

На правах рукописи



Рзаев Радмир Адильбекович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ
С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ
ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ ШИН**

2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград, 2025

Работа выполнена на кафедре «Технология материалов и промышленной инженерии» Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
ГУРЕВИЧ Леонид Моисеевич

Официальные оппоненты: **ЧУМАЕВСКИЙ Андрей Валерьевич,**
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
«Лаборатория локальной металлургии в аддитивных технологиях» ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского отделения РАН (г. Томск).

ПРИЙМАК Елена Юрьевна,
кандидат технических наук, заведующий лабораторией
металловедения и термической обработки
АО «Завод бурового оборудования» (г. Оренбург).

Ведущая организация Калужский филиал ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (г. Калуга).

Защита состоится «26» декабря 2025 г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.282.02, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета, по адресу: 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета и на сайте www.vstu.ru по ссылке:
<https://www.vstu.ru/upload/iblock/e5a/e5a3261899e74d7cefedb37d9cb88673.pdf>

Автореферат диссертации разослан «31» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного

совета



Хаустов Святослав Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. В современной промышленности нашли широкое применение медные и алюминиевые сплавы, отличающиеся коррозионной стойкостью, пластичностью, высокой теплопроводностью и электропроводностью. Одним из примеров использования соединения алюминия и меди являются электромонтажные шины в шинопроводах трансформаторной подстанции. Существуют разъемные (болтовые) и неразъемные (сварка) способы соединения шин. Недостатком болтовых соединений меди и алюминия является ухудшение контакта с течением времени, приводящее к росту потерь электрической энергии. Методы сварки (сварка плавлением или давлением), а также пайка имеют ряд недостатков, к которым относятся образование оксидов (Al_2O_3 , Cu_2O), интерметаллидных фаз (AlCu , Al_2Cu , Al_4Cu_9 и Al_2Cu_3) и различных дефектов.

Альтернативой указанным методам является твердофазный способ сварки трением с перемешиванием (СТП), который позволяет соединять разнородные материалы с аномально различающимися физико-химическими и механическими свойствами без отмеченных недостатков. Поэтому данный метод в настоящее время интенсивно развивается.

Приоритетные работы по СТП относятся к 1965 г., когда было зарегистрировано авторское свидетельство СССР № 195846 «Способ сварки металлов трением» (Клименко и др.), а позднее опубликован патент Великобритании (Thomas et al., 1991).

Несмотря на более чем тридцатилетний период освоения и промышленного внедрения, СТП развивается преимущественно по пути совершенствования конструкций оборудования и инструмента, что видно на примере работ Р. О. Кайбышева, Р. Р. Котлышева, В. В. Апрощенко, А.А. Чуларис, Ю. Г. Людмирского, М. М. Штрикмана, С. Ю. Миронова, R. S. Mishra, I. Galvao и др. Вне поля зрения исследований остается много вопросов, связанных с процессами образования сварных соединений в однородном, а тем более в разнородных сочетаниях, что ограничивает технологические возможности.

Актуальность диссертационной работы также подтверждается ее выполнением в соответствии с грантом РФФИ № 23-29-10129 «Формирование микроструктуры сварных соединений алюминиевых и медных сплавов с помощью сварки трением с перемешиванием» (2023–2024 гг.).

Цель и задачи работы. Повышение прочности соединений «алюминий – медь», полученных сваркой трением с перемешиванием, за счет совершенствования технологических режимов на основе изучения механизмов формирования структуры и механических свойств при различных конструктивно-технологических параметрах.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Установлено влияние параметров сварки трением с перемешиванием на прочностные характеристики сварного соединения, возникновение дефектов и образование интерметаллидных фаз.

2. Выявлены пути предотвращения возникновения и роста интерметаллидных фаз (ИМФ) в сварном шве разнородных металлов.

3. Создана компьютерная модель, описывающая динамику изменения температурного поля и формирование дефектов в сварном соединении при СТП алюминия с медью.

4. Разработана методика расчета основных параметров режима СТП на основе тепловой модели, учитывающей физико-механические свойства свариваемых разнородных материалов.

5. Определены оптимизированные режимы сварки трением с перемешиванием алюминия с медью.

Научная новизна работы заключается в выявлении закономерностей формирования структуры зон сварного соединения алюминия с медью и влияния параметров режимов сварки трением с перемешиванием на их свойства.

Показано, что равнопрочность сварного соединения алюминия и меди реализуется при структуре шва из чередующихся прослоек алюминия, меди и интерметаллидных фаз (Al_2Cu и Al_4Cu_9) толщиной не более 2–5 мкм, формирующихся в диапазоне значений линейной скорости сварки 25–41 мм/мин и частоты вращения инструмента 800–1000 об/мин, при которых время пребывания металлов в центральной зоне и в зоне термомодеформационного воздействия соответствует окончанию латентного периода образования интерметаллидов.

Установлено, что смещение оси вращения инструмента в сторону меди на 0,5–1,0 мм способствует увеличению скорости перехода ее в сверхпластичное состояние, позволяет увеличить линейную скорость сварки и тем самым уменьшить погонную энергию. В результате тепловложение в свариваемые кромки выравнивается, предотвращая локальный перегрев и рост размера рекристаллизованных зерен и создавая условия для достижения максимальных значений механических свойств в стыковом соединении меди и алюминия.

Теоретическая значимость. Результаты проведенных в работе исследований расширяют представления о структурно-фазовых превращениях в соединениях алюминия и меди, полученных сваркой трением с перемешиванием, при термомодеформационных воздействиях инструмента в зонах сварного шва. Полученные в работе результаты объясняют картину распределения интерметаллидов в ядре и зоне термомодеформационного воздействия и факторы, влияющие на рост интерметаллидных слоев.

Практическая значимость. Установлена связь параметров процесса СТП с показателями механических свойств сварных соединений разнородных металлов с ограниченной взаимной растворимостью; показана возможность использования конструкторско-технологических приемов для подавления образования ИМФ в сварном шве.

Создана компьютерная модель, позволяющая спрогнозировать температурные поля и формирование дефектов при СТП алюминия с медью. Построены математические модели расчета температурного поля и термических циклов, рекомендуемых для СТП разнородных металлов для стыковых швов.

Разработана методика расчета параметров режима СТП на основе тепловой модели, учитывающей физико-механические свойства материалов, обеспечивающая качество сварного шва, близкое по механическим свойствам к свариваемым металлам. Технология получения биметаллических пластин из алюминия АД1 и меди М1 с использованием СТП апробирована на ООО НПП «СФО-АСТРА» и ООО «Стройспецмонтаж», передана для внедрения. Измерение падения напряжения на шине, полученной с помощью сварки трением с перемешиванием, показала уменьшение напряжения в зоне контакта более чем в 2 раза по сравнению с показателями для болтовых соединений.

Результаты диссертационного исследования и расчеты параметров СТП послужили основой для разработки технологии получения разнородных соединений «алюминий – медь».

Разработаны способы подготовки поверхности торцов разнородных соединений для СТП (патенты РФ № 2720018 от 23.04.2020, № 2021119166 от 01.08.2022, № 2021119168 от 01.08.2022, № 2023114397 от 06.12.2023).

В ходе исследований разработаны компьютерные программы для расчета температурной динамики при СТП: плоских однородных образцов (св-ва о госрегистрации программы для ЭВМ № 2016618247 от 25.07.2016, № 2016615802 от 25.07.2016); биметаллических и нахлесточных соединений (св-ва о госрегистрации программы для ЭВМ № 2016660936 от 23.09.2016 и № 2020660837 от 14.09.2020), позволяющие оперативно решать технологические задачи.

Методология и методы исследования. Исследование носит комплексный характер и основано на принципах эмпирического подхода во взаимосвязи с математическим моделированием. При решении поставленных задач применяли электронно-микроскопические (растровый сканирующий микроскоп “FEI VERSA 3D”) исследования, в том числе с применением метода дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD). Распределение твердости в зонах шва оценивали методом Виккерса (твердомер “Buehler “Micromet-5103”). Механические испытания сваренных образцов выполнялись на разрывной машине Р-5 при комнатных температурах. Рентгеноструктурный анализ макрошлифов проводили на рентгеновских дифрактометрах “Siemens D-500” и “Bruker D8 Advance Eco”. Для измерения температурных циклов в зонах сварного шва использовали хромель-алюмелевые термопреобразователи ЭДС (термопары) типа ГТХА-0,8-500 с диаметром проволоки 0,8 мм (ГОСТ 6616-74) и диапазоном рабочих температур $-40...+1200$ °С, обработку полученных термических циклов выполняли в ПО “PowerGraph 3 Pro”. Для оценки энергетических параметров процесса СТП использовалось разработанное устройство для измерения силы тока и напряжения, а для формирования графика зависимости потребляемой мощности двигателя станка от времени сварки использовалась программа “Sensor”. Для измерения сил и крутящего момента в процессе СТП применяли вращающийся датчик четырёхкомпонентный М44 с выводом данных на персональный компьютер. Компьютерное моделирование распределения температуры и свариваемых материалов в сварном шве осуществляли в ПО “SIMULIA/Abaqus методом CEL”. Для определения наличия внутренних дефектов в сварном шве проводился рентгенографический контроль с помощью дефектоскопа «Арина-3» («Сарма-500»).

Положения, выносимые на защиту:

1. Основные закономерности формирования структуры и свойств зон в сварных соединениях алюминия и меди, полученных с помощью сварки трением с перемешиванием.
2. Методика расчетов режима СТП для стыковых соединений (алюминий – медь), позволяющая корректировать расчетные значения скорости сварки продукции предприятия.
3. Технологические приемы СТП для предотвращения образования и роста интерметаллидных фаз.
4. Компьютерная модель распределения температуры и материалов в свариваемых металлах при СТП соединений АД1 и М1 с использованием трехмерной конечно-элементной модели, основанной на подходе связанного Эйлера – Лагранжа (CEL).

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается применением современных методов исследования, необходимым

и достаточным количеством экспериментального материала для корректной статистической обработки, сопоставлением полученных результатов с данными других авторов, совпадением теоретических расчетов и экспериментально полученных результатов.

Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных, всероссийских и региональных научно-технических конференциях: Международной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Тольятти, май 2015), международных научно-инновационных молодежных конференций «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (Тамбов, 2016, 2017), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2017» (Севастополь, сентябрь 2017), X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, сентябрь 2017), Международной научно-технической конференции «Теория и практика сварочного производства 2018» (Ростов-на-Дону, октябрь 2018), Научно-практической конференции «Патоновские чтения – 2018: Повышение эффективности сварочного производства» (Ростов-на-Дону, ноябрь 2018), Научном симпозиуме технологов-машиностроителей (с международным участием) «Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (п. Дивноморское, октябрь 2019), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2020» (Севастополь, сентябрь 2020), Международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы» (Ростов-на-Дону, май 2021), ежегодных внутривузовских конференциях ВолгГТУ 2022–2025 г.

Личный вклад автора в опубликованных единоличных и в соавторстве работах состоит: в постановке целей и задач исследований, в разработке методик экспериментов, в анализе и обобщении экспериментальных данных, в разработке компьютерных моделей температурной динамики и образования дефектов для разнородных стыковых соединений, в разработке технологии получения стыковых соединений разнородных материалов.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 62 работы, в том числе 24 статьи, индексируемые в базах Scopus и Web of Science, 21 статья в журналах, рекомендованных ВАК, также получены четыре патента РФ на изобретение и четыре свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованной литературы, включающий 188 источников. Основная часть работы содержит 167 страниц машинописного текста, 118 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность исследования, определены цели и задачи работы, показаны ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе описаны принципиальная схема и технология СТП разнородных стыковых соединений. Проанализированы преимущества и недостатки способа СТП. Представлен литературный обзор влияния параметров СТП (частота вращения,

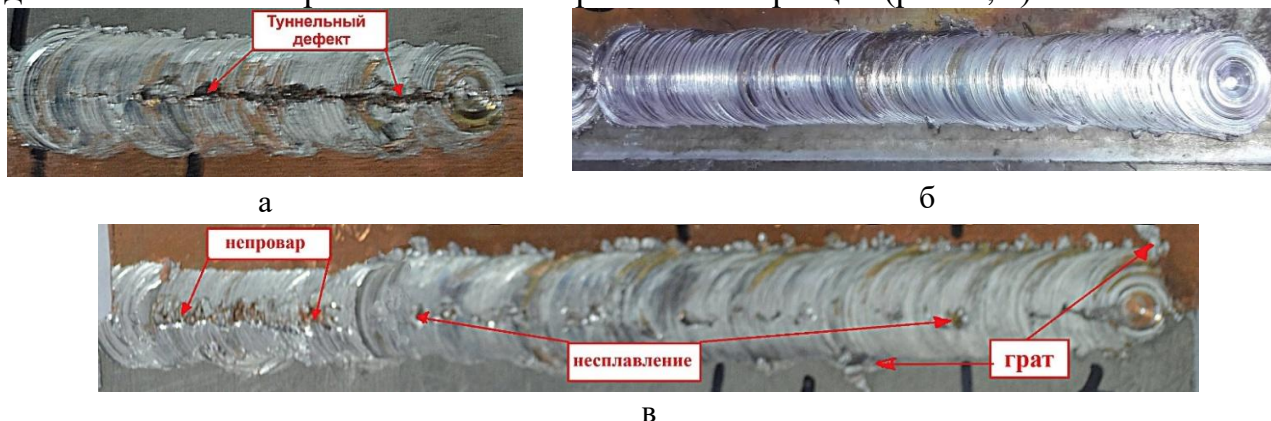
скорость сварки и др.) на механические свойства сварных швов алюминия и меди. Рассмотрены вопросы образования ИМФ при СТП алюминия с медью, которые могут оказывать отрицательное влияние на механические свойства сварных швов. Показано, что их зарождение и рост – это термически активированный процесс, который можно регулировать путем дозирования вводимой энергии. Рассмотрены методы моделирования температуры и деформации в сварном шве при СТП. Результаты анализа литературных данных показали пути использования технологических приемов и условий получения бездефектных разнородных сварных соединений.

Во второй главе приведены теплофизические и механические свойства, химический состав свариваемых материалов. Описаны основные методики и оборудование для исследования структуры и свойств сварного разнородного соединения. Приведены разработанные методики и аппаратные комплексы для исследования термических циклов и энергетических характеристик процесса СТП. Описана компьютерная модель расчета распределения температуры и материала в сварном шве, использующая связный метод Эйлера – Лагранжа построения конечно-элементной сетки (CEL). Выбрана матрица параметров СТП для проведения экспериментальных исследований.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования влияния режимов СТП (частоты вращения инструмента в диапазоне 800–1000 об/мин, скорости сварки 25–63 мм/мин, смещения инструмента до 3 мм от линии соприкосновения свариваемых пластин, угла наклона и величины заглубления инструмента) на механические свойства сварного соединения АД1 и М1; аксиальное усилие и тепловая мощность, генерируемую СИ; динамика температуры и распределение свариваемых металлов в зонах шва.

Исследования показали, что на образование сварного соединения оказывает влияние взаимное расположение деталей из разнородных материалов и вращающегося инструмента. Допустимый внешний вид шва формировался только при расположении медного образца на набегающей стороне шва.

Частота вращения СИ оказывает влияние на величину генерируемой тепловой энергии при его трении о поверхность свариваемых металлов, и, следовательно, на динамику достижения сверхпластичного состояния (СПС) металлов в области шва. Зависимость внешнего вида поверхности сварных швов, полученных при варьировании скорости вращения инструмента от 800 до 1000 об/мин и фиксированной скорости сварки 25 мм/мин, показана на рисунке 1. Из-за недостатка выделившейся при 800 об/мин тепловой энергии на поверхности шва наблюдается туннельный дефект вдоль плоскости соприкосновения свариваемых образцов (рис. 1, а).



**Рис. 1 – Внешний вид сварных швов (25 мм/мин, $\alpha = 3^\circ$, смещение 1 мм на медь):
а – 800 об/мин; б – 900 об/мин; в – 1000 об/мин**

При минимальной частоте вращения СИ (800 об/мин) количество выделяемой погонной теплоты невысоко, что приводит к недостаточному прогреву деталей и возникновению поверхностных туннельных дефектов (рис. 1, а). На поверхности шва при 900 об/мин (рис. 1, б) визуально наблюдается одинаковый по всей длине шаг чешуи без дефектов. С увеличением скорости вращения СИ до 1000 об/мин (рис. 1, в) на поверхности шва формируются участки несплавления и выдавленный грат по обеим сторонам сварного соединения.

В разнородных соединениях, полученных СТП, обычно выделяют три характерные зоны, обозначенные пунктирными линиями (рис. 2): ядро (ЯСШ) с интенсивной пластической деформацией металлов; зона термодеоформационного воздействия (ЗТДВ) с меньшими величинами деформации при более низких температурах; зона термического влияния (ЗТВ), где изменение структуры происходит только за счёт воздействия температурных полей.

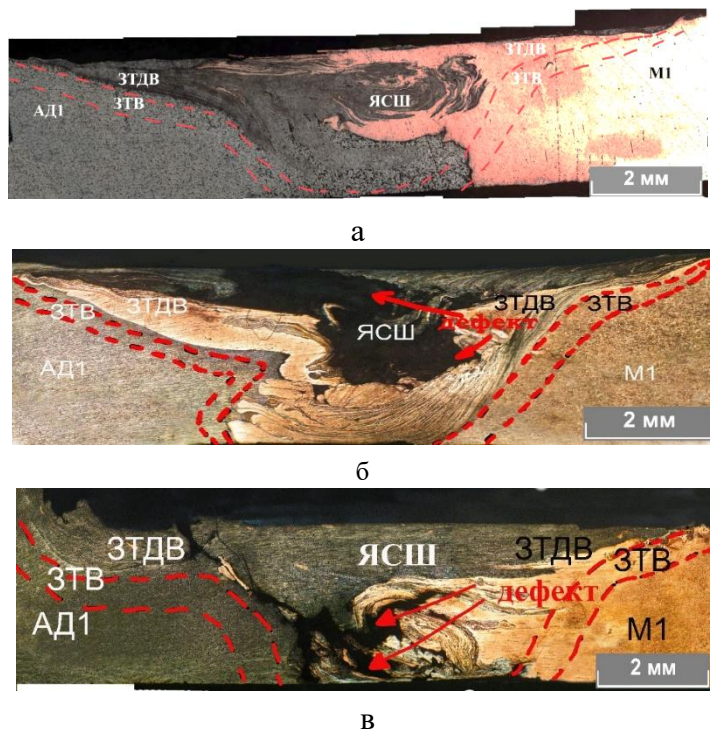


Рис. 2 – Макроструктуры темплетов швов (25 мм/мин, 30°, на медь 1 мм): а – 900 об/мин; б – 800 об/мин; в – 1000 об/мин

При 900 об/мин ЯСШ состоит из почти равновеликих объемов алюминия и меди, в структуре ядра множество вихреподобных образований, сформировавшихся в результате сдвигово-поворотных воздействий СИ. Четкую межзонную границу можно наблюдать в области перехода от ядра к меди, так как СИ изначально был смещен на 1 мм в сторону М1 и большую часть времени контактировал именно с ней (рис. 2, а). При значениях скорости вращения 800 об/мин медный материал не достигал температуры СПС, происходило вырывание вытянутых вдоль направления вращения СИ фрагментов меди шириной от 12 до 20 мкм, наблюдающихся на краю ЯСШ со стороны алюминия (рис. 2, б).

При увеличении скорости вращения СИ до 1000 об/мин происходил перегрев металлов в области шва, приводящий к выдавливанию пластифицированного материала в виде граа. Дефицит металла создал условия для возникновения туннельного дефекта, приводящего к снижению прочности разнородных сварных соединений. На макрошлифе хорошо заметен поток медных прослоек, направленных в сторону алюминия в ЗТДВ, где высокие значения температуры облегчают процесс миграции ламельных потоков сверхпластичных разнородных металлов за счет воздействия движущегося СИ (рис. 2, в).

При СТП со скоростью вращения инструмента 900 об/мин ИМФ образовывались внутри алюминия, а в медном слое они практически отсутствовали (рис. 3, а). Интерметаллиды слоистого строения формируются в поверхностных участках шва в области контакта с заплечиком. В местах перегиба контакта металлов возникают локальные линзовидные интерметаллиды. Наименее вероятное место образования ИМФ – корневая часть шва из-за низкого термического воздействия пина.

Дисперсные интерметаллидные включения толщиной не более 1–5 мкм способны тормозить перемещение дислокаций и являются упрочнителями. Распределение прослоек интерметаллидов, сформировавшихся при длительном термодетонационном воздействии СИ в области контакта с заплечиком и в местах торможения микропотоков разнородных металлов, показано на рисунке 3.

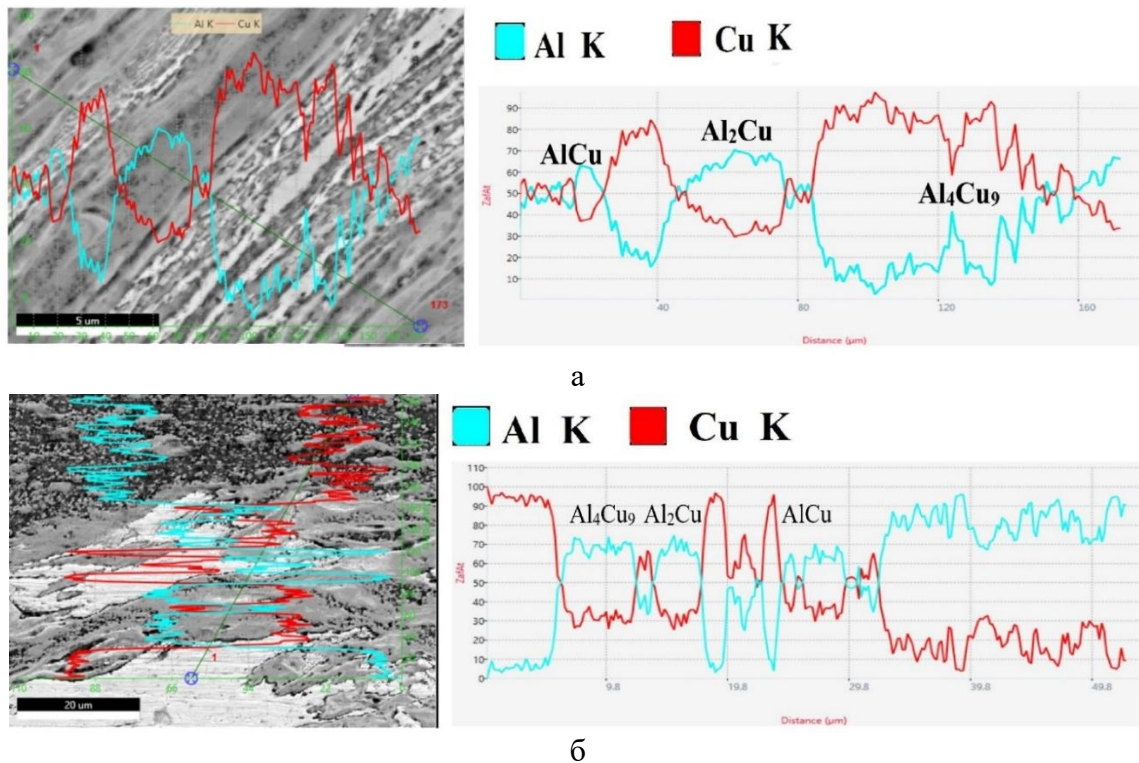


Рис. 3 – Структура ЯСШ со стороны меди и изменение содержания меди и алюминия вдоль линии сканирования (25 мм/мин, 3°, на медь 1 мм): а – 900 об/мин; б – 1000 об/мин

На рисунке 3, а мы наблюдаем интерметаллидные слои (ИМС) с толщиной не более 2,7 мкм, которые не ухудшают механические свойства шва. При толщине более 5 мкм происходит охрупчивание шва. Интерметаллидные прослойки (ИМП) являются источником зародышей микротрещин, имеющих тенденцию к росту и распространению на соседние участки сварного шва. При скорости вращения 1000 об/мин происходит рост ИМС до 8–10 мкм в ЗТДВ со стороны меди (рис. 3, б).

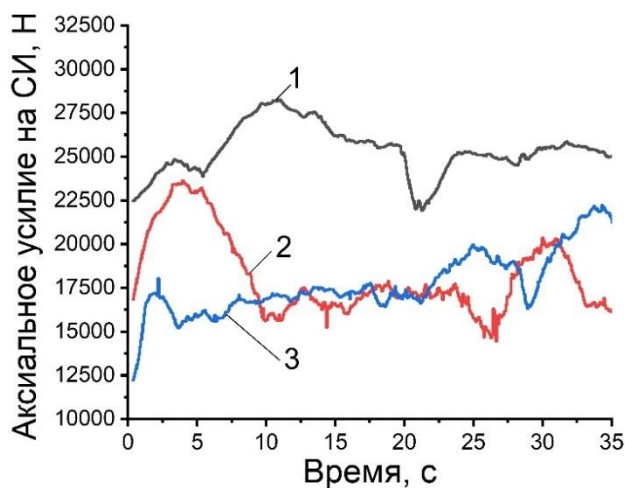


Рис. 4 – Зависимость вертикальной составляющей усилия при скорости сварки 25 мм/мин и угле наклона 3° от частоты вращения СИ: 1 – 800 об/мин; 2 – 900 об/мин; 3 – 1000 об/мин

Исследования зависимости действующего на инструмент аксиального усилия (F_x) от времени при скорости сварки 25 мм/мин (рис. 4) показали, что при постоянной скорости перемещения инструмента F_x увеличивается по мере уменьшения скорости вращения инструмента (рис. 4). Максимальное значение F_x составляло 28,8 кН при частоте вращения 800 об/мин. Увеличение частоты вращения инструмента до 900 и 1000 об/мин приводило к снижению усилия на 15 и 40 %

соответственно по сравнению с максимальной аксиальной силой, возникающей при 800 об/мин.

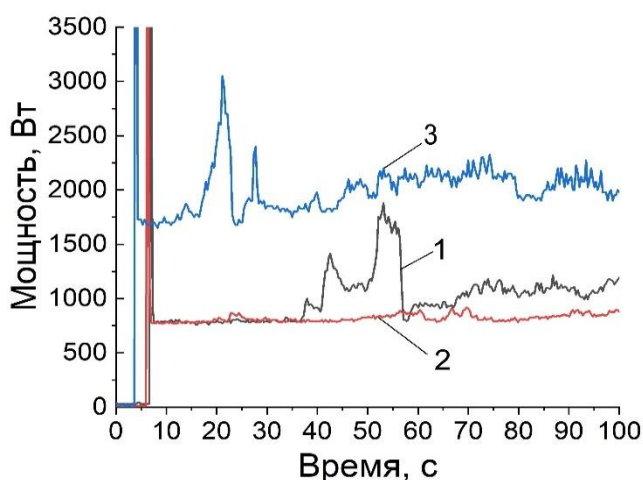


Рис. 5 – Зависимость генерируемой мощности при скорости сварки СИ 25 мм/мин (угол наклона 3°): 1 – 800 об/мин; 2 – 900 об/мин; 3 – 1000 об/мин

Измерение генерируемой СИ мощности показывает ее падение при переходе свариваемых металлов в СПС (рис. 5). При частоте вращения СИ 800 об/мин (кривая 1, рис. 5) потребляемая мощность снижалась до 650 Вт, зафиксированы кратковременные участки увеличения мощности на 10–35 %, так как свариваемые материалы не успевали перейти в СПС. В этом случае возникала необходимость соответствующего снижения скорости сварки. При частоте вращения 900 об/мин величина потребляемой мощности находилась в интервале от 700 до 750 Вт, а при 1000 об/мин – от 1700 до 2500 Вт (кривые 2 и 3). На кривой изменения мощности 2 отсутствуют значительные всплески, что свидетельствует о достаточности погонной тепловой энергии для стабильного перевода в СПС.

Изменения температурных полей в меди и алюминии различны: температура в М1 примерно на 80 °С выше, чем в АД1, при этом более высокая скорость охлаждения меди (рис. 6, б) обусловлена ее большей теплопроводностью. При частоте вращения инструмента 800 об/мин максимальная температура в меди составляла 491 °С, что ниже температуры перехода в СПС. С увеличением частоты вращения СИ от 800 до 1000 об/мин происходило возрастание максимальной температуры в зоне пина от 380 до 550 °С.

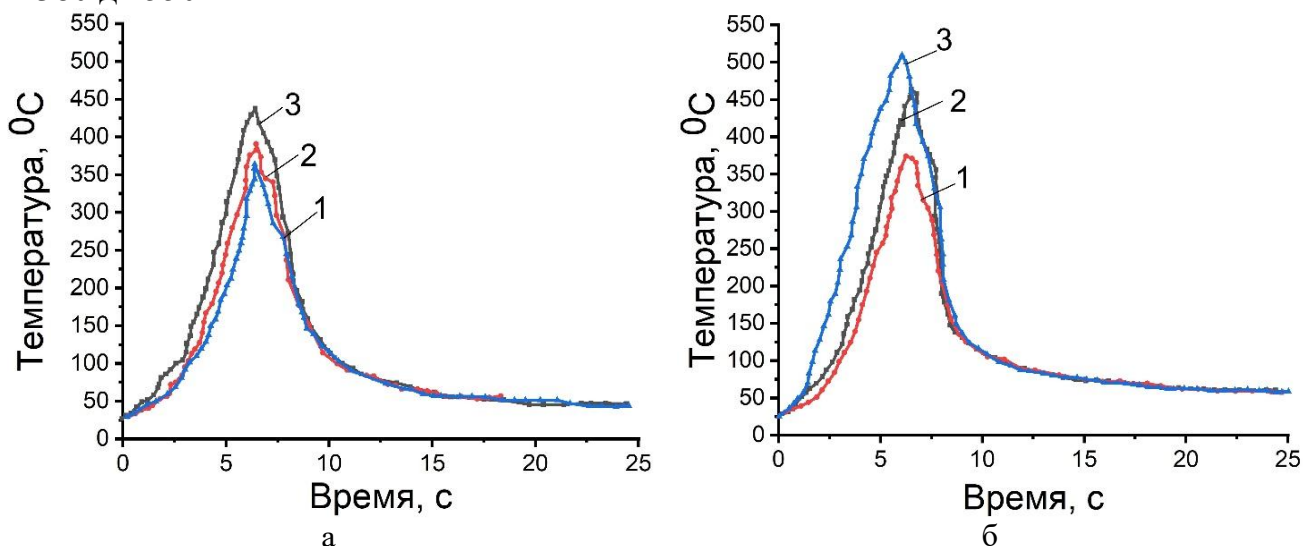


Рис. 6 – Температурные циклы СТП со стороны алюминия (а) и меди (б) при параметрах сварки (25 мм/мин, 3°): 1 – 800 об/мин; 2 – 900 об/мин; 3 – 1000 об/мин

Время пребывания участков сварного соединения выше температуры начала образования интерметаллидов (350 °С) значительно меньше продолжительности термического цикла (25 с). Кратковременность воздействия высокой температуры (рис. 6, а и б) позволяет уменьшить толщину формирующихся ИМП (табл. 1).

Таблица 1 – Зависимость объемной доли ИМФ и размеров ИМС от скорости вращения СИ

Скорость вращения СИ, об/мин	Зона сварного шва	Объемная доля ИМФ, %	Размер ИМС, мкм
800	Центр	15,4	1,3–2,0
	Со стороны алюминия	11	1,2–2 (кусочки меди 12–20)
	Со стороны меди	8	0,5–1,0
900	Центр	19,3	2,1–4,0
	Со стороны алюминия	12,3	2,2–5,0
	Со стороны меди	9,6	2,8–4,0
1000	Центр	23,4	1,2–12,5
	Со стороны алюминия	16,3	0,4–10,1
	Со стороны меди	12,5	1,4–20,0

Максимальное содержание хрупких прослоек ИМП, чередующихся с пластичными металлами в слоистой структуре, характерно для зоны со стороны алюминия, по объему они не превышали 12,3 об.% при 900 об/мин. Большая концентрация ИМФ была в центральной части ЯСШ (19,3 об.%, толщина слоев 2,1–4,0 мкм). С уменьшением частоты вращения до 800 об/мин происходило снижение концентрации интерметаллидов на 6 и 13 % со стороны алюминия и меди в ЗТДВ по сравнению с 900 об/мин (табл. 1). Исследование фазового состава шва при СТП АД1 и М1 при 1000 об/мин показало, что в центре соединения образуется больше ИМФ 23,4 об.% и происходит рост ширины слоев до 12,5 мкм. Со стороны алюминия и меди содержание интерметаллидов составляло 16,3 и 12,5 об.%. Кроме того, происходил рост ИМС, особенно со стороны меди (до 20 мкм) и алюминия (до 10,1 мкм). Увеличение объемной доли ИМФ при 1000 об/мин в центре шва привело к разрыву образца при проведении механических испытаний по ядру шва.

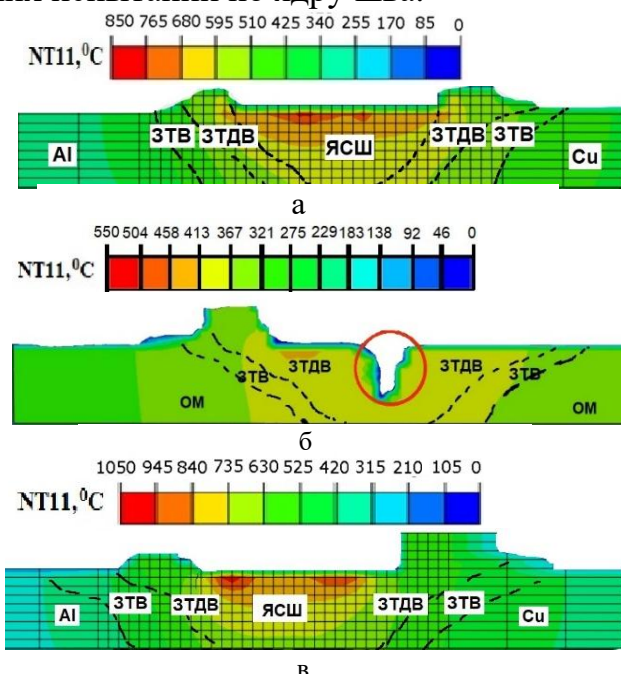


Рис. 7 – Визуализация полученного при моделировании распределения температуры по сечению шва при СТП (25 мм/мин, 3°, на медь 1 мм): а – 900 об/мин; б – 800 об/мин; в – 1000 об/мин

Проведенные исследования влияния линейной скорости инструмента при фиксированной скорости вращения на образование зон и механические свойства швов показали, что возрастание скорости перемещения привело к увеличению аксиальной силы на инструмент из-за уменьшения количества вводимой погонной тепловой энергии, так как требовалось большее количество энергии для деформации свариваемых металлов.

На рисунке 7 представлено смоделированное распределение узловой температуры (NT11) по сечению шва при СТП от изменения частоты вращения от 800 до 1000 об/мин. Спрогнозированная температурная динамика в шве (рис. 7, а) соответствовала макроструктуре темплета бездефектного соединения алюминия и меди, полученного в ходе СТП свариваемых образцов (рис. 2, а).

На смоделированном макрошлифе при 800 об/мин мы можем наблюдать внешний туннельный дефект вдоль направления сварки, образование которого объясняется тем, что максимальные температуры от 391 до 423 °С в ЯСШ и ЗТДВ (рис. 7, б) недостаточны для достижения СПС меди, а избыточный свариваемый металл выдавливается в виде грата (рис. 2, б). Размер туннельного дефекта на темплете (рис. 2, б) на 25 % больше, чем полученный в результате моделирования (рис. 7, б).

При моделировании получения шва и верификации на основе результатов эксперимента (рис. 2, в) были получены картины распределения материала (доля пустоты

в изучаемом объеме (Eulerian volume fraction – EVF; рис. 7, в и 8).

При 1000 об/мин максимальная температура, возникающая по сечению шва, составляла 824,7 °С (рис. 7, в) со стороны меди у пина, что приводило к образованию пустоты в ЯСШ (рис. 2, в), связанной с перегревом сварного шва. При визуализации красный цвет соответствует 100 % пустоты, а синий участок заполнен свариваемыми металлами. Компьютерная модель CEL позволила спрогнозировать размер туннеля в шве (рис. 8) при скорости вращения 1000 об/мин с погрешностью $\approx 18\%$ по сравнению с экспериментом.

Макрошлифы и смоделированные картины распределения пластической деформации, полученные с помощью СТП с изменением скорости перемещения СИ при 900 об/мин, показаны на рисунке 10.

При более низких значениях погонного тепловложения при 41 мм/мин медь недостаточно пластифицировалась, что привело к образованию пустот размером не более 0,2 мм (рис. 9, а). При более высокой скорости сварки (63 мм/мин) формировался шов с значительным количеством пустот размером 0,2–0,5 мм (рис. 9, б).

Пустота, образовавшаяся при моделировании, при скорости перемещения 63 мм/мин (рис. 9, б) имеет эллиптическую форму, а непровар при 41 мм/мин (рис. 9, а) более округлый. Расположение и размеры несплошностей в сварном шве образцов, полученных в ходе лабораторного эксперимента, соответствовали прогнозу, полученному при компьютерном моделировании (отклонения размеров не превышают 10–13 %).

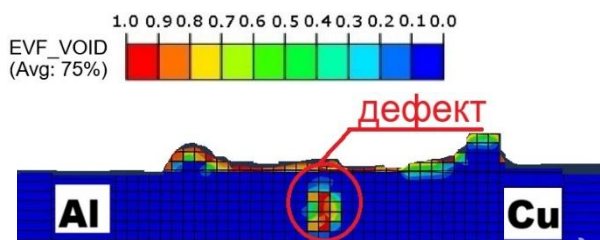
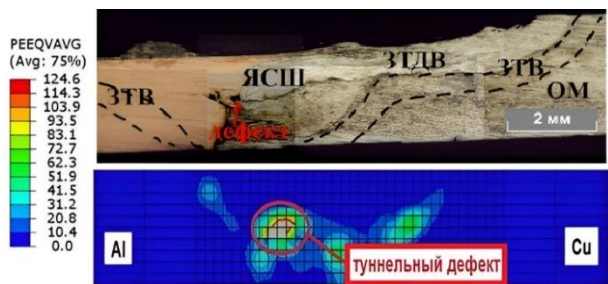
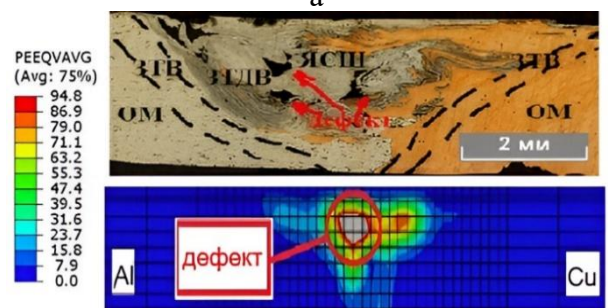


Рис. 8 – Распределение объемной доли пустоты в шве (1000 об/мин, 25 мм/мин, 3°, смещение 1 мм на медь)



а



б

Рис. 9 – Макрошлифы и спрогнозированное распределение эквивалентной пластической деформации сварных швов алюминия и меди (900 об/мин): а – 41 мм/мин; б – 63 мм/мин

Средние значения твердости алюминия и меди составили 50 и 160 HV соответственно. Микротвердость зон шва при СТП зависит от размера зерен, образования

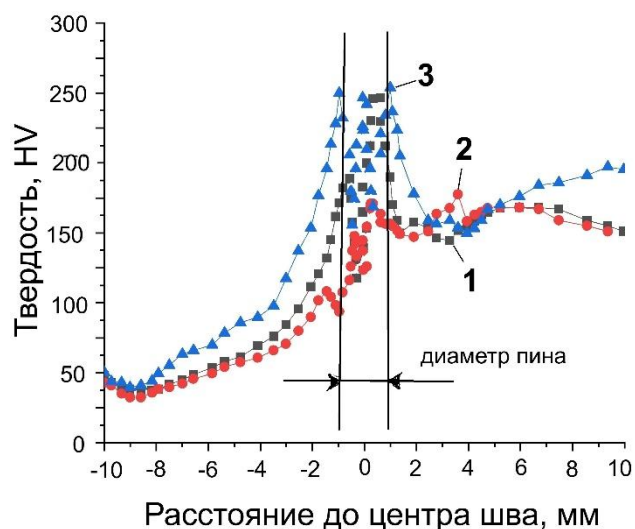


Рис. 10 – Распределение твердости шва в образцах, полученных с различными скоростями вращения СИ (25 мм/мин, 3°, смещение 1 мм на медь): 1 – 800 об/мин; 2 – 900 об/мин; 3 – 1000 об/мин

ИМФ ($AlCu$, Al_2Cu , Al_4Cu_9) и дисперсных медных частиц. Согласно соотношению Холла – Петча, с укрупнением зерна в ЗТВ микротвердость уменьшается. Профили распределения микротвердости по сечениям сварных образцов со скоростями вращения СИ 800–1000 об/мин и сварки 25 мм/мин показаны на рисунке 10.

Анализ распределения твердости показал, что степень разупрочнения металла в шве и на примыкающих к нему участках при СТП всегда меньше, чем в ЯСШ для кривой 1 и 2. Ширина зоны смешивания алюминия и меди превышает диаметр пина. При скорости вращения инструмента 800 и 900 об/мин максимальное значение микротвердости составляло 245 (кривая 2) и 170 HV (кривая 1), что вызвано наличием крупных фрагментов меди, покрытых

ИМФ (рис. 11). Профиль распределения микротвердости на микрошлифе сварного соединения, полученном при СТП при режиме 3, показан на рисунке 10. Твердость ЗТВ в алюминии и меди ниже на 30 и 42 % соответственно, чем у исходных металлов.

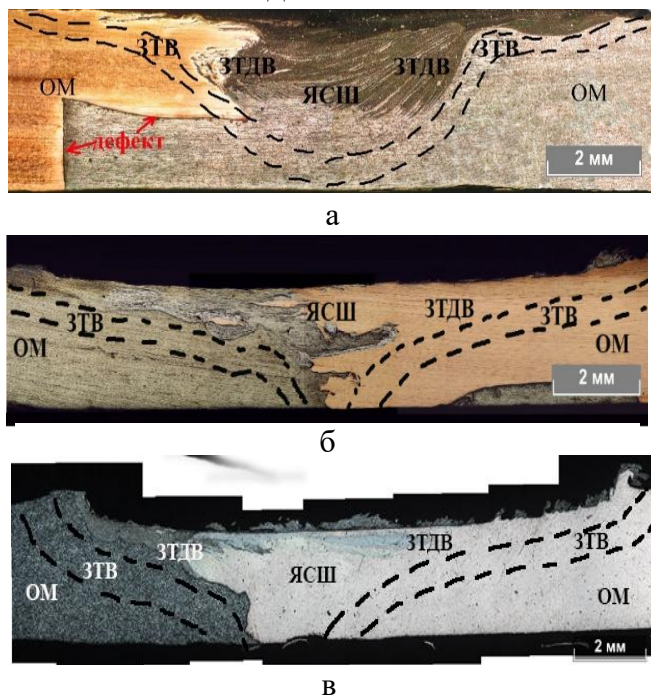


Рис. 11 – Макрошлифы сварных швов АД1 и М1 (900 об/мин, 25 мм/мин, 3°) при различной величине смещения: а – $\delta_1 = -3$ мм; б – $\delta_1 = 0$ мм; в – $\delta_1 = 3$ мм

При сварке алюминия и меди смещение СИ относительно поверхности контакта металлов играет важную роль в формировании механических свойств соединения. При смещении $\delta_1 = 3$ мм на алюминий только заплечик СИ взаимодействует со слоем меди, в результате возникают дефекты несплавления в донной части со стороны меди из-за отсутствия контакта с пином (рис. 11, а). При нулевом смещении инструмента потоки алюминия представлены в виде трех выступов, которые уменьшаются по мере спуска вниз сварного соединения (рис. 11, б). При увеличении смещения на медь $\delta_2 = 3$ мм растет размер дефекта в виде несплавления. В этом случае только заплечик и верхняя часть пина соприкасаются с алюминием (рис. 12, в). Объемная доля меди составляла 57–68 % от всего объема свариваемых металлов. При росте смеще-

ния в сторону меди (рис. 11, в) происходит перенос свариваемых металлов лишь в

верхней части шва за счет вращательного движения заплечика. Толщина области интенсивного перемешивания составила 0,4 мм.

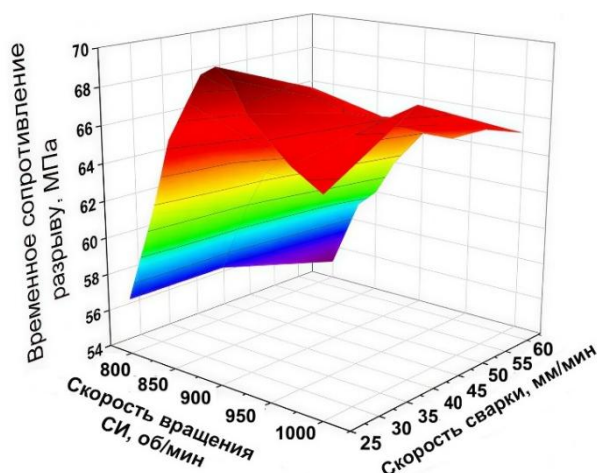


Рис. 12 – Зависимость прочности образцов при скорости вращения 800–1000 об/мин и изменении скорости сварки от 25 до 63 мм/мин

Результаты испытания на растяжение образцов, сваренных при частотах вращения инструмента 800–1000 об/мин и варьировании линейной скорости сварки в интервале от 25 до 63 мм/мин, представлены на рисунке 12.

Значения временного сопротивления разрыву соединений алюминия и меди при 800 об/мин оказались ниже на 20 % механических свойств АД1. При скорости сварки 25 мм/мин и частоте вращения 900 об/мин временное сопротивление шва на растяжение (рис. 12) составило 70 МПа с разрывом по алюминию. С увеличением линейной скорости перемещения СИ от 41 до 63 мм/мин происходило падение прочности на 12,5 и 26 % от максимального значения. С возрастанием

скорости вращения СИ до 1000 об/мин при значениях скорости сварки 25 и 41 мм/мин предел соответствовал 62 и 68 МПа с разрушением по ЗТДВ со стороны алюминия. При 1000 об/мин и 63 мм/мин предел прочности уменьшался на 15–20 % (рис. 12).

В четвертой главе представлена методика определения режимов СТП стыковых соединений алюминия с медью, основанная на расчете тепловых полей и определении возможности перехода соединяемых разнородных металлов в СПС, что позволяет получать швы с высокими показателями прочности.

Зона сварки рассматривалась как диск с небольшой толщиной h , которая состояла из двух полудисков из разных металлов. Диск разбивался на N концентрические цилиндрические поверхности с возрастающими радиусами $r_0, r_1, r_2, \dots, r_N$, где r_0 и r_N – радиусы пина и внешнего цилиндрического торца.

Аксиальное давление P_v , оказываемое заплечиком СИ на заготовку, выражалось формулой:

$$P_v = F/S, \quad (1)$$

где F – аксиальное усилие, прикладываемое к СИ; $S = \pi R_s^2$ – площадь заплечика СИ; $R_s = 7$ мм – радиус заплечика инструмента, изготовленного из стали У8. В рассматриваемом примере радиус пина у основания инструмента составлял $R_p = 3$ мм, а его длина $H = 2,8$ мм.

Для расчета выделяющейся в единицу времени тепловой энергии применялась модифицированная формула Шмидта:

$$P_Q = \left(\frac{2\pi}{3} \right) \omega \left[\delta \tau + (1 - \delta) \mu(T) P_v \right] \cdot \left[(R_s^3 - R_p^3) + R_p^2 \left[1 + \frac{R_0}{R_p} + \left(\frac{R_0}{R_p} \right)^2 \right] \sqrt{H^2 + (R_p - R_s)^2} \right], \quad (2)$$

где δ – коэффициент скольжения между заплечиком и заготовкой ($\delta = 0,31$), зависящий от обработки поверхности; T – абсолютная температура в области соприкосновения

СИ с металлом (298 К); ω – угловая скорость вращения СИ (900 об/мин); τ – напряжение сдвига при пластической деформации (32 МПа для меди).

Для математической модели была получена система уравнений теплового баланса выделенных элементов свариваемых образцов из меди и алюминия:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{jk}}{dt} = & \frac{2[w\delta_{k,0} + (1-w)\delta_{k,1}]P_j}{\pi_0^2 h \rho_j c_j a^{2k} (a-1) \left[1 + a - (-1)^j \cdot \left(\frac{4\delta p}{\pi_0} \right) a^{-k} \right]} + \frac{2\chi_j \left[a + \left(\frac{2\delta p}{\pi_0} \right) a^{-(k-1)} \right] (1-\delta_{k,0})}{r_0^2 \rho_j c_j a^{2k} (a-1)^2 \left[1 + a - (-1)^j \left(\frac{4\delta p}{\pi_0} \right) a^{-k} \right]} (T_{1(k-1)} - T_{1k}) + \\ & + \frac{2\chi_j \left[a + \left(\frac{2\delta p}{\pi_0} \right) a^{-k} \right]}{r_0^2 \rho_j c_j a^{2k} (a-1)^2 \left[1 + a - (-1)^j \cdot \left(\frac{4\delta p}{\pi_0} \right) a^{-k} \right]} (T_{j(k+1)} - T_{jk}) + \frac{2\varepsilon_j \sigma}{c_j \rho_j h} (T_c^4 - T_{jk}^4) + \frac{2\omega}{c_j \rho_j h} (T_c - T_{jk}), j = 1, 2. \end{aligned} \quad (3)$$

В уравнениях (3) P_1 и P_2 – тепловые мощности, выделяющиеся, соответственно, в меди и алюминии; w – доля тепловой мощности, выделяющейся в области контакта пина с первым кольцевым элементом; $a(1-w)$ – доля теплоты, выделяющаяся в области контакта с заплечником; $\delta_{k,k'}$ – дельта-символ Кронекера; χ_1 и χ_2 – теплопроводность меди и алюминия; c_1 и c_2 – удельная теплоемкость АД1 и М1; ρ_1 и ρ_2 – плотность меди (алюминия); ε_1 и ε_2 – коэффициенты поглощения излучения меди и алюминия; σ – постоянная Стефана – Больцмана, T_c – температура окружающей среды.

Полученная система из $N+1$ уравнений (3) является замкнутой. Решение этой системы при заданных $N+1$ начальных значениях температуры элементов $T_k(0)$, где теперь $k = 0, 1, \dots, N$, определяет зависимость от времени температуры полукольцевых элементов.

С удалением от центра диска происходило убывание температурного градиента. Поэтому радиусы цилиндрических поверхностей рассчитывали по возрастающей геометрической прогрессии, чтобы изменение температурного градиента было одинаковым и можно было охватить весь свариваемый образец. Для расчетов режима СТП было достаточно системы из девяти уравнений теплового баланса, которые учитывали теплофизические свойства свариваемых материалов и потери энергии на конвекцию, излучение, теплообмен со средой и подкладкой. Они позволяли рассчитывать температуру на определенных расстояниях от оси СИ.

Рассмотренная математическая модель позволила оценить линейную скорость СТП, которая зависела от скорости возрастания температуры и достижения состояния СПС в кольцевом элементе, примыкающем к пину. Если обозначить как $t(\eta T_m)$ время, за которое первый полукольцевой элемент алюминия возле пина достигал температуры перехода в СПС, то формула для оценки линейной скорости СТП выглядит как:

$$v = \frac{(r_1 - r_0)}{t(\eta T_m)}.$$

Методика для расчета режимов СТП основывалась на следующих этапах:

1. Расчет режимов СТП проводился с использованием справочных данных о физико-механических свойствах соединяемых металлов.

2. Для процессов сварки в твердой фазе необходимо было оценить скорость пластической деформации ε : $\dot{\varepsilon} = \frac{\omega R_s}{D(R_s)}$, где ω – угловая скорость вращения инструмента (c^{-1}); $D(R_s)$ – толщина деформированного слоя как функция от радиуса заплечика, мм.

3. Корректировка параметров осуществлялась для обеспечения необходимой прочности шва, которая зависела от температуры, определяющей величину среднего размера рекристаллизованных зерен, возникавших в области сварки.

4. При корректировке величин параметров СТП следует учитывать технико-экономические показатели оборудования.

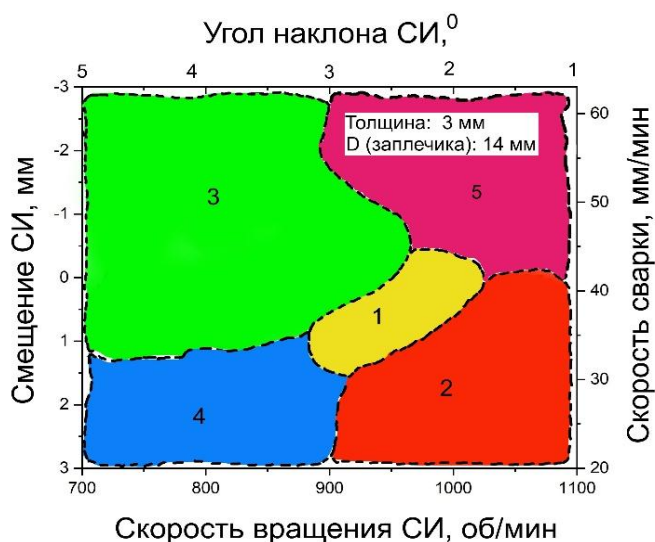


Рис. 13 – Зоны режимов СТП: 1 – область с высокими механическими свойствами шва; 2 – перегрев металла и образование дефекта в донной части шва; 3 – высокие нагрузки на инструмент и образование поверхностного дефекта; 4 – дефекты в виде непроваров центральной части шва; 5 – образование поверхностного туннельного дефекта

На основе расчетов СТП была построена номограмма, имеющая области с оптимальными параметрами и высокими механическими свойствами шва (рис. 13).

На основе приведенных в главе 3 результатов исследований разработан способ СТП алюминия и меди, использованный для изготовления электромонтажных шин в условиях ООО НПП «СФО-АСТРА» взамен ранее используемого болтового соединения. Заготовки пластин толщиной 3 мм из АД1 и М1 сваривались встык по режиму: 900 об/мин, 25 мм/мин, 3° , смещение на медь 1 мм.

Образцы прошли механические испытания на растяжение и статический изгиб по ГОСТ 6996-66 в лаборатории ООО «Стройспецмонтаж». При испытании на растяжение относительное удлинение образцов составило 10 %, а разрыв происходил по основному металлу – алюминию. Сваренные пластины «медь – алюминий» используются в качестве переходников для соединения токоподводящих шин из алюминия и меди. Ожидаемый экономический эффект в условиях ООО НПП «СФО-АСТРА» составит 1135000 рублей в год. Измерение падения напряжения на шине, полученной с помощью сварки трением с перемешиванием, показало уменьшение напряжения в зоне контакта более чем в 2 раза по сравнению с показателями для болтовых соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования технологии СТП стыковых разнородных соединений «алюминий – медь» показали возможность получения высоких механических характеристик сварного шва при следующих технологических режимах: частота вращения инструмента $\omega = 900$ об/мин, угол наклона СИ $\alpha = 3^\circ$, линейная скорость сварки $v = 25$ мм/мин, смещение на медный образец 1 мм. Рост скорости сварки с 25 до 63 мм/мин при этой частоте вращения СИ приводил к уменьшению вводимой погонной тепловой мощности в сварной шов и возрастанию вероятности образования пустот и тоннелей в ЯСШ и ЗТДВ из-за недостаточной температуры.

2. Средние значения твердости в ЯСШ выше, чем у свариваемых металлов, из-за высокой плотности дислокаций, формирования мелкого зерна алюминия и меди, а также наличия интерметаллидных фаз. Формирование композиционной структуры сварного шва с толщиной ИМС от 2 до 5 мкм не снизило значения механических свойств сварного соединения. При повышенной скорости сварки выделение ИМФ в ЯСШ достигало наибольших размеров, что связано с вовлечением в деформацию большего количества металла за один оборот СИ и с уменьшением длительности контакта инструмента с ЯСШ. Рентгенофазовый анализ показал, что интерметаллидные фазы Al_4Cu_9 и Al_2Cu в основном распределялись в зоне шва, прилегающей к меди, а фазы $AlCu$ и Al_2Cu – в области, прилегающей к алюминию и граничащей с центральной зоной ЯСШ.

3. Разработана конечно-элементная Эйлерово – Лагранжева (CEL) модель процесса СТП алюминия и меди, которая была верифицирована с помощью картины распределения свариваемых материалов в шлифах. Сопоставление результатов эксперимента с расчетными характеристиками, полученными с помощью компьютерного моделирования, позволили оптимизировать параметры режимов СТП применительно к конкретной конструкции сварного шва.

4. Разработана методика расчетов режима СТП для стыковых соединений «алюминий – медь», основанная на решении системы уравнений теплового баланса выделенных элементов свариваемых образцов, позволяющая определить возможность перехода соединяемых разнородных металлов в сверхпластическое состояние. Математические расчеты производились с учетом геометрических размеров СИ, температур перехода в СПС, рекристаллизации и полиморфных превращений. Предлагаемая методика позволяет корректировать расчетные значения скорости сварки по результатам получения нескольких экспериментальных образцов.

3. Для ООО НПП «СФО-АСТРА» разработан технологический процесс получения сварных электротехнических шин из АД1 и М1 методом СТП. Изготовленные образцы получили положительную оценку при механических испытаниях в лаборатории разрушающего контроля ООО «Стройспецмонтаж». Ожидаемый экономический эффект в условиях производства ООО НПП «СФО-АСТРА» составит 1135000 рублей в год за счет экономии сварочных материалов. Измерение падения напряжения на шине, полученной с помощью сварки трением с перемешиванием, показало уменьшение напряжения в зоне контакта более чем в 2 раза по сравнению с показателями для болтовых соединений.

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в 62 работах:

Журналы, входящие в перечень ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Рзаев, Р. А. Особенности образования интерметаллидных фаз в соединениях алюминия и меди, полученных сваркой трением с перемешиванием / Р. А. Рзаев, Л. М. Гуревич // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2025. – № 2 (297). – С. 57–64.

2. Рзаев, Р. А. Методы моделирования температуры и перемещения материала при сварке трением с перемешиванием / Р. А. Рзаев, Л. М. Гуревич // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 2 (285). – С. 64–69.

3. Рзаев, Р. А. Моделирование дефектообразования при сварке трением с перемешиванием алюминия и меди / Р. А. Рзаев, Л. М. Гуревич, А. Г. Валишева // Metallurg. – 2024. – № 11. – С. 113–118.

4. Рзаев, Р. А. Верифицированное компьютерное прогнозирование влияния смещения сварочного инструмента на свойства сварного соединения при сварке трением с перемешиванием алюминия и меди / Р. А. Рзаев, Л. М. Гуревич, В. В. Смирнов, М. Х. Сундетов // Сварка и диагностика. – 2024. – № 5. – С. 35–40.
5. Рзаев, Р. А. Компьютерное моделирование температурных полей в сварном шве при изменении технологических параметров сварки трением с перемешиванием алюминия и меди / Р. А. Рзаев, Л. М. Гуревич, И. М. Державин, Д. И. Меркулов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 10 (293). – С. 57–65.
6. Рзаев, Р. А. Влияние смещения инструмента при сварке трением с перемешиванием на механические свойства и образование зон сварных соединений алюминиевого и медного сплавов / Р. А. Рзаев, Л. М. Гуревич, З. Р. Датская // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 6 (289). – С. 75–81.
7. Рзаев, Р. А. Взаимосвязь энергетических, силовых и температурных характеристик сварки трением с перемешиванием и их влияние на механические свойства медно-алюминиевого сварного соединения / Р. А. Рзаев, Л. М. Гуревич, И. М. Державин, Л. Э. Семенова // Сварка и диагностика. – 2024. – № 3. – С. 23–29.
8. Рзаев, Р. А. Исследование аксиального усилия при сварке трением перемешиванием алюминия и меди / Р. А. Рзаев, Л. М. Гуревич, А. Г. Валишева, И. К. Черных // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – № 10 (281). – С. 63–69.
9. Рзаев, Р. А. Исследование влияния режимов сварки трением с перемешиванием на механические свойства сварного соединения листов из алюминиевого и медного сплавов / Р. А. Рзаев, Л. М. Гуревич // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – № 2 (273). – С. 69–76.
10. Эволюция механизмов пластической деформации, ответственных за формирование структуры околошовной зоны при сварке трением с перемешиванием металлов / А. А. Чуларис, Р. А. Рзаев, А. Г. Валишева // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – № 1. – С. 54–60.
11. Сварка трением с перемешиванием алюминиевого и медного сплавов / А. А. Чуларис, Р. А. Рзаев, М. Х. Сундетов // Сварочное производство. – 2019. – № 1. – С. 10–23.
12. Формирование структуры ядра соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием металлов с полиморфными превращениями / А. А. Чуларис, Р. А. Рзаев, О. Г. Зотов, А. О. Зотова // Технология металлов. – 2018. – № 9. – С. 17–27.
13. Рзаев, Р. А. Соединение коррозионностойких сплавов со сталями сваркой трением с перемешиванием / Р. А. Рзаев, А. А. Чуларис, З. Р. Датская, И. М. Державин // Сварка и диагностика. – 2019. – № 1. – С. 19–25.
14. Особенности строения и формирования структуры швов соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием / А. А. Чуларис, Р. А. Рзаев, А. Г. Валишева // Физика и химия обработки материалов. – 2018. – № 6. – С. 35–47.
15. Рзаев, Р. А. Макрокинетика формирования сварных соединений при сварке трением с перемешиванием / Р. А. Рзаев, А. А. Чуларис, Д. И. Меркулов // Сварка и диагностика. – 2017. – № 5. – С. 43–48.
16. Рзаев, Р. А. Использование технологических приемов для повышения прочности разнородных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / Р. А. Рзаев, А. А. Чуларис, А. С. Досимов, А. А. Наумов, О. Г. Зотов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2018. – № 1 (43). – С. 67–76.
17. Рзаев, Р. А. Динамика температурного поля и оценка технологических параметров при сварке трением с перемешиванием биметаллических пластин / Р. А. Рзаев, А. У. Джалмухамбетов, В. В. Смирнов, Ш. М. Атуев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18, № 1–2. – С. 274–278.

18. Рзаев, Р. А. Динамическая модель распределения температуры в металле при сварке трением с перемешиванием / Р. А. Рзаев, А. А. Чуларис, А. У. Джалмухамбетов, Ш. М. Атуев // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 3–1. – С. 47–55.

19. Соединение сталей с алюминием и его сплавами сваркой трением с перемешиванием / А. А. Чуларис, Р. А. Рзаев, А. Г. Валишева, В. В. Коган // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2020. – № 12. – С. 22–32.

20. Рзаев, Р. А. Соединение Ti и его сплавов с алюминиевыми сплавами сваркой трением с перемешиванием / Р. А. Рзаев, А. А. Чуларис, Н. А. Выборнов // *Технология металлов*. – 2019. – № 7. – С. 12–21.

21. Изучение явления сверхпластичности металлов, возникающее при сварке трением с перемешиванием / С. В. Смирнов, Р. А. Рзаев, О. М. Алыкова, В. В. Смирнов // *Физическое образование в ВУЗах*. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 119–122.

Статьи, индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science:

22. Rzaev, R. A. Simulation of defect formation during friction stir welding of aluminum and copper / R. A. Rzaev, L. M. Gurevich, A. G. Valisheva // *Translated from Metallurg*. – 2024. – № 11. – P. 113–118.

23. Influence of friction stir welding modes of copper and aluminum alloys / R. Rzaev, L. Semenova, A. Chularis, I. Chernykh // *Key Engineering Materials*. – 2022. – № 910 KEM. – P. 388–396.

24. Friction stir welding of aluminium and copper alloys / A. A. Chularis, R. A. Rzaev, M. K. Syndetov // *Welding International*. – 2021. – Vol. 34 (8). – P. 1–12.

25. Mathematical modeling of changes in temperature distribution during friction stir welding in massive samples / R. A. Rzaev, A. U. Dzhalmuxambetov, O. Yu. Dergunova, L. E. Semenova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – P. 032067.

26. The influence of the friction stir welding parameters on the formation of welded joint of aluminum and copper alloys / R. Rzaev, A. Chularis, V. Smirnov, L. Semyenova // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 11. – P. 534–542.

27. Core Structure Formation in the Joints Fabricated by Friction Stir Welding of Metals with Polymorphic Transformations / A. A. Chularis, R. A. Rzaev, O. G. Zotov, A. O. Zotova // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2019. – Iss. 13. – P. 1471–1478. – doi: 10.1134/S003602951913007X.

28. Rzaev, R. A. Mechanisms of formation of the structure of welded joints, performed by friction stir welding / R. A. Rzaev, O. M. Alykova, V. V. Smirnov, A. P. Kanavin, I. N. Zavistovskaya // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1439, № 1. – P. 012025.

29. Rzaev, R. A. The influence of technological methods on the mechanical properties of 4 welded joints obtained by friction stir welding / R. A. Rzaev, A. A. Chularis, D. I. Merkulov, M. Kh. Sundetov // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 38, part 4. – P. 1925–1930.

Другие публикации:

1. Компьютерная модель распределения температуры в металле при сварке трением с перемешиванием / Рзаев Р. А., Джалмухамбетов А. У., Атуев Ш. М. ; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО АГУ. – Заявл. 31.05.2016; № 2016618247 ; опубл. 25.07.2016.

2. Компьютерная модель распределения температуры в металле при сварке трением с перемешиванием в однородных металлах / Рзаев Р. А., Джалмухамбетов А. У., Атуев Ш. М. ; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО АГУ. – Заявл. 31.05.2016 ; № 2016615802 ; опубл. 25.07.2016.

3. Св-во о госрегистрации программы для ЭВМ № 2016660936 от 23.09.2016. Прогнозирование технологических параметров при сварке трением с перемешиванием биметаллических соединений / Рзаев Р. А., Джалмухамбетов А. У., Атуев Ш. М. ; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО АГУ. – Заявл. 26.07.2016 ; № 2016618367 ; опубл. 23.09.2016.

4. Св-во о госрегистрации программы для ЭВМ № 2020660837 от 14.09.2020. Расчет технологических параметров при сварке трением с перемешиванием стыковых разнородных соединений / Рзаев Р. А., Джалмухамбетов А. У., Смирнов В. В., Чуларис А. А. ; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО АГУ. – Заявл. 31.08.2020 ; № 2020619801 ; опубл. 14.09.2020.

5. Пат. № 2777096 от 01.08.2022. Способ подготовки поверхности торцов в виде шипа для разнородных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / Рзаев Р. А., Чуларис А. А., Смирнов В. В. ; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО АГУ. – Заявл. 29.06.2021 ; № 2021119166 ; опубл. 01.08.2022.

6. Пат. № 2777098 С1. Способ подготовки поверхности торцов в виде замка для разнородных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / Рзаев Р. А., Чуларис А. А., Меркулов Д. И. ; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО АГУ. – Заявл. 29.06.2021 ; № 2021119168 ; опубл. 01.08.2022.

7. Пат. № 2720018 от 23.04.2020. Способ подготовки поверхности торцов разнородных соединений для сварки трением с перемешиванием / Рзаев Р. А., Валишева А. Г., Смирнов В. В., Чуларис А. А. ; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО АГУ. – Заявл. 07.06.2018 ; № 2018121217 ; опубл. 23.04.2020.

8. Пат. № 2809060 С1 от 06.12.2023. Способ подготовки поверхности торцов разнородных соединений для сварки трением с перемешиванием в виде пила / Рзаев Р. А., Гуревич Л. М., Смирнов В. В., Бич Г. В. ; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО АГУ. – Заявл. 31.05.2023 ; № 2023114397 ; опубл. 06.12.2023.

Подписано в печать 27.10.2025. Заказ № _____. Тираж 80 экз. Печ. л. 1,0

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Отпечатано в типографии Издательства

Волгоградского государственного технического университета

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корпус 7.