



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-56-64>
УДК 621.791, 669.017

Поступила 18.10.2019
Received 18.10.2019

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА

*Б. М. НЕМЕНЕНОК, И. В. РАФАЛЬСКИЙ, П. Е. ЛУЩИК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65, E-mail: nemenenok@bntu.by,
А. А. РАДЧЕНКО, ГНУ «Институт порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа НАН Беларуси»,
г. Минск, Беларусь, ул. Платонова, 41. E-mail: radch.aa@gmail.com*

Представлены результаты анализа теоретических и экспериментальных исследований способов получения неразъемных соединений разнородных металлов и сплавов, а также преимущества, проблемы реализации и перспективы использования процессов сварки трением с перемешиванием для соединения титановых и алюминиевых сплавов. Отмечается, что большинство исследований посвящено сварке трением с перемешиванием легких металлов, таких, как алюминий, медь, магний и их сплавы. Несмотря на большой научный и практический интерес, процессы сварки трением с перемешиванием сплавов и металломатричных композиционных материалов на основе алюминия и титана изучены менее тщательно и требуют дополнительного внимания.

Учитывая разнообразие и сложность сварки трением с перемешиванием, отсутствие правильной оценки реакционной способности, свойств и конструктивных особенностей алюминиевых и титановых сплавов может привести к ряду проблем, связанных с изменением структуры материалов и дефектами зоны сварки, что сопровождается неизбежным ухудшением механических характеристик готовых соединений.

Ключевые слова. Алюминиевые и титановые сплавы, неразъемные соединения, сварка трением с перемешиванием.

Для цитирования. Немененок, Б. М. Способы получения неразъемных соединений сплавов на основе алюминия и титана / Б. М. Немененок, И. В. Рафальский, П. Е. Луцки, А. А. Радченко // *Литье и металлургия*. 2020. № 1. С. 56–64. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-56-64>.

METHODS FOR PRODUCING PERMANENT JOINTS OF ALUMINUM AND TITANIUM ALLOYS

*B. M. NEMENENOK, I. V. RAFALSKI, P. E. LUSHCHIK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: nemenenok@bntu.by,
A. A. RADCHENKO, State Scientific Institute «Powder Metallurgy Institute named after Academician
O. V. Romana» National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus, 41, Platonova str.
E-mail: radch.aa@gmail.com*

The results of the analysis of theoretical and experimental studies of methods for producing permanent joints of dissimilar metals and alloys are presented, as well as the advantages, implementation problems and prospects of using friction stir welding to join titanium and aluminum alloys. It is noted that most studies focus on friction stir welding of light metals such as aluminum, copper, magnesium and their alloys. Despite the great scientific and practical interest, the friction stir welding processes of alloys and metal-matrix composite materials based on aluminum and titanium have been studied less thoroughly and require additional attention.

Given the variety and complexity of friction stir welding, the lack of a correct assessment of the reactivity, properties and design features of aluminum and titanium alloys can lead to a number of problems associated with a change in the structure of materials and defects in the welding zone, which is accompanied by the inevitable deterioration of the mechanical characteristics of the finished joints.

Keywords. Aluminum and titanium alloys, permanent joints, friction stir welding.

For citation. Nemenenok B. M., Rafalski I. V., Lushchik P. E., Radchenko A. A. Methods for producing permanent joints of aluminum and titanium alloys. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 56–64. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-56-64>.

Введение

Конструкции из разнородных металлов и сплавов являются востребованной продукцией аэрокосмической, автомобиле- и тракторостроительной, горнодобывающей, строительной, сельскохозяйственной, машиностроительной, химической, нефтедобывающей и других отраслей промышленности. Использование соединений разнородных легких сплавов, таких, как алюминиевые, магниевые и титановые сплавы, позволяет создавать легкие конструкции благодаря сочетанию удовлетворительной прочности, хорошей пластичности и низкому удельному весу. Однако эти сплавы, как правило, менее пригодны для обработки и получения неразъемных соединений по сравнению с обычными сталями и в большинстве случаев их сварка обычными методами плавления затруднительна или невозможна [1].

Алюминиевые сплавы благодаря сочетанию низкой плотности, достаточно высокой удельной прочности, ударопрочности, коррозионной стойкости, высокой устойчивости к низким и относительно высоким температурам при их относительно небольшой цене в настоящее время являются одними из наиболее востребованных современных промышленных материалов.

Высокие механические свойства, низкая плотность и высокая коррозионная стойкость делают титан и его сплавы также очень привлекательными конструкционными материалами в различных отраслях промышленности. Однако из-за высокой реакционной способности и сложностей производственного процесса получения титан имеет относительно высокую стоимость. В связи с этим некоторые конструкционные элементы и компоненты из титана частично заменяют элементами из более дешевых материалов, таких, как нержавеющие стали и алюминиевые сплавы. В случае применения элементов конструкций из алюминиевых сплавов обеспечивается существенное снижение их массы. Основное требование, предъявляемое в отношении таких конструкций, – возможность получения высокопрочных соединений высокого качества разнородных сплавов [2].

Применение комбинированных соединений легких сплавов, таких, как алюминиевые и титановые, благодаря их низкой плотности, высокой механической прочности и коррозионной стойкости, является актуальным и весьма востребованным для производства инновационной продукции различного назначения в стратегических отраслях промышленности (авиационной, космической, автомобильной, судостроительной, машино- и приборостроении и др.). Сравнительно низкие и стабильные значения коэффициента теплового расширения этих сплавов обеспечивают возможность получения конструкционных соединений этих материалов.

Проектирование сварного соединения, как указывают авторы работы [3], представляет собой сложный, многостадийный процесс, который требует учета различных факторов и свойств материалов и их соединений, таких, как усталостная прочность, структурная целостность, качество поверхности, технологичность получения, поглощение энергии, шум, вибрация и жесткость. Выбор материала и проектирование технологического процесса сварки с использованием разнородных металлов и сплавов приводит к необходимости учитывать химическое и термодинамическое взаимодействие соединяемых элементов. Чтобы спроектировать высокопрочное соединение из разнородных сплавов на основе алюминия и титана, требуется обширная база инженерных знаний в области материаловедения, химического и структурного анализа, физико-механических испытаний, применение математических методов и инструментов компьютерного моделирования.

Обзор методов получения соединений разнородных материалов и их обсуждение

Для изготовления высокопрочных инженерных конструкций и изделий ответственного назначения большое значение имеет применение легких сплавов, прежде всего, на основе алюминия и титана.

Использование алюминиевых сплавов в металлоконструкциях различного назначения является предпочтительным ввиду их очевидных сравнительных преимуществ перед другими сплавами, включая невысокую стоимость, высокие технологические и эксплуатационные свойства. Немаловажными факторами являются относительно устойчивая динамика снижения стоимости алюминия и рост его мирового производства в последние годы [4].

Титановые сплавы обладают высокой механической прочностью (превосходящей удельную прочность большинства сталей), повышенной коррозионной стойкостью (сопоставимой с коррозионной стойкостью алюминиевых сплавов) и высокой жаропрочностью. Эти сплавы находят широкое применение при изготовлении металлоизделий и конструкций, предназначенных для работы в условиях высоких температур, сохраняя при этом хорошие механические свойства.

Существенный прогресс, достигнутый в последние годы в технологиях получения неразъемных соединений разнородных материалов, способствовал увеличению интереса к использованию конструкций из сплавов на основе алюминия и титана в различных отраслях промышленности [5]. Для разнородных сплавов в зависимости от эксплуатационных требований и функционального назначения конструкций могут использоваться различные способы получения неразъемных соединений, в том числе пайки [6] и сварки [7]. Каждый способ соединения имеет свои преимущества и недостатки и наиболее подходящий определяется функциональным назначением и предъявляемыми требованиями к изделию или конструкции.

Высокопрочное соединение сплавов на основе титана и алюминия с помощью пайки и традиционных способов сварки довольно сложно получить из-за различий в физико-химических свойствах (температура плавления, теплопроводность, коэффициент термического расширения, реакционная способность с газами, присутствующими в окружающей среде), а также из-за образования хрупких интерметаллических фаз в зоне термического влияния [2].

Сварочные процессы весьма разнообразны, тем не менее, их можно разделить на две группы: сварка плавлением и сварка давлением [7]. Сварка плавлением включает технологии соединения металлов и сплавов, обеспечивающие расплавление материалов в локальной области, в том числе способы дуговой сварки (дуговая сварка плавящимся электродом, дуговая сварка под флюсом, сварка металла в инертном газе, сварка в активном газе, электрогазосварка, сварка дуговая угольным электродом, дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа, дуговая точечная сварка, атомно-водородная сварка, сварка дуговая плазменная), а также газовой, термитной, электронно-лучевой, электрошлаковой, лазерной сварки, сварки световым излучением дуги.

При использовании способов сварки давлением соединение образуется в результате деформации металлических поверхностей в месте контакта соединяемых изделий. К таким способам получения неразъемных соединений относят разнообразные процессы контактной сварки, ударной, кузнечной, ультразвуковой, диффузионной сварки, сварки взрывом, трением и др.

Методы, рекомендованные для изготовления неразъемных соединений материалов на основе алюминия и титана, по данным работы [2], включают несколько специальных видов сварки плавлением (электронно-лучевая сварка, лазерная сварка) и сварки давлением (диффузионная сварка, сварка трением).

В работе [1], в которой приводится обзор основных методов сварки, используемых для получения соединений между коммерчески наиболее используемыми легкими сплавами (алюминиевыми, магниевыми и титановыми), отмечается, что при сварке указанных материалов могут быть приняты во внимание как традиционные способы (сварка металлическим электродом в газовой среде (MIG, GMAW)), так и более новые методы (сварка лазерным лучом (LBW) и электронно-лучевая сварка (EBW)). Указывается, что хотя LBW-метод и дает лучшие результаты, в сварных швах разнородных сплавов наблюдаются типичные дефекты, вызванные плавлением и кристаллизацией материала, такие, как трещины, пустоты и пористость. Кроме того, из-за высоких температур в процессе сварки наблюдается образование интерметаллидов, ведущие в большинстве проанализированных случаев к хрупкому поведению и плохим механическим характеристикам неразъемного соединения.

Например, в работе [8] исследовали структуру и свойства соединений, полученных из листового алюминиевого сплава AA6056 и титанового сплава Ti6Al4V, сваренного встык лазерным лучом без использования присадочной проволоки. Было установлено, что на границе раздела сварного шва образуется интерметаллическая хрупкая фаза $TiAl_3$, которая существенно влияет на механические свойства соединения. Оптимизация конструкции соединения путем снятия фаски листа из сплава Ti6Al4V привела к уменьшению количества образующихся на межфазной границе раздела интерметаллидов $TiAl_3$. Таким образом, было показано, как сравнительно незначительное изменение конструкции соединения привело к формированию сварного шва с улучшенной микроструктурой, повышенной твердостью и прочностью, сопротивлением распространению усталостной трещины. В результате оптимизации конструкции соединения тип разрушения в зоне плавления алюминиевого сплава AA6056, прилегающей к границе раздела сварного шва, изменился с частично межкристаллического на полностью транскристаллический.

Авторы работы [1] приходят к выводу, что для получения неразъемных соединений из легких сплавов с целью преодоления вышеупомянутых дефектов могут быть успешно использованы твердофазные процессы, такие, как диффузионная сварка, сварка взрывом и сварка трением с перемешиванием (СТП).

Возможности СТП-процесса, структура и свойства полученных сварных швов в последние годы активно исследуются с целью получения соединений металлических материалов в аэрокосмической обла-

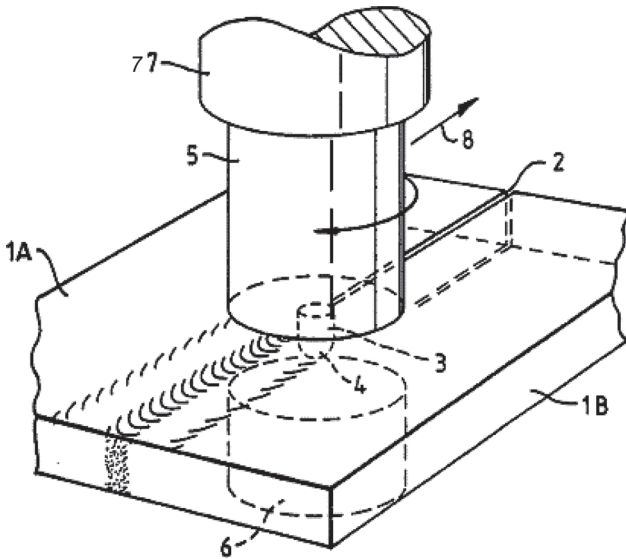


Рис. 1. Принципиальная схема СТП-процесса [20]

сти, судостроении и автомобилестроении, в том числе для получения сварных конструкций из алюминиевых и титановых сплавов [9]. Однако основное внимание авторов выполненных исследований по проблемам СТП направлено на изучение процессов получения соединений металлов и сплавов на основе алюминия [9–16], а также меди, магния и стали.

Как указывают авторы работы [10], общей проблемой получения сварных листовых металлоконструкций вследствие большой вероятности разрыва между листами (например, из-за неправильного крепления, неточности процессов производства и переменной толщины листов) является выход материала сварного шва из зоны обработки и эффективной площади поперечного сечения сварной зоны с последующим уменьшением разрыва и дефектностью сварного шва. Оптимальным вариантом решения этой проблемы является применение СТП-процесса в твердой фазе, впервые разработанного в СССР в 1967 г.

[19], развитого и запатентованного в Великобритании в 1991 г. Институтом сварки (TWI) [20].

Принцип реализации СТП-процесса заключается в том, что вращающийся от привода двигателя 7 рабочий инструмент (бурт 5 со штифтом 3) медленно погружается в стык 2 двух металлических пластин (листы 1А и 1В) на глубину, примерно равную толщине соединяемых кромок между верхней 4 и нижней 6 поверхностями соединяемых деталей и в дальнейшем перемещается вдоль соединения в направлении 8, как показано на рис. 1. Тепло, выделяющееся при трении вращающегося бурта и поверхности свариваемых пластин, приводит к локальному нагреву и пластификации материалов ниже температуры плавления.

Физическая сущность СТП-процесса заключается в преобразовании механической энергии в теплоту благодаря работе сил трения [10]. Соединение формируется при условии интенсивного пластического деформирования локальных объемов кромок металлических материалов на стыке свариваемых пластин. Из-за асимметрии структуры сварного шва в поперечном сечении, полученного при СТП, различают сторону набегания, для которой направление вращения инструмента совпадает с направлением сварки, и противоположную сторону отхода. При этом в процессе СТП температура алюминиевых сплавов, как правило, не превышает 500 °С [21].

В поперечном сечении сварного шва из-за различий в структуре принято выделять зоны основного материала (рис. 2, а), термического влияния (рис. 2, б), термомеханического влияния (рис. 2, в) и ядро – центральная зона перемешивания материалов (рис. 2, г).

Каждая зона (рис. 2) подвергается разному уровню пластической деформации, что приводит к различиям в микроструктуре. Чтобы получить качественное сварное соединение, во время СТП-процесса необходимо использовать такие параметры сварки, как скорость перемещения рабочего инструмента, скорость вращения и угол наклона инструмента, глубину погружения задней кромки инструментом в со-

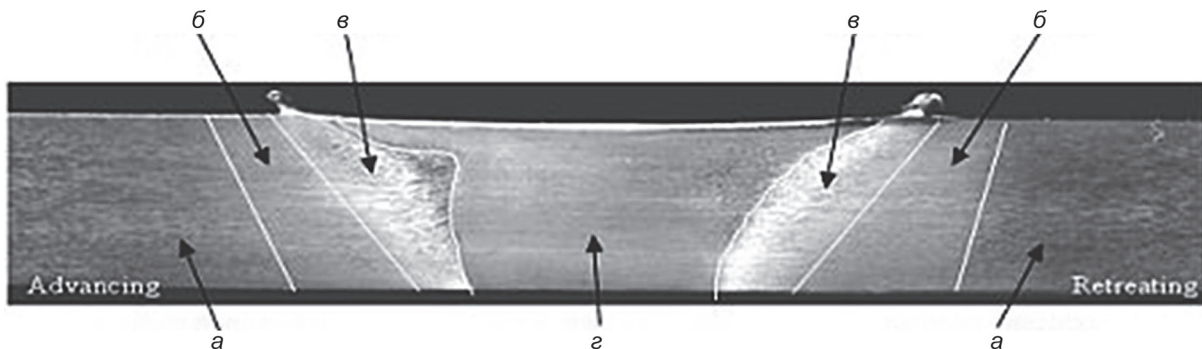


Рис. 2. Схема расположения зон сварного шва, полученного при сварке трением с перемешиванием [22]: а – зона основного материала; б – зона термического влияния (ЗТВ); в – зона термомеханического влияния (ЗТМВ); г – ядро

единаемые материалы [22]. Установлено, что ключевыми параметрами процесса являются скорость вращения и скорость перемещения инструмента и их соотношение (подача инструмента) [9, 23]. Отмечается, что высокие скорости вращения и низкие скорости перемещения могут вызывать перегрев материалов. Если скорость перемещения инструмента слишком высокая, а скорость вращения слишком низкая, процесс сварки будет слишком холодным для получения сварных швов приемлемого качества. Угол наклона оси вращения инструмента от вертикали обычно составляет от 0 до 4°. Наклон позволяет формировать качественный сварной шов за счет создания давления под задней кромкой бурта, где происходит образование шва.

При использовании СТП-процессов возможно обеспечить получение высокопрочных соединений не только однородных, но и разнородных металлических материалов, даже таких, которые сильно отличаются по своим физико-механическим и теплофизическим свойствам. Однако для этих процессов особенно важен правильный выбор технологических параметров СТП, прежде всего, параметров перемещения инструмента и его формы.

Среди преимуществ СТП-процессов авторами исследований, прежде всего, указывается возможность получать прочные сварные швы разнородных материалов; безопасность процесса для окружающей среды; отсутствие необходимости в присадочной проволоке; низкие остаточные напряжения, деформации и усадка даже в протяженных сварных швах; мелкий размер зерна сварного шва; малый расход энергии; отсутствие пористости, особых требований к процессу сварки и необходимости в подготовке кромок до сварки и механической обработке после нее [9–18].

Поскольку СТП-процесс реализуется при температурах ниже температуры плавления соединяемых материалов, это позволяет исключить или минимизировать образование оксидов, хрупких интерметаллических образований, металлургической пористости и трещин, существенных деформаций и остаточных напряжений. В связи с этим применение твердофазного СТП-процесса по сравнению с процессами сварки плавлением для соединения алюминиевых и титановых сплавов представляется весьма перспективным.

Помимо таких параметров, как скорость перемещения и скорость вращения рабочего инструмента, решающее значение для получения качественного соединения с высокими механическими свойствами имеет геометрия рабочего инструмента. Выбор конструкции рабочего инструмента является критически важной задачей при определении технологических параметров СТП, так как его профиль оказывает существенное влияние на перемешивание материала и качество сварного шва [9, 18]. Бурт рабочего инструмента может иметь различную геометрию, например, быть либо цилиндрическим, либо вогнутым или выпуклым (рис. 3). Основными факторами при выборе рабочего инструмента для СТП являются твердость материала заготовки и объем перемешиваемого материала.

В СТП-процессах для разнородных металлов и сплавов были опробованы различные геометрии рабочего инструмента, но наиболее распространенными являются конические, цилиндрические или треугольные секции с резьбой. Отмечается, что основные цилиндрические формы достаточны для тонкого листового материала из алюминиевых сплавов, но для заготовок толщиной более 12 мм требуются более сложные профили [23].

В последнее время также были предприняты активные усилия по разработке СТП-процессов для высокотемпературных металлических материалов, прежде всего, титана и титановых сплавов. В [23] отмечается, что при исследовании СТП-процессов для получения соединений из титановых сплавов основное внимание уделяется разработке рабочего инструмента и оптимизации параметров процесса с целью увеличения срока службы инструмента. При этом установлено, что тепло, выделяемое при трении рабочего инструмента, сравнительно медленно отводится по сравнению с алюминиевыми сплавами из-за низкой теплопроводности титана. Указывается, что для СТП-процессов свариваемость титановых сплавов хуже, чем у алюминиевых, и окно свариваемости технологических параметров СТП-процесса относительно узкое.

Для конструкций из тонких титановых профилей предпочтительны упрощенные профили бурта, поскольку любые элементы рабочего инструмента быстро изнашиваются, а срок службы инструмента является ограничивающим фактором. По этой причине при сварке титановых сплавов объемы смешивания значительно меньше, чем у алюминия. Снижение нагрузки при давлении плеча на материал необходимо применить при СТП к тонкостенным титановым заготовкам. Меньшие площади контакта при использовании конической геометрии позволяют снизить давление на материал при введении штыря в стык на начальном этапе. Соединение тугоплавких металлических материалов приводит к возникновению высо-

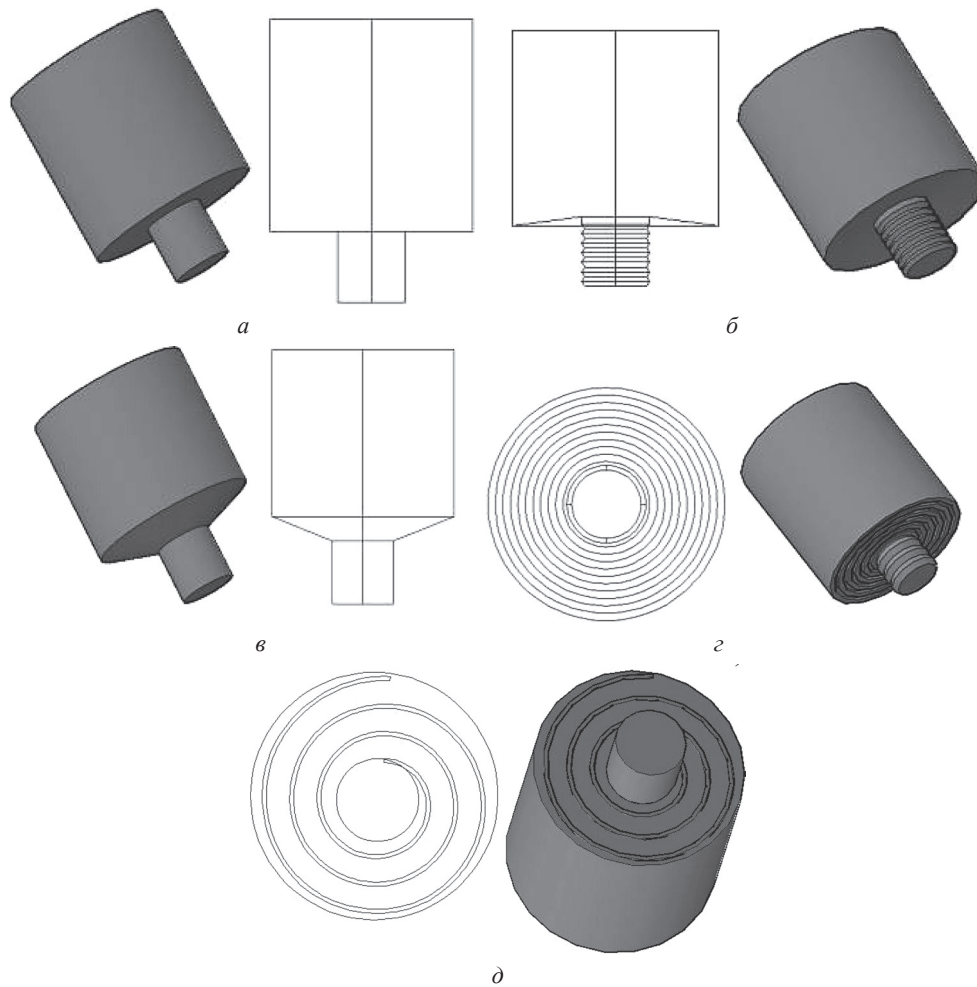


Рис. 3. Конструкции рабочего инструмента для СТП-процесса с различной геометрией бурта и штыря: *а* – цилиндрическая; *б* – цилиндрическая с резьбовым штырем; *в* – коническая; *г* – коническая с резьбой; *д* – цилиндрическая с канавками [18]

ких значений напряжений и температуры на бурте, что требует применения износостойких инструментальных материалов. Высокопрочные инструментальные материалы должны выдерживать температуры 800–1200 °С для титановых сплавов, в связи с чем для изготовления рабочего инструмента требуется применение керамических огнеупорных материалов, таких, как карбиды и нитриды с хорошей жаропрочностью, которые могут выдерживать технологические ковочные нагрузки [23].

Несмотря на то что СТП-процесс проводится при температурах ниже температур плавления основных материалов, интерметаллиды могут появляться из-за ликвации или диффузии атомов в зоне сварного шва. Отмечается, что в большинстве случаев присутствие интерметаллидов приводит к увеличению твердости, хрупкости и снижению механической прочности соединения [9–18].

Несмотря на достаточно большой объем полученных экспериментальных данных, теория процессов СТП, как указывают авторы работы [10], в настоящее время находится в стадии разработки, поскольку физика процессов весьма сложна, многофакторна и требует учета одновременно протекающих процессов тепло- и массопереноса, изменения температуры, пластической деформации, контактных явлений и трения. Отмечается, что исследование процессов СТП затруднено сложностью наблюдения деталей процесса смешения материалов в связи с большими напряжениями и скоростями деформации, поэтому для изучения закономерностей и механизмов СТП-процессов предпринимаются активные усилия по их численному моделированию [17].

Выводы

В настоящее время накоплен значительный объем экспериментальных и теоретических данных по результатам исследований процессов сварки трением с перемешиванием для разнородных материалов. Анализ и систематизация имеющейся информации по вопросам получения соединений из металлов и сплавов позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Сварка трением с перемешиванием по сравнению с традиционными методами сварки плавлением имеет ряд преимуществ:

- возможность получать прочные сварные швы однородных или разнородных металлов и сплавов, включая алюминий, титан, магний, медь, цинк, никель и их сплавы, сталь, в том числе стыковых соединений переменной толщины;
- отсутствие необходимости в присадочных материалах и защитных газах;
- низкие остаточные напряжения, деформации и усадка даже в протяженных сварных швах;
- мелкий размер зерна в структуре сварного шва, отсутствие или минимальное количество дефектов сварного шва, таких, как пористость и трещины;
- безопасность процесса для окружающей среды;
- малый расход энергии;
- отсутствие особых требований к процессу сварки и необходимости в подготовке кромок до сварки и механической обработке после нее.

2. Основными факторами, определяющими качество сварного шва разнородных сплавов на основе алюминия и титана при СТП-процессах, являются:

- скорость вращения рабочего инструмента;
- скорость перемещения рабочего инструмента;
- угол наклона шпинделя к поверхности соединяемых материалов;
- конструкция штыря и бурта рабочего инструмента.

3. Несмотря на огромный научный и практический интерес, процессы сварки трением с перемешиванием тугоплавких сплавов, а также металломатричных композиционных материалов на основе алюминия и титана исследованы недостаточно глубоко и требуют дополнительного внимания.

4. Отсутствие правильной оценки реакционной способности и физико-механических свойств сплавов на основе алюминия и титана, подлежащих соединению, и конструктивных особенностей соединений может приводить к ряду проблем, связанных с изменением структуры материалов и дефектами в зоне сварки, что вызывает неизбежное ухудшение механических характеристик готовых соединений.

5. В условиях многообразия и сложности СТП дальнейшего внимания требуют вопросы разработки теории СТП-процессов, использования методов математического моделирования СТП-процессов для получения конструкций из разнородных металлов на основе алюминия и титана, детального исследования взаимосвязи режимов сварки, конструкции рабочего инструмента и механизма движения пластифицированных потоков материала с трибологическими и коррозионными характеристиками сварных соединений, износом сварочного инструмента, влияния предварительного нагрева/охлаждения, эффектов взаимодействия соединяемых материалов, в том числе упрочненных керамическими и интерметаллическими соединениями, на структуру и свойства СТП-соединений.

Работа выполнена при поддержке Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Т19ИНДГ-007 «Исследование межфазного взаимодействия и формирования структуры зерна в швах, полученных сваркой трением, для различных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов с титановыми сплавами».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fabrizio M.** Friction Stir Welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints / M. Fabrizio, B. Gianluca, S. Pellegrino, L. Fratini // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19–24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. Procedia Engineering 81 (2014), pp. 74–83.
2. **Winiowski A.** Brazing of titanium with aluminium alloys / A. Winiowski, D. Majewski // Arch. Metall. Mater. 2017. Vol. 62 (2). P. 763–770.
3. **Modi S.** Mixed Material Joining Advancements and Challenges / S. Modi, M. Stevens, M. Chess // Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI. May 2017. 29 p.
4. **The website of the International Aluminium Institute (IAI):** <http://www.world-aluminium.org>; 28.08.2019.
5. **Kah P.** Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers / P. Kah, R. Suoranta, J. Martikainen, C. Magnus // Rev. Adv. Mater. Sci. 2014. Vol. 36. P. 152–164.
6. **Weis S.** Research trends in brazing and soldering / S. Weis, V. Fedorov, M. Ellsner, T. Uhlig [et al.] // Przegląd Spawalnictwa. 2017. Vol. 89 (7). P. 37–44.
7. **British Standards Institution**, 1983 BS 499: Part 1 [Welding Terms and Symbols, Glossary of welding, brazing and thermal cutting].
8. **Vaidya W. V.** Improving interfacial properties of a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications / W. V. Vaidya, M. Horstmann, V. Ventzke [et al.] // Journal of Materials Science. 2010. Vol. 45 (22). P. 6242–6254.

9. **Mishra R. S.** Friction stir welding/processing studies of aluminum alloy & titanium 64 / R. S. Mishra, P. Rani // *International Journal of Research in Engineering and Innovation*. 2017. Vol. 1, no. 1. P. 209–217.
10. **Карманов В. В.** Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва / В. В. Карманов, А. Л. Каменева, В. В. Карманов // *Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2012. № 32. С. 6780.
11. **Lokesh R.** Optimization of process parameters: tool pin profile, rotational speed and welding speed for submerged friction stir welding of AA6063 alloy / R. Lokesh, V. S. Senthil Kumar, C. Rathinasuriyan, R. Sankar // *International Journal of Technical Research and Applications*. 2015. Special Issue 12. P. 35–38.
12. **Abdel-Wahab El-Morsy.** Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of AA2024-T4 Aluminum Alloy / Abdel-Wahab El-Morsy, Mohamed M. Ghanem, Haitham Bahaitham // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 2493–2498.
13. **Fall A.** Tool Wear Characteristics and Effect on Microstructure in Ti-6Al-4V Friction Stir Welded Joints / Ameth Fall, Mostafa Hashemi Fesharaki, Ali Reza Khodabandeh, Mohammad Jahazi // *Metals*. 2016. Vol. 6, no. 275. 12 p.
14. **Gangwar K.** Microstructure and Mechanical Properties of Friction StirWelded Dissimilar Titanium Alloys: TIMET-54M and ATI-425 / K. Gangwar, M. Ramulu, A. Cantrell, D. G. Sanders // *Metals*. 2016. Vol. 6, no. 252. 14 p.
15. **Gangwar K.** Friction Stir Welding of near α and $\alpha+\beta$ Titanium Alloys: Metallurgical and Mechanical Characterization / Kapil Gangwar, Ramulu Mamidala, Daniel G. Sanders // *Metals*. 2017. Vol. 7, no. 565. 23 p.
16. **Karna S.** Recent Developments and Research Progress on Friction Stir Welding of Titanium Alloys: An Overview / Sivaji Karana, Muralimohan Cheepu, D. Venkateswarulu, V. Srikanth // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, Issue 330. 16 p.
17. **Майстренко А. Л.** Моделирование тепловых процессов для улучшения структуры металлов и сплавов методом трения с перемешиванием / А. Л. Майстренко, В. М. Нестеренков, В. А. Дутка [и др.] // *Автоматическая сварка*. 2015. № 1. С. 5–14.
18. **Verma S. M.** A critical review of friction stir welding process / S. M. Verma, & J. P. Misra // *DAAAM International Scientific Book*. 2015. P. 249–266.
19. **Способ сварки металлов трением:** а. с. 195846 / Ю. В. Клименко. Опубл. 04.05.1967.
20. **Thomas W. M.** Improvements relating to friction welding: pat. WO1993010935A1 GB / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham [et al.]. Priority data 06.12.1991.
21. **Selamat N. F. M.** Friction stir welding of similar and dissimilar aluminium alloys for automotive applications / N. F. M. Selamat, A. H. Baghdadi, Z. Sajuri, A. H. Kokabi // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 13, Issue 2. P. 3401–3412.
22. **JaiSingh.** Optimization and Analysis of Hardness of Friction Stir Welding for Joining Aluminum Alloy 6105 using Taguchi Technique / JaiSingh, BikramJitSingh // *Cikitusi Journal for Multidisciplinary Research*. 2019. Vol. 6. Issue 3. P. 187–202.
23. **Brassington W. D. P.** Alternative Friction Stir Welding Technology for Titanium-6Al-4V Propellant Tanks within the Space Industry / W. D. P. Brassington, P. A. Colegrove // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2017. Vol. 22, Issue 4. P. 300–318.

REFERENCES

1. **Fabrizio M., Buffa G., Pellegrino S., Fratini L.** Friction Stir Welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints. *11th International Conference on Technology of Plasticity*, ICTP 2014, 19–24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. *Procedia Engineering* 81 (2014), pp. 74–83.
2. **Winiowski A., Majewski D.** *Brazing of titanium with aluminium alloys*. *Arch. Metall. Mater.* 2017, vol. 62 (2), pp. 763–770.
3. **Modi S., Stevens M., Chess M.** Mixed Material Joining Advancements and Challenges. *Center for Automotive Research*, Ann Arbor, MI. May 2017. 29 p.
4. **The website of the International Aluminium Institute (IAI):** <http://www.world-aluminium.org>; 28.08.2019.
5. **Kah P., Suoranta R., Martikainen J., Magnus C.** Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers / *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2014, vol. 36, pp. 152–164.
6. **Weis S., Fedorov V., Elssner M., Uhlig T. [et al.]** Research trends in brazing and soldering. *Przegląd Spawalnictwa*, 2017, vol. 89 (7), pp. 37–44.
7. **British Standards Institution**, 1983 BS 499: Part 1 [Welding Terms and Symbols, Glossary of welding, brazing and thermal cutting].
8. **Vaidya W. V., Horstmann M., Ventzke V. [et al.]** Improving interfacial properties of a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 45 (22), pp. 6242–6254.
9. **Mishra R. S., Rani P.** Friction stir welding/processing studies of aluminum alloy & titanium 64. *International Journal of Research in Engineering and Innovation*, 2017, vol. 1, no. 3, pp. 209–217.
10. **Karmanov V. V., Kameneva A. L., Karmanov V. V.** Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва [Friction stir welding of aluminum alloys: the nature and specific features of the process, structural features of the weld]. *Bulletin of PNIPU. Aerospace Engineering*, 2012, no. 32, pp. 67–80.
11. **Lokesh R., Senthil Kumar V. S., Rathinasuriyan C., Sankar R.** Optimization of process parameters: tool pin profile, rotational speed and welding speed for submerged friction stir welding of AA6063 alloy. *International Journal of Technical Research and Applications*, 2015, Special Issue 12, pp. 35–38.
12. **Abdel-Wahab El-Morsy, Mohamed M. Ghanem, Haitham Bahaitham.** Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of AA2024-T4 Aluminum Alloy. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 2493–2498.
13. **Fall A., Hashemi Fesharaki M., Khodabandeh A. R., Jahazi M.** Tool Wear Characteristics and Effect on Microstructure in Ti-6Al-4V Friction Stir Welded Joints. *Metals*. 2016. Vol. 6, 275. 12 p.
14. **Kapil Gangwar.** Microstructure and Mechanical Properties of Friction StirWelded Dissimilar Titanium Alloys: TIMET-54M and ATI-425 / Kapil Gangwar, M. Ramulu, Andrew Cantrell, Daniel G. Sanders. *Metals*. 2016. Vol. 6, 252. 14 p.

15. **Gangwar K., Ramulu M., Sanders D. G.** Friction Stir Welding of near α and $\alpha+\beta$ Titanium Alloys: Metallurgical and Mechanical Characterization. *Metals*, 2017, vol. 7 (565), 23 p.
16. **Karna S., Cheepu M., Venkateswarulu D., Srikanth V.** Recent Developments and Research Progress on Friction Stir Welding of Titanium Alloys: An Overview. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Issue 330. 16 p.
17. **Maistrenko A. L., Nesterenkov V. M., Dutka V. A. [et al.]** Modelirovanie teplovyh processov dlya uluchshenia struktury metallov I splavov metodom trenia s peremeshivaniem [Modeling of thermal processes to improve the structure of metals and alloys by friction stir welding]. *Automaticheskaya svarka = Automatic welding*, 2015, no. 1, p. 5–14.
18. **Verma S. M., Misra J. P.** A critical review of friction stir welding process. *DAAAM International Scientific Book*, 2015, pp. 249–266.
19. **Klimenko U. V.** Sposob svarki metallov treniem [Method of friction stir welding of metals]: a. s. 195846. 04.05.1967.
20. **Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C. [et al.]**. Improvements relating to friction welding: pat. WO1993010935A1 GB. Priority data 06.12.1991.
21. **Selamat N. F. M., Baghdadi A. H., Sajuri Z., Kokabi A. H.** Friction stir welding of similar and dissimilar aluminium alloys for automotive applications. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2016, vol. 13, Issue 2, pp. 3401–3412.
22. **JaiSingh., BikramJitSingh** Optimization and Analysis of Hardness of Friction Stir Welding for Joining Aluminum Alloy 6105 using Taguchi Technique. *Cikitusi Journal for Multidisciplinary Research*, 2019, vol. 6, Issue 3, pp. 187–202.
23. **Brassington W. D. P., Colegrove P. A.** Alternative Friction Stir Welding Technology for Titanium-6Al-4V Propellant Tanks within the Space Industry. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, vol. 22, Issue 4, pp. 300–318.