

единстве.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а обоснована достоверность результатов и представлена информация об апробации работы.

В первой главе автором представлен анализ сварки трением с перемешиванием (СТП) для соединения алюминия и меди, в котором обобщено влияние параметров процесса на формирование структуры шва и образование интерметаллических фаз. На основе литературного обзора сформулированы принципы управления тепловложением для минимизации дефектов и получения качественных соединений.

Во второй главе автор приводит характеристики материалов и описан экспериментально-методический комплекс для исследования процесса сварки, включающий разработку оригинальных методик регистрации параметров, аппаратуры и компьютерной модели на основе метода CEL для анализа термомеханических полей. Также определен диапазон режимов для последующего эксперимента.

В третьей главе автором установлено, что прочность сварного соединения алюминия и меди сильно зависит от режимов сварки. Наивысшая прочность (70 МПа) была достигнута при скорости вращения инструмента 900 об/мин и скорости сварки 25 мм/мин, при этом разрыв происходил по основному металлу (алюминию). Увеличение линейной скорости сварки при постоянной частоте вращения приводит к существенному снижению прочности. Например, при 900 об/мин рост скорости с 25 до 63 мм/мин уменьшил прочность на 26%. Повышение частоты вращения до 1000 об/мин также не даёт преимуществ, приводя к снижению прочности на 15-20% по сравнению с оптимальным режимом и смещению места разрыва в зону термического влияния со стороны алюминия. Таким образом, оптимальным для достижения максимальной прочности является режим с относительно высокой частотой вращения (900 об/мин) и низкой скоростью сварки (25 мм/мин), обеспечивающий достаточное тепловложение и перемешивание материалов.

В четвертой главе автором представлена научно-обоснованная методика для расчёта оптимальных режимов сварки трением с перемешиванием (СТП) для соединения алюминия и меди. Методика основана на математической модели, рассчитывающей тепловые поля в зоне сварки и определяющей момент перехода металлов в состояние сверхпластичности. Разработанная модель позволяет рассчитать ключевые параметры, такие как линейная скорость сварки, для достижения максимальной прочности соединения. На основе этих расчётов построена номограмма с областями оптимальных режимов. Практическая ценность методики подтверждена внедрением: разработанный способ СТП успешно применён для изготовления электромонтажных шин, показавших высокое качество соединения и значительный экономический эффект.

В заключении приведены общие выводы, сделанные по полученным в диссертационной работе результатам.

Научная новизна результатов, изложенных в диссертации состоит 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 3–5 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 и 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.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается использованием расчетно-экспериментальных методов исследований, современных методов исследования и аппаратуры, включая стандартные и оригинальные методики: растровой электронной микроскопии, металлографических исследований, механических испытаний, измерения твердости и микротвердости, измерение генерируемой тепловой мощности и аксиального усилия от сварочного инструмента, компьютерное и математическое моделирование.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 62 работах, из них 21 статей в российских периодических рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ; 24 статьи, индексируемые наукометрической базой Scopus/WoS. Получено четыре патента РФ на изобретение и четыре свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором работы, заключается в следующем:

Практическая ценность работы заключается в том, что соискателем на основании полученных теоретических и экспериментальных результатов установлена связь параметров процесса сварки трением с перемешиванием с показателями механических свойств сварных соединений разнородных металлов с ограниченной взаимной растворимостью; показана возможность использования конструкторско-технологических приемов для подавления образования интерметаллидных фаз в сварном шве.

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

Разработана методика расчета параметров режима сварки трением с перемешиванием 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 сварки трением с перемешиванием апробирована на ООО НПП «СФО-АСТРА» и ООО «Стройспецмотаж», 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 сварки трением с перемешиванием послужили основой для разработки технологии получения разнородных соединений «алюминий – медь».

Соответствие паспорту научной специальности и отрасли наук:

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии (отрасли науки технические) по п. 3. – «Физические процессы в материалах при сварке и родственных технологиях, фазовые и структурные превращения, образование соединений и формирование их свойств»; п. 4. – «Технологические основы сварки и родственных процессов».

Рекомендации по использованию результатов исследования:

Проведенные автором исследования расширяют представления о структурно-фазовых превращениях в соединениях алюминия и меди, полученных сваркой трением с перемешиванием, при термомеханических воздействиях инструмента в зонах сварного шва. Полученные в работе результаты объясняют картину распределения интерметаллидов в ядре и зоне термомеханического воздействия и факторы, влияющие на рост интерметаллидных слоев.

Важными представляются выводы о том, что для стыковых разнородных соединений «алюминий – медь» толщиной 3 мм получили высокие механические характеристики 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; в ядре и зоне термомеханического влияния формируется ламеллярный слой, состоящий из алюминия, меди и интерметаллидных слоев, поэтому зону сварного шва можно рассматривать как слоистый композит, состоящий из фрагментов меди компактной или пластинчатой формы, равномерно перемешанных с алюминием. Формирование композиционной структуры сварного шва с толщиной интерметаллидных слоев от 2 до 5 мкм не снижает значений механических свойств сварного соединения.

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанную технологию сварки трением с перемешиванием для изготовления деталей силовой энергетики (переходников, токоведущих шин трансформационных подстанций) эксплуатация которых связана с циклическими изменениями температур и действием высокого электрического напряжения. Показателем применения полученных научных результатов является изготовление и промышленные испытания опытной партии электромонтажных шин в условиях ООО НПП «СФО-АСТРА».

Замечания по диссертационной работе:

1. Представляется актуальным проведение исследований по влиянию формы и размеров различного по конструктивному исполнению сварочного инструмента. Так в диссертационной работе сварка экспериментальных образцов выполнялась инструментом с постоянными формой и размерами пина и заплечика.

2. В компьютерной модели определения температурной динамики и распределение металлов в шве при сварке трением с перемешиванием не учитывалась зависимость теплофизических свойств свариваемых материалов от температуры.

3. Диссертант не описывает, на основании каких признаков были определены границы зоны термомодеформационного воздействия и зоны термического влияния.

4. В тексте диссертации не приведено объяснение, почему большее количество интерметаллидных фаз образуются со стороны алюминия?

5. Недостаточно подробно описаны условия проведения механических испытаний сварных швов. Не указаны схема нагружения, тип и размеры образцов, а также количество повторов, что ограничивает возможность оценки статистической достоверности полученных данных?

6. Следовало бы более четко отразить в формулировке научной новизны связь между типом формирующейся структуры и параметрами режимов сварки трением с перемешиванием.

7. В тексте диссертации не указано, проводилась ли оценка теплопроводности сварного соединения «алюминий – медь».

Указанные замечания не снижают общей положительной характеристики работы, её научной и практической ценности.

Заключение

Диссертационная работа Рзаева Радмира Адильбековича на тему «Совершенствование технологии сварки трением с перемешиванием алюминия и меди с целью улучшения прочностных характеристик электромонтажных шин» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены научно-обоснованные технические и технологические решения, имеющие существенное значение для развития сварочного производства в РФ.

Публикации автора в полной мере отражают его основные научные и практические достижения, а число публикаций и объём достаточно полно характеризуют защищаемую работу. Печатные труды автора, приводимые в диссертации и автореферате, опубликованы в научных изданиях, которые рекомендуются ВАК при Минобрнауки РФ, результаты работы апробированы на научных конференциях и семинарах в 2015-2025 годах.

Автореферат диссертации достаточно полно и правильно отражает основные положения диссертации.

В целом диссертационная работа Рзаева Р.А. соответствует требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Рзаев Радмир Адильбекович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата

технических наук по специальности 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки).

Диссертация соискателя и отзыв на нее были заслушаны и обсуждены на расширенном заседании кафедры материаловедения и нанотехнологий ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» 19 января 2026 г. (протокол № 7). Результаты голосования: «За» — 15 чел., «Против» — нет, «Воздержались» — нет.

Я, Федосеева Александра Эдуардовна, даю согласие на обработку своих персональных данных.

Отзыв подготовила:

Профессор кафедры материаловедения
и нанотехнологий ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ»
д. техн. н. по специальности 2.6.1 Металловедение
и термическая обработка металлов и сплавов, доцент

/ Федосеева Александра Эдуардовна

03.02.2026

Сведения о ведущей организации

Адрес: 308015, Белгородская область, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Телефон: +7 (4722) 30-12-11

Адрес электроники почты: Info@bsuedu.ru

Личную подпись удостоверяю Специалист отдела кадрового обеспечения Управления организационного и и кадрового обеспечения	<i>Федосеева А.Э.</i>	
	<i>Мельниченко М.В.</i>	
	03.02.2026	

Сотворено ознакомлен
Ряев Р.А.
19.02.2026 г.

« 16 » ЛИСТОВ	Вх. № 08.00-65-16 « 18 » 02 2026 г. ВолгГТУ
------------------	---