

УДК 621.791

**Харламов Ю. А., Денисова Н. А., Петров П. А.
Донбасский государственный технический университет
E-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Работа посвящена анализу условий формирования типичного строения структуры неразъемных соединений, получаемых различными методами сварки с разным характером преобразования веществ в зоне соединения. Рассмотрено три вида сварочных процессов: сварка плавлением, сварка давлением и сварка трением с перемешиванием. Показана необходимость совершенствования классификации сварочных процессов и выделения способов сварки трением с перемешиванием в отдельную группу. Рассмотрены основные преимущества и недостатки методов сварки трением с перемешиванием.

Ключевые слова: зоны сварных швов, образование связей между соединяемыми материалами, сварка плавлением, сварка давлением, сварка трением с перемешиванием, стадии образования сварных швов, сварные соединения.

При производстве различных изделий широкое применение получила сварка конструкционных материалов. Понятие сварки объединяет разнообразные методы получения монолитных неразъемных соединений. Монолитность сварных соединений обеспечивается созданием атомно-молекулярных связей между элементарными частицами соединяемых твердых тел [1, 2]. Процессы сварки протекают при наличии в зоне соединения двух основных физических явлений: введения и преобразования энергии; движения (превращения) веществ. При классификации сварочных процессов принято выделять три основных физических признака: наличие давления, вид вводимой энергии и вид инструмента — носителя энергии. Для отдельных методов сварки дополнительно используют технические и технологические признаки. По физическим признакам принято различать методы сварки плавлением и сварки давлением.

Сварка для микроучастков соединяемых поверхностей отличается двухстадийностью процесса образования прочных связей между атомами соединяемых веществ [1]: 1. Образование физического контакта, т. е. сближение соединяемых веществ на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия; 2. Стадия химического взаимодействия, заканчивающаяся образованием

прочного соединения. Для качественного соединения материалов необходимо обеспечить контакт по большей части стыкуемых поверхностей и активизировать их. Активация поверхности заключается в сообщении поверхностным атомам твердого тела некоторой энергии, необходимой: а) для обрыва связей между атомами тела и атомами внешней среды, насыщающими их свободные связи; б) для повышения энергии поверхностных атомов до уровня энергетического барьера схватывания. Энергия активации может в общем случае сообщаться в виде теплоты (термическая активация), упруго-пластической деформации (механическая активация), электронного, ионного и других видов облучения (радиационная активация).

При взаимодействии жидких или газообразных фаз (при сварке плавлением) состояние физического контакта легко достигается за счет их высокой подвижности. При любых способах соединения в твердой фазе физический контакт осуществляется за счет пластической деформации приконтактных объемов обоих или одного из соединяемых материалов.

Рассмотренные выше особенности взаимодействия соединяемых материалов в зоне их контакта привели к классификации сварочных процессов, с разделением их на

две основные группы: сварка плавлением и сварка давлением. Представления о механизмах сваривания конструктивных материалов являются основой для развития соответствующих технологий и оборудования, а также рекомендаций по проектированию сварных конструкций.

Цель данной статьи заключается в анализе и сопоставлении особенностей строения и структуры сварных швов, а также оценке возможных направлений развития сварочных процессов в машиностроении и ремонтном производстве.

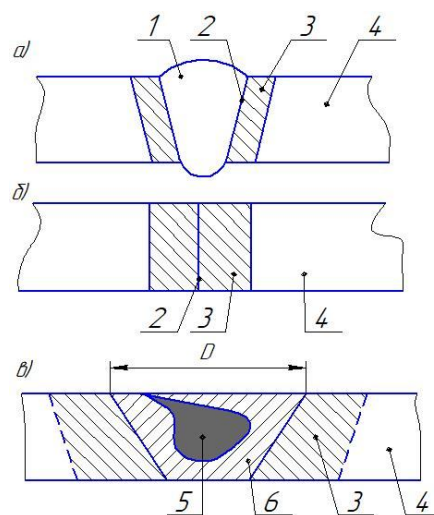
Особенности формирования структуры соединения при сварке плавлением. Формирование сварного соединения при сварке плавлением сопровождается сложными диффузионными процессами в жидкой и твердой фазах, которые приводят к изменению химического состава в различных зонах, выделению или перераспределению примесей и легирующих элементов. Сварные соединения, выполненные сваркой плавлением, можно разделить на несколько зон, отличающихся химическим составом, макро- и микроструктурой, другими признаками [1, 2]: сварной шов, зону сплавления, зону термического влияния и основной металл (рис. 1, а).

Сварной шов характеризуется литой макроструктурой металла. Ему присуща первичная микроструктура кристаллизации, тип которой зависит от условий кристаллизации шва (химического состава шва и условий фазового перехода из жидкого состояния в твердое).

Сварной шов характеризуется литой структурой первичной кристаллизации. Согласно теории гетерогенного зародышеобразования, хорошее смачивание подложки расплавом способствует образованию центров кристаллизации, поскольку подложка содержит частично расплавленные зерна основного металла. В зависимости от формы и расположения кристаллитов затвердевшего металла различают равноосную, столбчатую и дендритную структуру. При равноосной структуре зерна обычно не имеют опре-

деленной ориентации. Такая структура характерна для металла шва при его довольно быстром охлаждении, а столбчатая и дендритная структура — для швов при медленном охлаждении. Направление роста кристаллов связано с интенсивностью отвода теплоты от ванны жидкого металла.

Кристаллы растут перпендикулярно к границе сплавления в направлении, противоположном потоку тепла. Существуют различные классификации сварочных макроструктур, наблюдаемых в процессах сварки плавлением. Практически все макроструктуры характеризуются наличием столбчатой зоны, которая может дополняться центральной зоной равноосных зерен. Поскольку расплав металла при сварке находится в турбулентном движении, существует неподвижный слой жидкого металла по краям ванны. Эта область характеризуется свойствами, отличными от свойств большей части сваренного металла, и может являться местом возникновения микротрещин, а также повышенной коррозионной чувствительности.



1 — сварной шов (а); 2 — зона сплавления (а) или соединения при сварке давлением (б); 3 — зона термического влияния; 4 — прилегающий основной материал; 5 — ядро (в); 6 — зона механотермического влияния (в); D — диаметр заплечика инструмента

Рисунок 1 — Схемы расположения характерных зон сварных соединений

Зона термического влияния (ЗТВ) — участок основного металла, примыкающий к сварному шву, в пределах которого вследствие теплового воздействия источника нагрева протекают фазовые и структурные превращения в твердом металле. В результате этого ЗТВ имеет отличные от основного металла величину зерна и вторичную микроструктуру. Часто выделяют околошовный участок ЗТВ, или околошовную зону (ОШЗ), которая располагается непосредственно у сварного шва и включает несколько рядов крупных зерен, в том числе оплавленных. Металл шва, имеющий литую макроструктуру, и ЗТВ в основном металле, содержащем макроструктуру проката или рекристаллизованную макроструктуру литой или кованой заготовки, разделяются друг от друга поверхностью сплавления. На поверхности шлифов, вырезанных из сварного соединения и подвергнутых травлению реактивами, она при небольших увеличениях наблюдается как линия или граница сплавления.

Зона сплавления (ЗС) — это зона сварного соединения, где происходит сплавление наплавленного и основного металла. В нее входит узкий участок шва, расположенный у линии сплавления, а также оплавленный участок ОШЗ. Первый участок образуется вследствие недостаточно эффективного переноса расплавленного основного металла в центральные части сварочной ванны. Здесь имеет место перемешивание наплавленного и основного металлов в соизмеримых долях. На оплавленном участке ОШЗ возможно появление между оплавленными зернами жидких прослоек, имеющих аналогичный состав. В случае применения разнородных наплавленного и основного металлов (например, аустенитного и перлитного) ЗС отчетливо наблюдается в виде переходной прослойки. Она имеет часто существенно отличающиеся от металла шва и ЗТВ химический состав, вторичную микроструктуру и свойства. Распределение элементов по ширине ЗС имеет сложный харак-

тер, который определяется процессами перемешивания наплавленного и основного металла, диффузионного перераспределения элементов между твердой и жидкой фазами и в твердой фазе на этапе охлаждения.

Основной металл располагается за пределами ЗТВ и не претерпевает изменений при сварке. Может влиять на превращения в ЗТВ в зависимости от его макро- и микроструктуры, способов первичной обработки металла (прокат, литье, ковка, деформирование в холодном состоянии) и последующей термообработки (отжиг, нормализация, закалка с отпуском, закалка со старением и т. п.).

К основным методам сварки плавлением относятся такие, как газовая, термитная, электродуговая, электрошлаковая, плазменная, лазерная, электронно-лучевая и др.

Особенности формирования структуры соединения при сварке давлением. Процесс образования соединения без расплавления соединяемых материалов (в твердой фазе) принято разделять на три основные стадии: образование физического контакта, активация контактных поверхностей и объемное развитие взаимодействия. Физический контакт образуется в результате сближения соединяемых материалов на расстояние, соответствующее расстоянию между частицами при физическом взаимодействии, обусловленном силами Ван-дер-Ваальса, или на расстояние, при котором возникает слабое химическое взаимодействие.

Активация контактных поверхностей сводится к тому, чтобы создать на этих поверхностях такие условия, при которых энергетическое состояние атомов соединяемых материалов в зоне контактирования достигло уровня, необходимого для разрыва старых и образования новых химических связей. Обычно активация контактных поверхностей происходит в результате выхода свежих дислокаций на соединяемые поверхности и образования в этих зонах активных центров взаимодействия. Однако под активными центрами твердофазного взаимодействия пони-

мают более широкий спектр дефектов: дислокации с полем упругих искажений, вакансии, примесные атомы и др., при этом указывается важность и эффективность термического (температурного) канала активации [3, 4]. Третья стадия состоит в развитии взаимодействия как в плоскости контакта (схватывание металлов), так и в объеме зоны контакта. Стадия объемного взаимодействия происходит в результате релаксации упругого поля искажений (в той степени, которая необходима для сохранения образовавшихся связей) и протекания процессов гетеродиффузии. Вопросы активации поверхностей соединяемых металлов и формирования активных центров являются теоретически малоизученными, остается открытым вопрос влияния абсолютных величин и соотношений термического и механического видов энергии на размеры образующихся активных центров. Часто принимают допущение об эквивалентности термического и механического видов энергии, что позволяет рассматривать общую энергию активации как их сумму. С увеличением температуры нагрева роль пластической деформации в образовании сварного соединения снижается [4]. Поэтому принимают допущение, что при достижении температуры плавления механический канал активации не требуется.

Основными разновидностями сварки давлением являются ее такие разновидности как контактная, индукционная с давлением, диффузионная, холодная, взрывом, ультразвуковая, трением и др. К этой группе также относят процессы сварки трением с перемешиванием.

Любой способ сварки должен обеспечить получение неразъемного соединения, обладающего в зависимости от предъявляемых требований высокой прочностью и ударной вязкостью, стойкостью против коррозионного воздействия в различных агрессивных средах, усталостной прочностью при длительных статических и динамических нагрузках, работоспособностью при различных температурно-временных, силовых и других условиях [3].

Крайними случаями соединения в твердой фазе по интенсивности силового воздействия и длительности процесса являются: 1) сварка давлением с подогревом; 2) сварка с высокоинтенсивным силовым воздействием. Все остальные способы расположены между ними. Сварка давлением с подогревом отличается низкой интенсивностью силового воздействия, относительно высокой температурой и большой длительностью процесса. Она является способом, при котором процессы релаксационного характера на стадии объемного взаимодействия могут развиваться до установления равновесия. Сварка с высокоинтенсивным силовым воздействием отличается ничтожно малой длительностью процесса, при которой процессы релаксационного характера на стадии объемного взаимодействия ограничены схватыванием контактных поверхностей без последующего развития в зоне соединения процессов рекристаллизации или гетеродиффузии.

Схема расположения характерных зон соединений при сварке давлением представлена на рисунке 1, б: 2 — зона соединения; 3 — зона термического влияния; 4 — основной материал. Формирование структуры зоны соединения при сварке давлением, особенно с подогревом, связано со следующими особенностями [3]:

1) вследствие геометрической неоднородности соединяемых поверхностей отдельные приконтактные участки (микрообъемы) могут быть значительно деформированы. На них последовательно протекают процессы образования физического контакта, образования межатомных связей и дальнейшего объемного взаимодействия;

2) отдельные микроучастки в зоне соединения могут быть вообще не деформированы, поэтому может наблюдаться широкий спектр деформаций;

3) зона соединения может представлять собой ориентированную в плоскости контакта межзеренную границу, которая содержит поры, несплошности и различные включения (например, оксидов).

Особенности формирования структуры соединения при сварке трением с перемешиванием. Принцип этого процесса заключается в том, что вращающийся рабочий инструмент (бурт со штифтом) медленно погружается в стык двух металлических пластин на глубину, примерно равную толщине кромок между верхней и нижней поверхностями соединяемых деталей и в дальнейшем перемещается вдоль соединения. Тепло, выделяющееся при трении вращающегося бурта и поверхности свариваемых пластин, приводит к локальному нагреву и пластификации материалов ниже температуры плавления. Соединение формируется при условии интенсивного пластического деформирования локальных объемов кромок металлических материалов на стыке свариваемых пластин [5–7].

Строение объема соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием (рис. 1, в) представляет собой несимметричную геометрическую фигуру, в которой выделяются зоны: ядра, механотермического влияния (ЗМТВ), термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ) [5–7].

Зона ядра выделяется конфигурацией следов ротационной мегапластической деформации в виде замкнутых протяженных каналов неправильной формы, по виду похожих на некие струи шириной менее 15 мкм, заполненные мелкими ($1 \pm 0,5$ мкм) равноосными зернами. В области ядра, удаленной от пути движущегося инструмента на расстояние не более 1,5 мм, в каналах зафиксированы разрывы длиной от 50 до 200 мкм межзеренного типа. Такие несплошности рассматриваются как результат локального микроскопического износа схватыванием. Процессы перемешивания и структурообразования в зоне ядра следует рассматривать с учетом положений трибологии.

Зона механотермического влияния (ЗМТВ). Здесь по мере удаления от ядра соединения ширина и протяженность каналов деформации, а также морфология зерен в них монотонно меняются.

Зона термического влияния характеризуется равноосными зернами стабильного (релаксированного) состояния и текстурой, в которой прослеживаются остаточные следы прокатки свариваемых листов. На лицевой поверхности и в объеме соединения границы перехода к ЗТВ выделяются большими градиентами структурных изменений, которые зависят от диаметра вращающегося инструмента, температурного фактора, обусловленного теплофизическими свойствами металла, толщиной соединяемых листов и режимом работы инструмента, а также упруго-пластической аккомодации с металлом из ЗМТВ.

Из-за асимметрии структуры сварного шва в поперечном сечении различают сторону набегания, для которой направление вращения инструмента совпадает с направлением сварки, и противоположную сторону отхода. Каждая зона подвергается разному уровню пластической деформации, что приводит к различиям в микроструктуре. Чтобы получить качественное сварное соединение, необходимо использовать такие параметры сварки, как скорость перемещения рабочего инструмента, скорость вращения и угол наклона инструмента, глубину погружения задней кромки инструмента в соединяемые материалы [8]. 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.

Таким образом, механизм образования физического контакта между соединяемыми поверхностями при сварке трением с перемешиванием существенно отличается от традиционного при сварке давлением. В

сварных соединениях, полученных трением с перемешиванием, отсутствует четко выделенная граница соединения. По аналогии со сваркой плавлением ядро соединения уподобляется сварному шву, однако формируется массопереносом соединяемых материалов вследствие пластической деформации и перемешивания. Эти закономерности позволяют рассматривать процессы получения неразъемных соединений трением с перемешиванием в качестве третьей самостоятельной группы процессов сварки.

Основное внимание авторов многочисленных исследований по проблемам сварки трением с перемешиванием (FSW, СТП) направлено на изучение процессов получения соединений металлов и сплавов на основе алюминия [5–7, 9–16], а также меди, магния, титана и стали [9–16].

Реализация процессов при температурах ниже температуры плавления соединяемых материалов позволяет исключить или минимизировать образование оксидов, хрупких интерметаллических образований, металлургической пористости и трещин, существенных деформаций и остаточных напряжений. 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, 17]. Основными факторами при выборе рабочего инструмента для СТП являются твердость материала заготовок и объем перемешиваемого материала.

В последние годы предпринимаются активные усилия по разработке СТП-процессов для высокотемпературных металлических материалов, прежде всего, титана и титановых сплавов, а также сталей.

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 соединений [9–17].

Теория процессов СТП [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 [18].

Сварка трением с перемешиванием по сравнению с традиционными методами сварки плавлением имеет ряд преимуществ [5, 6, 9, 16, 17, 19]:

- 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.

Выводы. Сопоставление и анализ структуры и строения неразъемных соединений,

полученных сваркой трением с перемешиванием, позволяют выделить в отдельную третью группу сварочных процессов. По характеру преобразования веществ в зоне соединения сварочные процессы следует разделять на три основные группы: сварка плавлением; сварка давлением; сварка перемешиванием в твердой фазе. Актуальной проблемой является развитие теоретических и экспериментальных исследований по разработке теории процессов сварки с перемешиванием в твер-

дой фазе, получения конструкций из различных материалов, детального исследования взаимосвязи режимов сварки с перемешиванием, конструкции рабочего инструмента, механизма движения пластифицированных потоков свариваемых материалов, трибологических и коррозионных характеристик сварных соединений, стойкости сварочного инструмента, разработки и исследования способов управления взаимодействием соединяемых материалов и др.

Список источников

1. Теория сварочных процессов / В. В. Фролов [и др.]. М. : Машиностроение, 1988. 559 с.
2. Петров Г. Л., Тумарев А. С. Теория сварочных процессов. М. : Высш. школа, 1977. 392 с.
3. Каракозов Э. С. Соединение материалов в твердой фазе. М. : Металлургия, 1976. 264 с.
4. Оценка относительной прочности соединения металлов на этапе схватывания при сварке давлением / Г. Р. Латыпова, Р. А. Латыпов, В. В. Булычев, Е. Г. Агеев // *Современные материалы, техника и технологии*. 2015. № 2 (2). С.102–110.
5. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution / A. Heidarzadeh [et al.] // *Progress in Materials Science*. 2021. № 117. 68 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100752
6. Magalhães V. M., Leitão C., Rodrigues D. M. Friction stir welding industrialisation and research status // *Science and technology of welding and joining*, 2017. Vol. 23. Iss. 5. P. 400–409. DOI: 10.1080/13621718.2017.1403110
7. Барахтин Б. К., Высоцкая М. А. Применение системного анализа структуры для оптимизации режимов сварки трением с перемешиванием // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов : межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. Тверь : Твер. гос. ун-т, 2015. Вып. 7. С. 83–96.*
8. Singh Jai, Singh Bikram Jit. 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. Iss. 3. P. 187–202.
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. 1. P. 209–217.
10. Карманов В. В., Каменева А. Л. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва // *Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2012. № 32. С. 67–80.
11. 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 iss. 12. P. 35–38.
12. El-Morsy Abdel-Wahab, Ghanem Mohamed M., Bahaiham Haitham. 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. P. 2493–2498.
13. Tool wear characteristics and effect on microstructure in Ti-6Al-4V friction stir welded joints / A. Fall, M. H. Fesharaki, A. R. Khodabandeh, M. Jahazi // *Metals*. 2016. Vol. 6. No. 275. 12 p.
14. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 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., Mamidala R., Sanders D. G. Friction stir welding of near α and $\alpha + \beta$ titanium alloys: metallurgical and mechanical characterization // *Metals*. 2017. Vol. 7. No. 565. 23 p.

16. *Recent developments and research progress on friction stir welding of titanium alloys: an overview / Sivaji Karna, Muralimohan Cheepu, D. Venkateswarulu, V. Srikanth // IOP conference series: materials science and engineering. 2018. Iss. 330. 16 p.*

17. *Verma S. M., Misra J. P. A critical review of friction stir welding process // DAAAM International scientific book. 2015. P. 249–266.*

18. *Shercliff Hugh R., Colegrove Paul A. Process modeling // Friction stir welding and processing / editors Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney. ASM International, 2007. Ch. 10. P. 187–217.*

19. *Friction stir welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints / F. Micari, G. Buffa, S. Pellegrino, L. Fratini // Procedia Engineering. 2014. Iss. 81. P. 74–83.*

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

Рекомендована к печати к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М., д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ им. профессора В. Я. Седуша ДонНТУ Сотниковым А. Л.

Статья поступила в редакцию 13.10.2023.

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

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

DEVELOPMENT OF WELDING PROCESSES OF STRUCTURAL MATERIALS

The article is devoted to analyzing the conditions for the formation of typical structures of non-detachable joints obtained by different welding methods with different types of transformation of substances in the connection zone. Three types of welding processes are considered: melting welding, pressure welding and friction stir welding. The necessity to improve the classification of welding processes and the identification of methods of friction stir welding into a separate group is shown. The main advantages and disadvantages of methods of friction stir welding are considered.

Key words: zones of welds, formation of bonds between materials to be joined, fusion welding, pressure welding, friction stir welding, stages of formation of welds, welded joints.

References

1. *Frolov V. V. [et al.]. Theory of welding processes [Teoriya svarochnyh processov]. M.: Mechanical Engineering, 1988. 559 p. (rus)*
2. *Petrov G. L., Tumarev A. S. Theory of welding processes [Teoriya svarochnyh processov]. M.: Vyssh. shkola, 1977. 392 p. (rus)*
3. *Karakozov E. S. Material Coupling in Solid Phase [Soedinenie materialov v tverdoj faze]. M.: Metalurgija, 1976. 264 p. (rus)*

4. Latypova G. R., Latypov R. A., Bulychev V. V., Ageev E. G. Assessment of the relative strength of metal compounds at the pressure welding stage [Ocenka odnositel'noj prochnosti soedineniya metallov na etape skhvatyvaniya pri svarke davleniem]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. No. 2 (2). 2015. Pp. 102–110. (rus)

5. 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. 68 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100752

6. Magalhães V. M., Leitão C., Rodrigues D. M. Friction stir welding industrialisation and research status. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2017. Vol. 23. Iss. 5. Pp. 400–409. DOI: 10.1080/13621718.2017.1403110

7. Barakhtin B. K., Vysotskaya M. A. Application of structural system analysis to optimize mixing friction welding modes [Primenenie sistemnogo analiza struktury dlya optimizacii rezhimov svarki treniem s peremeshivaniem]. *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov: mezhvuz. sb. nauch. tr. pod obshchej redakciej V. M. Samsonova, N. Yu. Sdobnyakova*. Tver': Tver' State University, 2015. Iss. 7. Pp. 83–96. (rus)

8. Singh Jai, Singh Bikram Jit. 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. Iss. 3. Pp. 187–202.

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. 1. Pp. 209–217.

10. Karmanov V. V., Kameneva A. L. Friction stir welding of aluminium alloys: nature and specific features of the process, features of the weld seam structure [Svarka treniem s peremeshivaniem alyuminiyevykh splavov: sushchnost' i specificheskie osobennosti processa, osobennosti struktury svarnogo shva]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2012. No. 32. Pp. 67–80. (rus)

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. El-Morsy Abdel-Wahab, Ghanem Mohamed M., Bahaiham Haitham. 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., Fesharaki M. H., Khodabandeh A. R., Jahazi M. Tool wear characteristics and effect on microstructure in Ti-6Al-4V friction stir welded joints. *Metals*. 2016. Vol. 6. No. 275. 12 p.

14. Gangwar K., Ramulu M., Cantrell A., Sanders D. G. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar titanium alloys: TIMET-54M and ATI-425. *Metals*. 2016. Vol. 6. No. 252. 14 p.

15. Gangwar K., Mamidala R., Sanders D. G. Friction stir welding of near α and α + β titanium alloys: metallurgical and mechanical characterization. *Metals*. 2017. Vol. 7. No. 565. 23 p.

16. Sivaji Karna, Muralimohan Cheepu, 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. Iss. 330. 16 p.

17. Verma S. M., Misra J. P. A critical review of friction stir welding process. *DAAAM international scientific book*. 2015. Pp. 249–266.

18. Shercliff Hugh R., Colegrove Paul A. Process modeling. In: Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney editors. *Friction stir welding and processing*. ASM International, 2007. Ch. 10. Pp. 187–217.

19. Micari F., Buffa G., S. Pellegrino S., Fratini L. Friction stir welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints. *Procedia Engineering*. 2014. Iss. 81. P. 74–83.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Yuri Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Complex Machine
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 Machine
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

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