

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 1: ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Показана взаимосвязь процессов расширения современных конструкционных материалов с улучшенными эксплуатационными и другими свойствами с развитием методов их обработки и получения неразъемных соединений, прежде всего сварных. Представлены рекомендации по выбору критериев для комплексного подбора основных материалов конструкций. Описаны ограничения применения традиционных способов сварки плавлением для создания высокотехнологичных конструкций и перспективность более широкого внедрения сварки трением с перемешиванием. Кратко рассмотрены и проанализированы особенности формирования сварных соединений при сварке трением с перемешиванием (СТП) с учетом протекающих тепловых, металлургических, термомеханических процессов, взаимодействия материалов с их схватыванием, а также фазовых и структурных превращений в металлах. Рассмотрены представления о технологической свариваемости при СТП и выборе рациональных режимов сварки. Рассмотрен алгоритм выбора материала конструкции при сварке трением с перемешиванием.

Ключевые слова: *конструкционные материалы, неразъемные соединения, сварной шов, способы сварки плавлением, технологическая свариваемость, технологичность конструкций.*

Введение. Инновационное развитие промышленности сопровождается непрерывно растущей потребностью в более высокопрочных, легких, коррозионноустойчивых и других эффективных материалах с улучшенными физико-химическими и эксплуатационными свойствами. Создание и освоение производства и применения новых конструкционных материалов является одним из важнейших направлений науки и техники. Осваивается производство и расширяется практическое применение металлических сплавов (титана, алюминия, магния, меди, никеля, высокопрочных и нержавеющей сталей и др.), полимерных и композиционных материалов с улучшенными и более высокими эксплуатационными свойствами. Однако при проектировании машиностроительных и иных конструкций проблематичными являются вопросы рационального выбора конструкционных материалов и технологических способов их обработки. Поэтому активно ведутся работы по созданию алгоритмов и компьютерных методик выбора материа-

лов и технологических процессов производства деталей, ориентированных на комплексное проектирование изделий [1]. При проектировании выявляются и конкретизируются конструкторско-технологические, функциональные и технико-экономические требования, рекомендации заказчиков и потребителей изделий. Конструкторы и технологи проводят поиск более эффективных конструкционных материалов и технологических процессов их обработки для повышения конкурентоспособности изделий. Этим обусловлено расширение работ по созданию методик интегрированного подхода к выбору материалов и соответствующих технологий. При инновационном подходе к выбору материалов и технологий с учетом жизненного цикла изделий в организациях возрастает роль накопления и управления знаниями.

Выбор конструкционных материалов должен проводиться с учетом возможности создания конструкций, обладающих требуемыми эксплуатационными свойствами и параметрами с надлежащими количествен-

ными значениями, к которым, например, могут быть отнесены: прочность, плотность, удельная прочность, усталостная прочность, обрабатываемость, теплоустойчивость, трещиностойкость, теплопроводность, износостойкость и многие другие [2]. Критериями для выбора материалов являются свойства, наиболее полно отражающие цели и задачи проектирования конструкции. Например, достижимую прочность конструкции при определенной массе отражает удельная прочность, являющаяся отношением предела прочности материала к его плотности.

Задача рационального выбора материала конструктором весьма трудна, поскольку к настоящему времени разработано и производится громадное их разнообразие. Каждый из этих материалов характеризуется рядом свойств: физических, химических, технологических и иных. Выбор материала для каждого конкретного применения требует поиска и анализа больших массивов данных. Решению этих проблем способствует разработка алгоритмов выбора материалов в процессе проектирования с использованием методов искусственного интеллекта, классификации данных и многокритериальных моделей принятия решений. Основная функция такого алгоритма заключается в ориентации результатов поиска по базам данных таким образом, чтобы принятие решения о выборе материала было максимально простым [1, 2].

Конструкции изделий представляют собой сложные технические системы (ТС), состоящие из большого количества отдельных подсистем и элементов. Многие элементы ТС изготавливают из отдельных деталей и заготовок с неразъемными соединениями между ними. При изготовлении высокотехнологичных изделий во многих отраслях машиностроения широко используются различные способы сварки плавлением и, прежде всего, высококонцентрированными источниками нагрева (плазменная, лазерная электроннолучевая, трением и другие способы сварки). Однако

сварке плавлением присущ ряд недостатков: возникновение высоких остаточных напряжений, приводящих к деформации изделий; пониженная прочность сварных швов (на 10–20 % и более ниже прочности основного металла); термическое разупрочнение свариваемых металлов, снижающее конструктивную прочность изделий; образование дефектов в виде трещин в сварных соединениях ряда высокопрочных термоупрочняемых сплавов; высокие трудозатраты на подготовку сварочных кромок перед сваркой и послесварочную обработку и между проходами; для большого ряда высокопрочных сплавов отсутствует возможность получения качественных сварных соединений и др. Все эти проблемы увеличивают трудоемкость и сроки разработки и подготовки производства изделий, затрудняют применение новых эффективных материалов. Поэтому одним из перспективных направлений технологии изготовления новых видов высокотехнологичных изделий машиностроения является изыскание и разработка прогрессивных способов сварки, способных устранить или уменьшить негативные особенности существующих технологий. К таким способам относится сварка трением с перемешиванием (СТП), запатентованная в 1991 г., интенсивно развиваемая во всех странах с высоким промышленным потенциалом (США, Великобритания, Китай, Индия, Россия и др.).

Применение сварки трением с перемешиванием существенно расширило технологические возможности получения сварных соединений с улучшенными свойствами, в том числе материалов, трудно поддающихся сварке традиционными способами. Это расширяет возможности создания высокотехнологичных сварных конструкций из более эффективных конструкционных материалов. Однако в настоящее время отсутствуют рекомендации по рациональному выбору основных материалов конструкций, получаемых сваркой трением с перемешиванием.

Цель данной статьи заключается в анализе особенностей, преимуществ и недостатков сварки трением с перемешиванием и разработке на их основе рекомендаций по выбору основных материалов проектируемых сварных изделий с учетом их производственной технологичности.

Особенности и преимущества сварки трением с перемешиванием. СТП осуществляется с помощью специального вращающегося фрикционного инструмента, перемещающегося в направлении сварки. Рабочая часть фрикционного инструмента конструктивно состоит из заплечика и наконечника (пина или рабочего стержня), имеющих специальный профиль. Процесс СТП заключается во внедрении наконечника вращающегося инструмента в стык свариваемых деталей до контакта с ними и прижима заплечика и его движения вдоль линии стыка и выхода из стыка заготовок в конце сварного шва [3, 4]. Одновременно с этим заготовки прижимаются к подложке вращающимся заплечиком с необходимой осевой силой, которая в зависимости от толщины заготовок может достигать 100 кН. Трение, возникающее в контакте «заплечик — лицевая сторона деталей и наконечник — материал деталей», приводит к локальному разогреву материала деталей в области сварки и его переходу в высокопластичное состояние. При этом температура материала в области сварки не превышает температуру плавления металла [3–7]. За движущимся фрикционным инструментом образуется сварной шов. При окончании процесса сварки фрикционный инструмент извлекается из деталей. После извлечения инструмента в конце сварного шва образуется выходное отверстие — кратер.

Выполнение процессов сварки трением с перемешиванием и получение при этом сварных конструкций связано с рядом особенностей и отличий от традиционных способов сварки. Рассмотрим их в соответствии с основами теории и практики сварочных процессов.

Источники энергии. СТП относится к механическим процессам, протекающим без предварительного введения в контакт непосредственно свариваемых материалов за счет трения и их пластической деформации.

Тепловые процессы. СТП выполняется с незначительным тепловложением в свариваемые заготовки [6–8]. Теплота генерируется как в тонкой цилиндрической области, примыкающей непосредственно к пину относительно малого диаметра, так и на плоской поверхности заготовок в области контакта с заплечиком относительно большим диаметром. Таким образом, источник тепла распределяется в объеме материала, окружающем пин (зона перемешивания). Примерно около 30 % теплоты выделяется около пина, а 70 % — у рабочей поверхности заплечика. Подводимая к вращающемуся инструменту механическая энергия преобразуется главным образом в тепловую. При стационарных режимах сварки генерируемая теплота практически не зависит от времени, если не учитывать уменьшение вязкости материала при повышении температуры заготовок в области тепловыделения. При нестационарных режимах тепловая мощность является функцией времени, определяемой в основном технологическим режимом. Часть выделяющейся теплоты отводится от заготовок непосредственно через инструмент. Соответствующая доля зависит как от материала свариваемых деталей, так и самого инструмента. Обычно доля отводимой тепловой мощности через инструмент составляет от 15 до 25 % от общей выделяемой мощности [8]. Максимум температуры находится на заднем крае заплечика по отношению к направлению движения инструмента. Кроме того, разница температур на задней и передней кромках заплечика составляет 100 °С, изменение температуры с 450 до 200 °С продолжается за инструментом на расстоянии двух диаметров заплечика.

Металлургические процессы при СТП связаны с такими особенностями, как [4, 6–10]: протекание процесса соединения ма-

териалов в твердой фазе; отсутствие недостатков, связанных с расплавлением и испарением свариваемых металлов; отсутствие необходимости в присадочных материалах и защитных газах; отсутствие сварочной ванны и необходимости ее защиты; отсутствие «выгорания» легирующих элементов; очевидно меньший риск образования трещин и пор в сварном шве; отсутствие дефектов, характерных для сварки плавлением, вызванных затвердеванием металлов (дефекты в виде дендритной структуры, усадочных раковин, непроваров, шлаковых включений, скоплений газовых пор и др.); формирование мелкозернистой рекристаллизованной структуры сварного шва.

Термодеформационные процессы протекают с формированием низких остаточных напряжений, деформации и усадки даже в протяженных сварных швах; практически полное отсутствие коробления и термической деформации сварного изделия во многих случаях исключает необходимость их механической правки [3, 4, 6, 9].

Образование сварных соединений. Процесс СТП является своеобразным механизмом соединения материалов в твердой фазе при снижении разупрочнения металла в зоне термического влияния и уменьшении ее протяженности [9–13]. Он сопровождается кругообразным течением материала, обусловленным геометрией вращающегося инструмента. Массоперенос металла в зоне шва осуществляется подобно тому, как это происходит при экструзии, когда цилиндрический слой материала одной из пластин, смещаясь под действием сил трения, вытесняет слой материала другой пластины. В результате образуется макроструктура, подобная «луковым кольцам». Особенности пластического течения металла в процессе СТП создают предпосылки для образования дефектов строения сварного шва.

Фазовые и структурные превращения в металлах. Температура в зоне сварки и ее распределение по металлу существенным

образом влияют на скоростные и технологические характеристики, а также на процессы массопереноса и фазовые превращения [3, 6–9, 14]. В соединении, полученном СТП, выделяют четыре характерные зоны влияния процесса сварки: 1. Зона интенсивной деформации (зона перемешивания) или «динамически рекристаллизованная область»; 2. Зона термомеханического воздействия (ЗТМВ), где материал испытывает меньшую деформацию и более низкую температуру; 3. Зона термического влияния (ЗТВ) — область, достаточно близкая к сварному шву для термического воздействия, чтобы модифицировать микроструктуру и/или свойства, где видимых следов пластической деформации не обнаруживается; 4. Основной (исходный) металл окружает зону термического влияния, в которой не деформируется и не подвергается воздействию тепла для изменений в микроструктуре или свойствах, и удален от сварного шва. В ЗТМВ и «ядре» шва, помимо нагрева и интенсивной пластической деформации, наблюдаются процессы динамической рекристаллизации, особенно это касается «ядра» шва, представляющего собой динамически рекристаллизованный материал. Плотность дислокаций здесь ниже, чем в зоне термомеханического влияния, зерна близки к равноосным, а их размер значительно меньше, чем в исходном материале.

Технологическая свариваемость материалов при СТП характеризуется такими возможностями, как [6, 7, 9, 15, 16]: получение высокопрочных сварных швов однородных или разнородных металлов и сплавов, включая алюминий, титан, магний, медь, цинк, никель и их сплавы, сталь, в том числе стыковых соединений переменной толщины и др.; высокие прочностные свойства сварного шва (до 100 % прочности основных материалов); сквозное сваривание, обеспечивающее высокую прочность даже в тонких (критических) сечениях; образование соединений между сплавами, которые не могут быть получены при сварке плавлением из-за чувствительности к обра-

зованию горячих трещин, пор и других дефектов; широкая номенклатура свариваемых материалов, трудно свариваемых традиционными способами; улучшение микроструктуры и повышение усталостной прочности сварных соединений по сравнению с традиционными способами; получение сварных нахлестанных швов у заготовок, изготавливаемых с помощью различных технологий (литье, прессование и др.), сварочный шов имеет радиальную структуру. В связи с этим при определенных видах деформации или при работе детали в агрессивной среде может накапливаться усталость сварного шва.

Характерными дефектами, появление которых обусловлено самим механизмом СТП, являются: несплошности материала, связанные с его неполным или недостаточным механическим перемешиванием в «ядре» и в ЗТМВ. Такие дефекты проявляются в виде несплошностей, пустот, внутренних границ раздела с концентрацией на них оксидов. Они могут иметь различный размер и располагаться как в объеме материала, так и выходить на поверхность. Дефекты такого типа снижают длительную прочность, усталостную и коррозионную стойкость соединения. Местом зарождения дефектов другого типа — микротрещин — являются границы между основным материалом и зоной термического влияния, а также между микроструктурными зонами внутри шва. Микротрещины могут распространяться как по нормали к линиям раздела, так и вдоль них, снижая усталостную прочность.

Выбор рациональных режимов сварки. Основными параметрами процесса СТП являются [3, 5–7, 9, 14–17]: частота вращения и скорость перемещения инструмента, нагрузка и геометрия инструмента, а также угол наклона шпинделя к поверхности соединяемых материалов. Выбор геометрии инструмента и параметров процесса сварки оптимизируется для каждого конкретного свариваемого материала. При увеличении частоты вращения увеличивается тепло-

вложение в металл. Отсутствие правильной оценки технологической свариваемости и физико-механических свойств соединяемых сплавов и конструктивных особенностей соединений может приводить к проблеме, связанной с изменением структуры материалов и дефектами в зоне сварки, которые вызывают неизбежное ухудшение механических характеристик сварных соединений.

Экологические преимущества. СТП является экологически чистым технологическим и безопасным процессом для окружающей среды. При его проведении отсутствуют выделения вредных веществ (аэрозолей, дыма, брызг и пр.), а также электромагнитное и радиационное излучение.

Технико-экономические преимущества связаны с такими факторами, как: малый расход энергии (~2,5 % от энергии, потребляемой при лазерной сварке; ~10 % от энергии, потребляемой при электродуговой сварке); отсутствие особых требований к процессу сварки и необходимости в подготовке кромок до сварки и механической обработке после нее; возможность получения сварных швов в любом пространственном положении; высокая размерная стабильность и воспроизводимость процесса; высокая скорость сварки; выполнение сварки без использования присадочных материалов, флюсов и других расходных материалов; отсутствие потребности в защите зоны сварки, за исключением сварки активных металлов; возможность экономии дорогостоящих материалов за счет возможности сваривания разнородных металлов и сплавов; отсутствие влияния человеческого фактора ввиду полной автоматизации процесса и контроля параметров в процессе сварки (не требуется сварочный персонал высокой квалификации); снижение веса сварных конструкций при использовании легких сплавов; быстрая окупаемость, обусловленная низким потреблением энергии и отсутствием расходных материалов; стыки не требуют очень точной подготовки кромок (для листов толщиной 1,6 мм зазор

может быть до 0,2 мм, для листов толщиной 12,7 мм — до 1,25 мм); возможность получения сварных швов за один проход при толщине свариваемых заготовок до 70 мм; в большинстве случаев не требуется дополнительная термическая обработка сварного шва; получение сварных швов большой длины и глубины; простота автоматизации и контроля параметров процесса (полностью автоматизированный повторяемый процесс с ограниченным числом задействованных переменных); сокращение производственного цикла на 50–75 % по сравнению с традиционными видами сварки плавлением

Недостатки СТП. Несмотря на существенные преимущества, способы сварки трением с перемешиванием имеют ряд ограничений для широкого промышленного применения, особенно в условиях малосерийного производства:

– необходимость жесткого закрепления свариваемых деталей (свариваемая деталь должна быть прижата к опорной пластине, чтобы избежать отрыва и стекания материала при погружении и перемещении инструмента) затрудняет создание мобильных устройств для СТП;

– возникновение отверстий в начале и конце сварного шва, что требует использования специальных конструктивно-технологических приемов;

– трудность выполнения некоторых видов сварных соединений, если для их образования требуется присадочный материал (например, угловых швов);

– низкая универсальность. Машины для СТП не обладают достаточной гибкостью, а некоторые сварные конструкции требуют использования дополнительных операций сварки плавлением, обычно ручной. Кроме того, специализированные и специальные машины для СТП, разработанные для конкретных применений, требуют больших капитальных вложений;

– недостаточная стойкость инструмента для СТП материалов с высокой температурой плавления по-прежнему является од-

ной из проблем, ограничивающих использование СТП в некоторых перспективных применениях;

– необходимость проектирования и изготовления специальных инструментов для ряда материалов и видов сварных соединений;

– невозможность сварки материалов, имеющих низкую пластичность, даже при высоких температурах, или теряющих требуемые механические свойства в результате термопластической деформации.

Все эти проблемы постепенно решаются по мере развития теории и практики применения СТП.

Выбор материала сварных конструкций. При конструировании новых и усовершенствовании выпускаемых изделий существенного внимания требуют вопросы обеспечения технологичности их конструкций. Уже на стадии эскизного проектирования и при изготовлении опытных образцов изделия следует подвергать тщательной технологической отработке, особенно при подготовке к их серийному производству. Прогрессивность сварных конструкций характеризуется возможностью уменьшения их металлоемкости при обеспечении требуемых эксплуатационных качеств, более полным использованием свойств материалов. Наряду с преимуществами среди неразъемных соединений сварка имеет некоторые отрицательные особенности. Сварочные процессы оказывают существенное воздействие на исходные свойства материала, напряженное состояние и деформации сварных конструкций, неоднородность свойств материала в зоне сварных соединений и др. Эти особенности влияют на качество, надежность и долговечность изделий.

Создание современных сварных конструкций заданной надежности при минимальной их стоимости требует комплексного конструкторско-технологического проектирования, при котором вопросы прочности и надежности увязываются с особенностями физических явлений, протекающих в металле под воздействием различных технологических процессов, в осо-

бенности сварочных. Технологический процесс сварки вносит существенные изменения в механические характеристики металла шва и зоны, подверженные высокотемпературному нагреву. Использование различных технологий сварки можно снизить механическую неоднородность сварного соединения, но избавиться полностью не удается. Из-за различия в термических циклах ряд сталей может иметь в околошовной зоне повышенную твердость и прочность. ЗТВ — зона высокого отпуска у термически обработанных сталей, металл в данном месте характеризуется пониженной прочностью и твердостью в результате сварочного нагрева. Изменение свойств зависит от марки стали и обработки.

Оптимизация параметров конструкций осуществляется с учетом различных условий и ограничений, а также особенностей, свойственных сварным соединениям, таким как остаточные напряжения, структурные, химические и геометрические неоднородности, наличие дефектов и пр. Проектирование сварного соединения, как указывают авторы работы [18], 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, например на основе алюминия и титана, требуется обширная база инженерных знаний в области материаловедения, химического и структурного анализа, физико-механических испытаний, применение математических мето-

дов и инструментов компьютерного моделирования.

На рисунке 1 приведена упрощенная схема выбора основного материала сварной конструкции на стадии проектирования. Конечной целью такого проектирования является получение сварной конструкции с заданной надежностью. Прежде всего тщательно анализируют конструкторско-технологические, функциональные и технико-экономические требования к проектируемой сварной конструкции, сформулированные на стадии разработки технического задания и эскизного проектирования, и выбирают наиболее важные критерии выбора материалов. Например, актуальной задачей для автомобильной промышленности является снижение массы для повышения эффективности использования топлива и сокращения выбросов CO₂. Детали кузова автомобиля оказывают огромное влияние на общую массу автомобиля, поэтому все чаще переходят к внедрению в автомобильный кузов различных легких материалов: листов алюминиевых и магниевых сплавов, современных высокопрочных сталей и др. Конструкции из нескольких материалов часто являются оптимальным решением. Критерии выбора материала сильно зависят также от стоимости и процесса его изготовления [19, 20]. Высокопрочные стали (HSS) обладают большим потенциалом снижения веса и используются не только для снижения веса кузовов автомобилей, но и для повышения их ударостойкости. При выборе материала учитывают его технологическую свариваемость трением с перемешиванием, а также производственную технологичность изготовления из этого материала составных деталей и заготовок сварной конструкции. При этом используют соответствующие базы данных. После оценки значений параметров свойств сварных соединений их сопоставляют с требуемыми и переходят к следующему этапу проектирования или повторяют действия по выбору материала.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

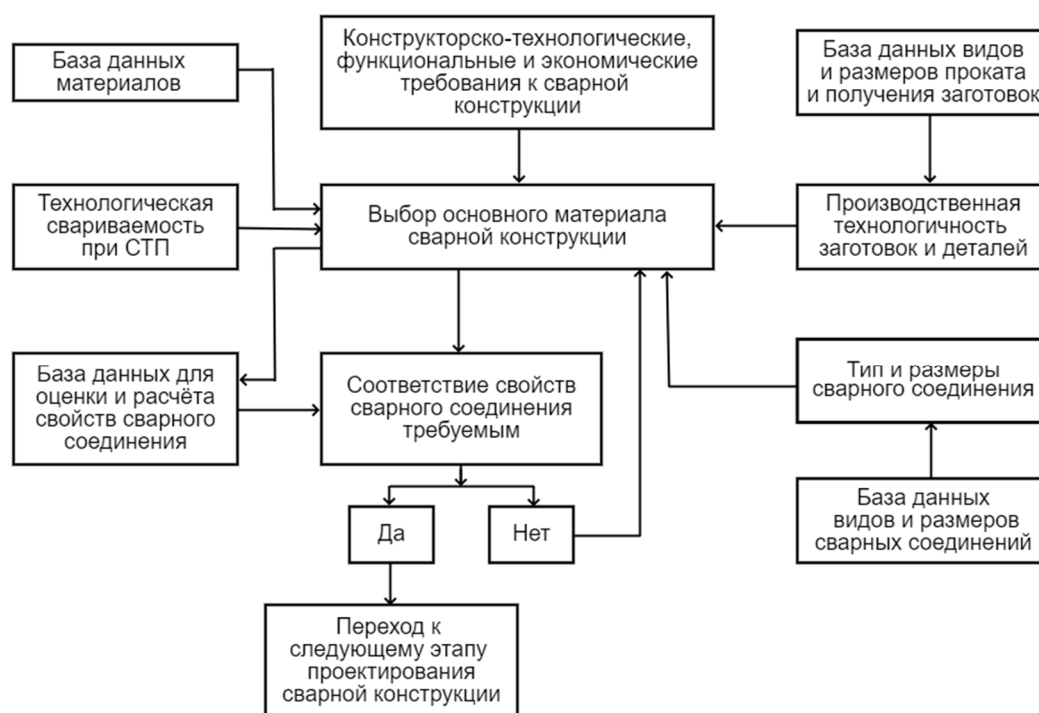


Рисунок 1 — Алгоритм выбора материала конструкции при сварке трением с перемешиванием

Выводы:

1. Рассмотрены особенности выбора современных материалов с улучшенными свойствами для конструкций со сварными соединениями.

2. При выборе материалов соединений, получаемых сваркой трением с перемешиванием, следует учитывать технологиче-

ские особенности, преимущества и недостатки этого способа.

3. Применение сварки трением с перемешиванием открывает широкие возможности внедрения более эффективных материалов с улучшением показателей технологичности сварных конструкций на всех этапах их жизненного цикла.

Список источников

1. Albiñana J. C., Vila C. A framework for concurrent material and process selection during conceptual product design stages // *Materials and design*. 2012. № 41. P. 433–446.
2. Ashby M. F. *Materials selection in mechanical design*. Third ed. Butterworth-Heinemann, 2005. 602 p.
3. 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.
4. Magalhães V. M., Leitão C., Rodrigues D. M. Friction stir welding industrialisation and research status // *Science and technology of welding and joining*, 2018. 23:5. P. 400–409. DOI: 10.1080/13621718.2017.1403110
5. Получение сварного соединения пластин из титановых сплавов методом сварки трением с перемешиванием / И. К. Черных [и др.] // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т. 6. № 1. С. 198–207.
6. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing // *Materials Science and Engineering*. 2005. R 50. P. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
7. Vilaça P., Gandra J., Vidal C. Linear Friction based processing technologies for aluminum alloys: surfacing, stir welding and stir channeling. Chapter 7 // *Aluminium alloys — new trends in fabrication and applications* / ed. by Zaki Ahmad. IntechOpen, 2012. P. 159–197.

8. Стаценко В. Н., Негода Е. Н., Сухорада А. Е. Исследование тепловложения и температурных полей при сварке трением с перемешиванием // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2017. № 3 (32). С. 150–154.

9. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution / A. Heidarzadeh [et al.] // Progress in materials science. 2021. № 117 (100752). P. 68.

10. Сотников А. Л., Муховатый А. А., Орлов А. А. Классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений из меди, полученных сваркой трением с перемешиванием // Сварка и диагностика. 2022. № 3. С. 19–24. DOI: 10.52177/2071-5234_2022_03_19

11. Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools / O. Lorraina, V. Favierb, H. Zahrounic, D. Lawrjaniecd // Journal of materials processing technology. 2010. № 210 (4). P. 603–609.

12. Особенности формирования сварного соединения сплава ВТ14 сваркой трением с перемешиванием с использованием жаропрочного инструмента из сплава ЖС6У / А. И. Амиров [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24. № 4. С. 53–63. DOI:10.17212/1994-6309-2022-24.4-53-63

13. Колубаев Е. А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 1–2.

14. 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.

15. A review on friction stir technology / Shubham Wadekar, Ravi Soladhra, Hemant Barkade, Nilkanth Thombare // International conference on ideas, impact and innovation in mechanical engineering (ICPIIME 2017). 2017. Vol. 5 Iss. 6. P. 1542–1549.

16. Способы повышения качества швов, полученных при помощи сварки трением с перемешиванием / И. Л. Чекалин, И. К. Черных, Е. В. Кривонос, Е. В. Васильев // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 43–46.

17. 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.

18. Modi S., Stevens M., Chess M. Mixed material joining advancements and challenges // Center for automotive research, Ann Arbor, MI. May 2017. 29 p.

19. A review on advanced joining techniques of multi material part manufacturing for automotive industry / Celalettin Yuces, Fatih Karpat, Nurettin Yavuz, Oguz Dogan // International journal of mechanical and production engineering. 2015. Vol. 3. Iss. 5. P. 63–68.

20. Thomas W. M., Nicholas E. D. Friction stir welding for the transportation industries // Materials & Design. 1997. Vol. 18. Nos. 4/6. P. 269–273.

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

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Вишневским Д. А., д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ им. проф. В. Я. Седуша ДонНТУ Сотниковым А. Л.

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 1: GENERAL PRINCIPLES

The interrelation between the expansion processes of modern structural materials and refined operational and other properties, as well as the development of methods for their processing and producing fixed joints, predominantly welded. Recommendations are given for selecting criteria for the complex selection of main construction materials. The limitations of applying the traditional methods of fusion welding in creating high-tech structures and the prospect of large-scale implementation of friction stir welding are described. The article briefly examines and analyzes the uniqueness of weld joints forming during friction stir welding (FSW), considering the flow of thermal, metallurgical, and thermal deformation processes, interactions between materials with their gripping, as well phase and structural changes in metals. The notions about technological weldability at FSW and the choice of rational welding mode are examined. The algorithm of design material selection for friction stir welding is considered.

Key words: building materials, fixed joints, welded joint, methods of fusion welding, operative weldability, machinability of structures.

References

1. Albiñana J. C., Vila C. A framework for concurrent material and process selection during conceptual product design stages. *Materials and Design*. 2012. No. 41. Pp. 433–446.
2. Michael F. Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. Third Edition. Butterworth-Heinemann. 2005. 602 p.
3. 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.
4. Magalhães V. M., Leitão C., Rodrigues D. M. Friction stir welding industrialisation and research status. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018. 23:5. Pp. 400–409. DOI: 10.1080/13621718.2017.1403110
5. Chernyh I. K. [et al.]. Welding of plates made of titanium alloys by friction stir welding [Poluchenie svarnogo soedineniya plastin iz titanovyh splavov metodom svarki treniem s peremeshivaniem]. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2018. Vol. 6. No.1. Pp. 198–207. (rus)
6. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*. 2005. R 50. Pp. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001
7. Vilaça P., Gandra J., Vidal C. Linear Friction Based Processing Technologies for Aluminum Alloys: Surfacing, Stir Welding and Stir Channeling. Chapter 7. *Aluminium Alloys — New Trends in Fabrication and Applications*, ed. by Zaki Ahmad. IntechOpen. 2012. Pp. 159–197.

8. Stacenko V. N., Negoda E. N., Suhorada A. E. Study of heat and temperature fields during friction stir welding [Issledovanie teplovlozheniya i temperaturnykh polej pri svarke treniem s peremeshivaniem]. *Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*. 2017. No. 3 (32). Pp. 150–154. (rus)
9. 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.
10. Sotnikov A. L., Muhovatyj A. A., Orlov A. A. Classification of non-destructive testing methods for welded compounds from copper obtained by friction stir welding [Klassifikaciya metodov nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedinenij iz medi, poluchennykh svarkoj treniem s peremeshivaniem]. *Welding and Diagnostics*. 2022. No. 3. Pp. 19–24. (rus) DOI: 10.52177/2071-5234_2022_03_19
11. Lorraina O., Favierb V., Zahrounic H., Lawrjaniec D. Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. No. 210 (4). Pp. 603–609.
12. Amirov A. I. Features of BT14 alloy weld joint formation by friction stir welding using heat-resistant tool made of ZhC6U alloy [Osobennosti formirovaniya svarnogo soedineniya splava VT14 svarkoj treniem s peremeshivaniem s ispol'zovaniem zharoprochnogo instrumenta iz splava GS6U]. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2022. Vol. 24. No. 4. Pp. 53–63. (rus) DOI:10.17212/1994-6309-2022-24.4-53-63
13. Kolubaev E. A. Features of the weld joint structure formation, obtained by friction stir welding [Osobennosti formirovaniya struktury svarnogo soedineniya, poluchennogo svarkoj treniem s peremeshivaniem]. *Modern Problems of Science and Education*. 2013. No. 6. Pp. 1–2. (rus)
14. Barahtin B. K., Vysockaya M. A. Application of structural system analysis to optimize friction stir welding modes [Primenenie sistemnogo analiza struktury dlya optimizacii rezhimov svarki treniem s peremeshivaniem]. *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials: intercollegiate proceedings. Under the general editorship of Samsonova V. M., Sdobnyakova N. Yu. Tver : Tver State University, 2015. Iss. 7. Pp. 83–96. (rus)*
15. Shubham Wadekar, Ravi Soladhra, Hemant Barkade, Nilkanth Thombare. A Review on Friction Stir Technology. *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering (ICIIME 2017)*. Vol. 5. Iss. 6. Pp. 1542–1549.
16. Chekalin I. L., Chernyh I. K., Krivonos E. V., Vasil'ev E. V. Methods for improving the quality of seams obtained by friction stir welding [Sposoby povysheniya kachestva shvov, poluchennykh pri pomoshchi svarki treniem s peremeshivaniem]. *Omsk scientific bulletin*. 2017. No. 5 (155). Pp. 43–46. (rus)
17. Bojcov A. G., Kachko V. V., Kuricyn D. N. High speed friction stir welding of aviation materials and structures [Vysokoskorostnaya svarka treniem peremeshivaniem aviacionnykh materialov i konstrukcij]. *Metalloobrabotka*. 2013. No. 5–6 (77–78). Pp. 35–42. (rus)
18. Modi S., Stevens M., Chess M. Mixed Material Joining Advancements and Challenges. *Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI. May 2017. 29 p.*
19. Celalettin Yuce, Fatih Karpat, Nurettin Yavuz, Oguz Dogan. A Review On Advanced Joining Techniques Of Multi Material Part Manufacturing For Automotive Industry. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*. 2015. Vol. 3. Iss. 5. Pp. 63–68. ISSN: 2320–2092.
20. Thomas W. M., Nicholas E. D. Friction stir welding for the transportation industries. *Materials & Design*. 1997. Vol. 18. Nos. 4/6. Pp. 269–273.

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

МАШИНОСТРОЕНИЕ

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