на коррозионные свойства), а также марганцем, который совместно с хромом препятствует сегрегации кремния по границам зёрен [17]. Требуемые температурные условия в ходе СТП могут быть реализованы при использовании комбинации высокой частоты вращения инструмента и высокой скорости сварки, что в совокупности со стандартной процедурой послесварочного старения может обеспечить получение высокопрочных сварных соединений.

Сплавы серии 7xxx относятся к системе Al–Zn–Mg и являются одними из самых прочных алюминиевых сплавов [18]. Механизмы образования соединения между заготовками из сплава AA7075 и заготовками из малоуглеродистых сталей аналогичны

по причине сходства их прочностных свойств. При СТП стыковых соединений пластин сплава AA7050 толщиной 5,5 мм с частотой вращения инструмента 800 об/мин и подачей 100 мм/мин в трех средах (горячая или холодная вода, воздух) более высокими механическими свойствами обладали соединения, полученные в среде горячей воды. Соотношение относительного удлинения этих соединений и основного материала достигало 150 %, а предела прочности — 92 %. При СТП сплава AA7075-T6 толщиной 12 мм (350 об/мин; 60 мм/мин) стойкость к точечной коррозии сварного соединения выше, чем у основного металла.

Алюминиево-литиевые сплавы являются новыми материалами благодаря их высокому соотношению прочности и веса, отличной усталости и высокой вязкости [5, 18]. Наиболее распространенными типами сплавов Al–Li являются Al–Cu–Li и Al–Mg–Li. Сплавы Al–Cu–Li имеют более высокую прочность по сравнению с Al сплавами серии 7xxx и поэтому предназначены для использования в высокопрочных технических приложениях. Сплавы Al–Mg–Li чрезвычайно легки (плотность равна 2,54 г/см³) и обладают умеренной прочностью, эквивалентной сплавам Al 2xxx (кроме сплавов Al–Cu–Li) и сплавам Mg–Li. Сплав AA1424 (Al–Mg–Li–Zr) представляет собой термообработываемый сплав, разработанный на основе сплавов 1420 и 1421. Сварка плавлением сплавов Al–Li приводит к обычным дефектам, таким как горячие трещины, поры, потеря элементов и размягчение соединений, что приводит к низкой прочности соединения и ограничивает дальнейшее применение сплавов Al–Li. Устранение таких дефектов достигается применением СТП [5, 18]. Для различных сплавов толщиной от 2 до 5 мм в процессе СТП с различной формой инструмента при частоте вращения от 200 до 1200 об/мин и подаче от 42 до 550 мм/мин достигалась прочность сварного соединения 64–80 % от прочности основного металла [5, 18, 19].

Литейные алюминиевые сплавы удовлетворительно свариваются методами сварки плавлением. Перспективным является сплав ВАЛ10, относящийся к системе Al–Cu–Mn и отличающийся по химическому составу от сплава АЛ19 несколько меньшим содержанием меди и марганца, наличием добавки кадмия и большей чистотой по примесям кремния и железа [20]. Использование присадочной проволоки Св1203 при ручной аргонодуговой сварке сплава ВАЛ10 обеспечивает удовлетворительное формирование соединений и достаточно высокий уровень механических свойств. Сварка трением с перемешиванием обеспечивает увеличение коэффициента прочности соединений литейного алюминиевого сплава ВАЛ10 до 0,75, что существенно выше, чем при ручной аргонодуговой сварке (0,45). При СТП использовали инструмент из стали Р18 с пином диаметром 5 мм и длиной 6 мм с винтовой канавкой глубиной 0,4 мм. Диаметр заплечика — 18 мм. Перед сваркой фрезерованием полностью удаляли с поверхности заготовок литейную корку. Частота вращения инструмента 650–800 об/мин. Скорость сварки 220–240 мм/мин. Осевое усилие прижатия инструмента 28000 Н. Сварка с двух сторон. Для повышения прочностных свойств сварных соединений сплава ВАЛ10 рекомендуется последующая термическая обработка сварных соединений после сварки: закалка с температурой 535 °С, выдержка 4 часа и последующее искусственное старение при 160 °С с выдержкой 24 часа.

Композиционные, гранулированные и квазикристаллические алюминиевые сплавы также находят применение при изготовлении эффективных сварных конструкций [21]. Процесс СТП позволяет получать качественные неразъемные соединения этих сплавов без изменения их фазово-структурного состояния. При этом гранулы, содержащие пересыщенный твердый раствор тугоплавких переходных металлов, равномерно распределяются по всему объему матрицы в металле шва, что

обеспечивает предел прочности таких соединений на уровне 70...80 % этого показателя для основного материала. В металле шва, полученного при сварке алюминиевого сплава, упрочненного квазикристаллическими частицами, интерметаллиды не образуются, а квазикристаллы, размер которых, как и в основном материале, сохраняется в пределах 100...200 нм, равномерно распределяются между зернами α -Al матрицы, обеспечивая высокие показатели прочности и пластичности швов. При сварке композиционных материалов диссоциации армирующих частиц не происходит, а их дисперсность и равномерность распределения в металле шва сохраняются на уровне основного материала.

Разноименные алюминиевые сплавы также хорошо подвергаются сварке методами СТП [4, 5]. При хорошем перемешивании можно получить широкий спектр микроструктур зоны перемешивания, тогда как при недостаточном перемешивании наблюдаются более асимметричные области сварного шва. Интересной микроструктурной характеристикой соединений разнородных алюминиевых сплавов является образование более мелких зерен на границе раздела двух материалов в зоне перемешивания. Сварка трением с перемешиванием превосходит сварку плавлением по прочности, пластичности, усталостной прочности и вязкости разрушения. В работе [5] изучено влияние изменения скорости перемещения СТП от 50 до 200 мм/мин при постоянной скорости вращения 300 об/мин на механические свойства и микроструктуру однородных и разнородных стыковых соединений АА7075-T6 и АА5083-H111. Примененные параметры СТП позволили получить бездефектные соединения. Заметное измельчение зерна достигнуто в зонах перемешивания (ЗП) всех одинаковых и разнородных швов. Профиль твердости аналогичных сварных швов АА7075 показал типичное поведение для стареющих алюминиевых сплавов с потерей твердости в ЗП, а в случае аналогичных сварных швов

AA5083 — типичное поведение для нагартованных алюминиевых сплавов с выявленным увеличением твердости ЗП. Напротив, в разнородных сварных швах наблюдался плавный переход профиля твердости между двумя значениями твердости сплавов AA7075 и AA5083. Кроме того, разнородные соединения показали, что прочность находится в диапазоне от 245 до 267 МПа при эффективности сварного соединения от 77 до 87 % от прочности AA5083 ВМ.

В работе [22] проведен сравнительный анализ степени разупрочнения и уровня прочности сварных соединений разноименных высокопрочных сложнолегированных алюминиевых сплавов АМг6М, 1420, 1201, 1460 толщиной 1,8 мм, полученных сваркой трением с перемешиванием, а также аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом. Показано, что деформационное упрочнение швов высокопрочных сложнолегированных алюминиевых сплавов при сварке трением с перемешиванием обеспечивает более высокий уровень их прочности, чем при сварке плавлением. Высокопрочные алюминиевые сплавы АМг6 (Al–Mg–Mn) и 1201 (Al–Cu–Mn), а также литийсодержащие сплавы 1420 (Al–Mg–Li) и 1460 (Al–Cu–Li) имеют повышенную удельную прочность. Измельчение зерен, увеличение объемной доли их границ и дробление интерметаллидных фаз в металле швов, выполненных способом СТП на разноименных алюминиевых сплавах, позволяют получить более высокие значения временного сопротивления сварных соединений, чем при сварке плавлением.

В работе [23] проведена оценка свариваемости и свойств сварных соединений листов сплава 1565ч со сплавами АМг5, АМг6, АВ (Al–Mg–Si) и 7021 (Al–Zn–Mg). Сплавы АМг5, АМг6, АВТ1 и 7021Т6 обладают хорошей свариваемостью со сплавом 1565чМ в условиях СТП. Разрушение сварных соединений, выполненных аргонодуговой сваркой и СТП 1565чМ + АМг5М, 1565чМ + АМг6М, 1565чМ + АВТ1, происходит по зоне термического влияния со

стороны сплавов АМг5, АМг6 и АВ, а сварного соединения 1565чМ + 7021Т6 — со стороны сплава 1565чМ после естественного старения. Ядро соединения, сформировавшееся в результате совместной пластической деформации разнородных сплавов 7021Т6 и 1565чМ в процессе сварки трением с перемешиванием, включает в себя по два участка из этих сплавов с четко выраженной границей между ними без внутренних дефектов. Участки имеют форму, вытянутую в направлении вращения инструмента и, соответственно, S-образную границу между сплавами. Установлено существенное ускорение диффузионных процессов на границе между соединяемыми сплавами в процессе СТП. В ядре соединения из сплавов 7021Т6 и 1565чМ формируется рекристаллизованная структура с равноосными зернами размером 2...4 мкм. Такая структура формируется независимо от исходной зеренной структуры, химического и фазового составов соединяемых сплавов. Ее формирование вызвано протекающими одновременно процессами динамической рекристаллизации. Для всех сочетаний исследуемых сплавов прочностные и пластические характеристики соединений, выполненных СТП, превосходили значения аналогичных свойств соединений, полученных автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом. Максимальное разупрочнение металла для термически упрочняемых алюминиевых сплавов при сварке трением с перемешиванием наблюдается в зоне термического влияния на участке нагрева до температуры 230...260 °С.

В работе [24] проведена оценка принципиальной возможности повторения описанных в других публикациях случаев сварки заготовок из медных сплавов, содержащая необходимый набор сведений о параметрах процесса и режимах сварки деталей.

В ходе эксперимента использовались пластины из алюминиевого сплава А7Е с толщиной 6 мм, которые были размещены на подложке из стали. Заготовки были

установлены и закреплены на станке с помощью специальных зажимов. Было проведено три эксперимента с различными параметрами сварки, включая глубину погружения (0,5...0,6 мм) и длину хвостовика (130 и 78 мм) используемого инструмента.

Сплав А7Е, относящийся к алюминиевым сплавам АК7 с высоким содержанием кремния, демонстрирует динамическую рекристаллизацию в сварном шве. При быстром охлаждении, периферийные области сварного шва на поперечном шлифе испытывают неполную или несостоявшуюся рекристаллизацию, сохраняя вытянутые зерна при уменьшении их размера. Условный диаметр рекристаллизованных зерен колеблется в пределах 40–60 мкм в зависимости от области сварного стыка при размере исходного зерна образца 200 мкм.

2. Магниевые сплавы с повышенными характеристиками прочности и жаропрочности являются перспективными наиболее легкими конструкционными материалами, обладающими, по сравнению с другими металлическими конструкционными материалами, рядом преимуществ: малой плотностью, высокими удельной прочностью и удельной жесткостью, хорошими демпфирующими характеристиками, сопротивлением усталости и технологичностью [24, 25].

Из легких металлов алюминий в 1,5 раза и титан в 2,5 раза тяжелее магния, сталь тяжелее последнего в 4 раза. Этим объясняется повышенный интерес к применению сплавов магния в различных отраслях промышленности как у нас в стране, так и за рубежом [26]. Магниевые сплавы марок МА2-1, МА12, ИМВ2, ИМВ2-1, а также сплавы систем легирования Mg–Zn–Zr–Ce и Mg–Nd–Zr могут успешно свариваться дугowymi способами. Коэффициент прочности соединений для большинства из них находится в пределах 0,9...1,0 основного металла. Другие прочностные показатели соединений также находятся на уровне свойств основного металла при высокой плотности металла шва. Основной проблемой при сварке магневых сплавов

является предупреждение образования горячих трещин в сварных соединениях. Прочностные характеристики сварных соединений высокопрочных магниевых сплавов находятся на уровне не ниже 95 % аналогичных свойств основного металла.

Однако из-за неблагоприятных свойств, как, например, образование крупных зерен, хрупких интерметаллидов, трещин, пустот и оксидных слоев, которые проявляют магниевые сплавы при сварке плавлением, СТП является одним из лучших способов сварки этих сплавов. В [27] обобщены результаты исследования СТП магниевых сплавов AZ61A (5,8...7,2 % Al, 0,4...1,5 % Zn); AZ31A (3 % Al, 1 % Zn); AZ91 (99,0–99,5 % Mg). Хорошие результаты получены при различных условиях СТП: форма, размеры, материал инструмента; частота вращения и скорость сварки; осевое усилие. Инструменты изготавливали из различных сталей — быстрорежущей, инструментальной, нержавеющей; форма пина — цилиндрический, конический, резьбовой, комбинированный и др. с диаметром 3,175, 4,85 и 6 мм; плоский заплечик диаметром 15–21, 18, 12, 9,5 мм; частота вращения, об/мин — 700–1000, 900–1800, 1800, 2000; подача — 30–50, 40, 50 мм/мин и 5–35 мм/с; осевое усилие — 5, 3–5 кН.

3. Титановые сплавы. Высокая удельная прочность при повышенных температурах, повышенная вязкость разрушения и коррозионная стойкость обеспечивают широкое применение титана и его сплавов в аэрокосмической промышленности [28]. Их подразделяют на четыре категории: а) нелегированный или чистый Ti, б) сплавы α -Ti и близкие к α -Ti, в) сплавы $\alpha+\beta$ и г) сплавы β -Ti. Температура перехода β соответствует температуре, выше которой существует только β -фаза.

Для сварки изделий из титановых сплавов, как правило, применяется сварка плавлением, сопровождающаяся рядом проблем, связанных с физико-технологическими свойствами титана. Низкая теплопроводность, чувствительность к

термическому циклу, высокая химическая активность титана и его сплавов значительно усложняют технологию сварки, что негативно сказывается на себестоимости и трудоемкости сварочных операций, а также ограничивают применение титановых сплавов в промышленности [29].

Обобщению большинства современных публикаций по СТП титановых сплавов, оценке влияния режимов сварки геометрии инструмента на свойства и структуру сварных соединений посвящена работа [29].

При сварке сплавов Ti–6Al–4V толщиной 3 мм на следующих режимах СТП: частота вращения инструмента — 500 об/мин; скорость сварки от 40 мм/мин до 200 мм/мин; угол наклона инструмента $1,5^\circ$ достигалась прочность соединения 1040 МПа при 40 мм/мин и 716 МПа при 200 мм/мин. Отсутствие проплавления и дефекты наблюдались при скорости сварки 200 мм/мин вследствие недостаточного тепловыделения. При более низкой скорости дефекты отсутствовали. При сварке листов толщиной 2 мм применялся защитный газ (аргон) с расходом 20 л/мин. В качестве материала пина использовался сплав W–Re25 %, а в качестве материала заплечика — сплав на основе никеля GH4043. Частота вращения инструмента варьировалась в диапазоне 700...11200 об/мин, а скорость сварки — 20 и 30 мм/мин.

При СТП титанового сплава TC4 толщиной 2 мм инструментом с пином из материала W–Re в среде аргона в направлении, перпендикулярном прокатке листа, при скорости вращения инструмента 400 об/мин и скорости сварки 50 мм/мин соотношение прочности на растяжение соединения и основного металла составляет 0,92. Соединение разрушается по сварному шву, и поверхность излома имеет типичные характеристики пластического разрушения, при

этом ЗТВ имеет более низкую твердость, чем основной металл.

В большинстве исследований по СТП титановых сплавов для оценки влияния режимов сварки на свойства и структуру сварных соединений прочность соединений достигала от 80 до 93 % прочности основного металла, при этом в некоторых случаях разрушение образцов при испытании на растяжение происходило по зоне термического влияния и по основному металлу. Структура сварного шва отличалась от структуры основного металла. Зона термического влияния имела более низкую твердость, чем основной металл, в то время как сварной шов является самой слабой частью соединения. Также для предотвращения окисления сварка выполнялась в среде аргона. Формирование бездефектных соединений возможно в широком диапазоне параметров режимов сварки, что затрудняет выбор конкретных режимов СТП для заготовок определенной толщины.

Выводы:

1. Сварка трением с перемешиванием является инновационной технологией получения неразъемных соединений в твердом состоянии с высокими значениями прочности и других эксплуатационных показателей сварных конструкций.

2. Более широкому применению сварки трением с перемешиванием в производстве сварных конструкций из легких сплавов способствует их относительно невысокая температура плавления, упрощающая создание рабочих инструментов с высокой стойкостью.

3. Необходимо развивать и стандартизировать методы испытаний конструкционных материалов и, прежде всего, легких сплавов для оценки их свариваемости трением с перемешиванием.

Список источников

1. Антипов В. В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 157–167.

2. Rudrapati Ramesh. Recent advances in joining of aluminum alloys by using friction stir welding // *Mass production processes / edited by Anil Akdogan and Ali Serdar Vanli. IntechOpen, 2020. 13 p. DOI: 10.5772/intechopen.89382*

3. Терентьев С. А., Арзыев Т. Р. Сварка трением с перемешиванием деталей из технического алюминия // *Вестник ПНИПУ. 2012. С. 46–49.*

4. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution / A. Heidarzadeh [et al.] // *Progress in materials science. 2021. Vol. 117 (100752). 68 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100752*

5. Friction stir welding of aluminum in the aerospace industry: The current progress and state-of-the-art review / M. M. Z. Ahmed, M. M. El-Sayed Seleman, D. Fydrych, G. Çam // *Materials. 2023. № 16 (2971). 33 p. DOI: 10.3390/ma16082971*

6. Курицын Д. Н. Разработка технологического обеспечения сварки трением с перемешиванием в производстве аэрокосмических конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 177 с.

7. Бойцов А. Г., Качко В. В., Курицын Д. Н. Высокоскоростная сварка трением перемешиванием авиационных материалов и конструкций // *Металлообработка. 2013. № 5–6 (77–78). С. 35–42.*

8. Влияние режима сварки трением с перемешиванием и ее направления относительно направления прокатки сплава Д16 на структуру и свойства его сварных соединений / А. Н. Иванов [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 4. С. 110–123. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-110-123*

9. Иванов А. Н. Разработка способа и оборудования сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием для получения прочных сварных соединений из алюминиевого сплава Д16 : дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2019. 188 с.

10. Особенности процессов структурообразования в соединениях сплава Д16, полученных сваркой трением с перемешиванием с инструментом типа bobbin tool / А. Н. Иванов [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23. № 2. С. 98–115. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-98-115*

11. Структура и механические свойства горячекатаных листов из сплава Al — 2 %, Cu — 2 %, Mn — 0,4 %, Si — 0,2 %, Zr, подвергнутых сварке трением с перемешиванием / Н. А. Белов, К. А. Цыденов, Н. В. Лятегин, С. О. Черкасов // *Цветные металлы. 2022. № 5. DOI: 10.17580/tsm.2022.05.09*

12. Овчинников В. В., Дриц А. М. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием соединений алюминиевых сплавов системы Al–Mg // *Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 3. С. 7–20.*

13. Овчинников В. В. Перспективы развития высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов для сварных конструкций. Часть 1 // *Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 2. С. 24–38.*

14. Овчинников В. В. Перспективы развития высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов для сварных конструкций. Часть 3 // *Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 4. С. 44–60.*

15. Дриц А. М., Овчинников В. В., Резцов Р. Б. Дефекты, возникающие при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов системы Al–Mg, и способы их устранения // *Технология легких сплавов. 2022. № 4. С. 14–25.*

16. Конюхов А. Д., Дриц А. М., Шуртаков А. К. Свойства сплава 1565чМ и его сварных соединений // *Технология легких сплавов. 2013. № 3. С. 113–120.*

17. Polmear I. J. *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals. Light alloys. 4th ed. Oxford ; Burlington, MA : Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006. 421 p.*

18. Оптимизация механических характеристик сварных соединений, выполненных СТП, с использованием современных вычислительных систем / М. М. Бакрадзе [и др.] // *Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). С. 11–20.*

19. Пантелеев М. Д. Особенности формирования структуры сварных соединений при сварке трением с перемешиванием высокопрочных алюминий-литиевых сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 23 с.

20. Свойства сварных соединений литейного алюминиевого сплава ВАЛ10, полученных сваркой плавлением и трением с перемешиванием / Л. П. Андреева, В. В. Овчинников, В. К. Кабанцев, С. Д. Каптухина // *Современные материалы, техника и технологии*. 2019. № 1 (22). С. 76–85.
21. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Федорчук В. Е. Сварка трением с перемешиванием композиционных, гранулированных и квазикристаллических алюминиевых сплавов // *Автоматическая сварка*. 2011. № 7. С. 3–8.
22. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов различных систем легирования / А. Г. Покляцкий, А. А. Чайка, И. Н. Клочков, М. Р. Яворская // *Автом. сварка*. 2010. № 10 (690). С. 18–23.
23. Дриц А. М., Овчинников В. В. Свойства соединений листов алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 10. С. 7–15.
24. Волкова Е. Ф. Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния (обзор) // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 11. С. 5–9.
25. Мостяев И. В., Акинина М. В. Особенности и тенденции развития в области термической обработки магниевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 7 (67). С. 41–48.
26. Бондарев А. А., Нестеренков В. М. Технологические особенности сварки деформируемых магниевых сплавов электронным лучом в вакууме // *Автоматическая сварка*. 2014. № 3. С. 18–22.
27. Friction stir welding/processing of mg-based alloys: A critical review on advancements and challenges / F. Badkoobeh [et al.] // *Materials*. 2021. № 14 (6726) 35 p. DOI: 10.3390/ma14216726
28. A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: challenges and trends / D. A. P. Prabhakar [et al.] // *Journal of materials research and technology*. 2022. № 20. P. 3025–3060.
29. Селиванов А. С., Бачаев Д. А. Влияние режимов сварки трением с перемешиванием и параметров инструмента на механические и структурные свойства сварных соединений титановых сплавов // *Инновационное и цифровое машиностроение : материалы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства России»*. Уфа : УГАТУ, 2021. С. 351–357. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=udrytm>.

© Харламов Ю. А., Денисова Н. А., Петров П. А., Орлов А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Вишневым Д. А., д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ им. проф. В. Я. Седуша ДонНТУ Еронько С. П.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

Денисова Наталья Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия e-mail: pavelpetrov@list.ru

Орлов Андрей Андреевич, ассистент каф. машин металлургического комплекса
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru

***Kharlamov Yu. A., Denisova N. A., Petrov P. A., Orlov A. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com)

ENSURING THE MACHINABILITY OF STRUCTURES DURING FRICTION STIR WELDING AT THE MATERIAL SELECTION STAGE. PART 2: WELDABILITY OF LIGHT ALLOYS

The article systematizes the problem state of weldability of light alloys by friction stir welding and prospects for its further development. Classification of aluminum alloys and assessment of their weldability are studied. Weldability of aluminium alloys is one of the most studied problems, as is the general problem of getting fixed joints between them. The article describes possibilities of obtaining the joints between aluminum alloys of different alloying systems by friction stir welding. Prospects of using magnesium alloys are shown and their weldability is estimated. Features of application and welding of titanium alloys with evaluation of their weldability are considered.

Key words: tool, welding condition, alloying system, weldability, fusion welding, friction stir welding, machinability of welded structures.

References

1. Antipov V. V. Development strategy for titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys [Strategiya razvitiya titanovykh, magnievykh, berillievyyh i alyuminiyevyyh splavov]. *Aviation Materials and Technologies*. 2012. No. 5. Pp. 157–167. (rus)
2. Ramesh Rudrapati. Recent advances in joining of aluminum alloys by using friction stir welding. *Mass production processes*, ed. by Anil Akdogan and Ali Serdar Vanli. IntechOpen. 2020. 13 p. DOI: 10.5772/intechopen.89382
3. Terent'ev S. A., Arzyev T. R. Friction stir welding of technical aluminum parts [Svarka treniem s peremeshivaniem detalej iz tekhnicheskogo alyuminiya]. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2012. Pp. 46–49 (rus)
4. Heidarzadeh A. [et al.] Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science*. 2021. No. 117 (100752). 68 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100752
5. Ahmed M. M. Z., El-Sayed Seleman M. M., Fydrych D., Çam G. Friction stir welding of aluminum in the aerospace industry: The current progress and state-of-the-art review. *Materials*. 2023. No. 16 (2971). 33 p. DOI: 10.3390/ma16082971
6. Kuricyn D. N. Development of technological support of friction stir welding in the production of aerospace structures: thesis of PhD in Engineering [Razrabotka tekhnologicheskogo obespecheniya svarki treniem s peremeshivaniem v proizvodstve aerokosmicheskikh konstrukcij: dis. ... kand. tekhn. nauk]. M., 2018. 177 p. (rus)
7. Bojcov A. G., Kachko V. V., Kuricyn D. N. High speed friction stir welding aviation materials and structures [Vysokoskorostnaya svarka treniem peremeshivaniem aviacionnykh materialov i konstrukcij]. *Metalloobrabotka*. 2013. No. 5–6 (77–78). Pp. 35–42. (rus)
8. Ivanov A. N. [et al.] Influence of the friction stir welding mode and its direction relative to the direction of rolling the D16 alloy on the structure and properties of its welded joints [Vliyanie rezhima svarki treniem s peremeshivaniem i ee napravleniya otnositel'no napravleniya prokatki splava D16 na strukturu i svoystva ego svarnyyh soedinenij]. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2020. Vol. 22. No. 4. Pp. 110–123. (rus) DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-110-123
9. Ivanov A. N. Development of method and equipment for the friction stir welding with ultrasonic action to obtain strong welded joints from aluminum D16 alloy: thesis of PhD in Engineering [Razrabotka sposoba i oborudovaniya svarki treniem s peremeshivaniem s ul'trazvukovym vozdeystviem dlya polucheniya prochnyyh svarnyyh soedinenij iz alyuminiyevogo splava D16: dis. ... kand. tekhn. nauk]. Tomsk, 2019. 188 p. (rus)

10. Ivanov A. N. [et al.] Features of structuring processes in D16 alloy joints obtained by friction stir welding with a tool of “bobbin tool” type [Osobennosti processov strukturoobrazovaniya v soedineniyah splava D16, poluchennykh svarkoj treniem s peremeshivaniem s instrumentom tipa “bobbin tool”]. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2021. Vol. 23. No. 2. Pp. 98–115. (rus) DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-98-115

11. Belov N. A., Tsidenov K. A., Letyagin N. V., Cherkasov S. O. Structure and mechanical properties of hot-rolled sheets of alloy Al — 2 %, Cu — 2 %, Mn — 0.4 %, Si — 0.2 %, Zr subjected to the friction stir welding [Struktura i mekhanicheskie svoystva goryachekatanykh listov iz splava Al — 2 %, Cu — 2 %, Mn — 0,4 %, Si — 0,2 %, Zr, podvergnutykh svarke treniem s peremeshivaniem]. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 5. (rus) DOI: 10.17580/tsm.2022.05.09

12. Ovchinnikov V. V., Drits A. M. Technological features of friction stir welding joints of aluminum alloys of the Al-Mg system [Tekhnologicheskie osobennosti svarki treniem s peremeshivaniem soedinenij alyuminiyevykh splavov sistemy Al-Mg]. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2019. No. 3. Pp. 7–20. (rus)

13. Ovchinnikov V. V. Prospects of development of high-tech deformable aluminum alloys for welded constructions. Part 1 [Perspektivy razvitiya vysokotekhnologichnykh deformiruemyykh alyuminiyevykh splavov dlya svarnykh konstrukcij. Chast' 1]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*. 2017. No. 2. Pp. 24–38. (rus)

14. Ovchinnikov V. V. Prospects for developing high-tech deformable aluminum alloys for welded constructions. Part 3. [Perspektivy razvitiya vysokotekhnologichnykh deformiruemyykh alyuminiyevykh splavov dlya svarnykh konstrukcij. Chast' 3]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*. 2017. No. 4. Pp. 44–60. (rus)

15. Drits A. M., Ovchinnikov V. V., Reztsov R. B. Defects arising during friction stir welding of aluminum alloys of the Al-Mg system, and ways to eliminate them [Defekty, vznikayushchie pri svarke treniem s peremeshivaniem alyuminiyevykh splavov sistemy Al-Mg, i sposoby ih ustraneniya]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2022. No. 4. Pp. 14–25. (rus)

16. Konyuhov A. D., Drits A. M., Shurtakov A. K. Properties of alloy 1565hM and its welded joints [Svoystva splava 1565chM i ego svarnykh soedinenij]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2013. No. 3. Pp. 113–120. (rus)

17. Polmear I. J. *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals*. Light alloys. 4th ed. Oxford ; Burlington, MA : Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006. 421 p.

18. Bakradze M. M. [et. al] Optimization of mechanical characteristics of welded joints made by STP using modern computer systems [Optimizatsiya mekhanicheskikh harakteristik svarnykh soedinenij, vypolnennykh STP, s ispol'zovaniem sovremennykh vychislitel'nykh sistem]. *Trudy VIAM*. 2019. No. 4 (76). Pp. 11–20. (rus)

19. Panteleev M. D. Features of forming the structure of welded joints during friction stir welding of high-strength aluminum-lithium alloys: synopsis of a thesis of PhD in Engineering [Optimizatsiya mekhanicheskikh harakteristik svarnykh soedinenij, vypolnennykh STP, s ispol'zovaniem sovremennykh vychislitel'nykh sistem: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk]. M., 2019. 23 p. (rus)

20. Andreeva L. P., Ovchinnikov V. V., Kabancev V. K., Kappuhina S. D. Melting and friction stir welding properties of VAL10 aluminum alloy foundry joints [Svoystva svarnykh soedinenij litejnogo alyuminiyevogo splava VAL10, poluchennykh svarkoj plavlaniem i treniem s peremeshivaniem]. *Modern Innovations, Systems and Technologies*. 2019. No. 1 (22) Pp. 76–85. (rus)

21. Poklyatsky A. G., Ishchenko A. Ya., Fedorchuk V. E. Friction stir welding of composite, granulated and quasi-crystalline aluminum alloys [Svarka treniem s peremeshivaniem kompozitsionnykh, granulirovannykh i kvazikristallicheskiykh alyuminiyevykh splavov]. *Automatic Welding*. 2011. No. 7. Pp. 3–8. (rus)

22. Poklyatsky A. G., Chaika A. A., Klochkov I. N., Yavorskaya M. R. Friction stir welding of aluminum alloys of various alloying systems [Svarka treniem s peremeshivaniem alyuminiyevykh splavov razlichnykh sistem legirovaniya]. *Automatic Welding*. 2010. No. 10 (690). Pp. 18–23. (rus)

23. Drits A. M., Ovchinnikov V. V. Properties of joints of aluminum alloy sheets made by friction stir welding [Svoystva soedinenij listov alyuminiyevykh splavov, vypolnennykh svarkoj treniem s peremeshivaniem]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2015. No. 10. Pp. 7–15. (rus)

24. Volkova E. F. *Modern deformable alloys and magnesium-based composites (overview) [Sovremennye deformiruemye splavy i kompozicionnye materialy na osnove magniya (obzor)]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2006. No. 11. Pp. 5–9. (rus)*
25. Mostyaev I. V., Akinina M. V. *Features and trends of development in the field of thermal treatment of magnesium alloys (overview) [Osobennosti i tendencii razvitiya v oblasti termicheskoy obrabotki magnievykh splavov (obzor)]. Trudy VIAM. 2018. No. 7 (67). Pp. 41–48. (rus)*
26. Bondarev A. A., Nesterenkov V. M. *Technological features of electron beam welding of deformable magnesium alloys in vacuum [Tekhnologicheskie osobennosti svarki deformiruemyykh magnievykh splavov elektronnykh luchom v vakuume]. Automatic Welding. 2014. No. 3. Pp. 18–22. (rus)*
27. Badkoobeh F. [et al.]. *Friction Stir Welding/Processing of Mg-Based Alloys: A Critical Review on Advancements and Challenges / Materials. 2021. No. 14 (6726). 35 p. DOI: 10.3390/ma14216726*
28. Prabhakar D. A. P. [et al.] *A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: challenges and trends. Journal of materials research and technology. 2022. No. 20. Pp. 3025–3060.*
29. Selivanov A. S., Bachaev D. A. *Influence of friction stir welding modes and tool parameters on mechanical and structural properties of welded joints of titanium alloys [Vliyanie rezhimov svarki treniem s peremeshivaniem i parametrov instrumenta na mekhanicheskie i strukturnye svoystva svarnykh soedinenij titanovykh splavov]. Innovacionnoe i cifrovoe mashinostroenie: materialy Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii “Stankostroenie i cifrovoe mashinostroenie”, Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii “Sostoyanie i perspektivy razvitiya svarochnogo proizvodstva Rossii”. Ufa : USATU, 2021. Pp. 351–357. (rus) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=udrymm>.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Yuri Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia,
e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

Denisova Natalia Anatolievna, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia

Petrov Pavel Aleksandrovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia,
e-mail: pavelpetrov@list.ru

Orlov Andrei Andreievich, Assistant Lecturer of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia,
e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru