

ОТЗЫВ

официального оппонента Чумаевского Андрея Валерьевича на диссертационную работу Рзаева Радмира Адильбековича «Совершенствование технологии сварки трением с перемешиванием алюминия и меди с целью улучшения прочностных характеристик электромонтажных шин», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)

Актуальность работы

Диссертация Рзаева Радмира Адильбековича посвящена важному и актуальному на настоящее время направлению – сварке трением с перемешиванием алюминия и меди. Сварка трением с перемешиванием (СТП) позволяет получать неразъемные соединения различных металлов и сплавов без плавления с достаточно небольшим тепловым воздействием на материал. На настоящее время проблемам, связанным с получением неразъемных соединений меди и алюминия, посвящено достаточно большое количество работ в отечественных и зарубежных научных изданиях. Тем не менее данное направление является недостаточно разработанным. Это обусловлено тем, что даже при сварке трением с перемешиванием происходит интенсивная взаимная диффузия алюминия и меди с резким тепловыделением на границе между компонентами и образованием хрупких интерметаллидных прослоек. Сам процесс сварки трением с перемешиванием является весьма сложным и состоит из пластической деформации в условиях адгезионного трения материала с инструментом, фрагментации материала с образованием субмикроструктурной или наноразмерной зеренной структуры, сверхпластического течения металла по контуру инструмента адгезионной и экструзионной природы, структурно-фазовых превращений термической и диффузионной природы, а также диффузионного и деформационного взаимодействия материала свариваемых пластин и сварочного инструмента. При формировании достаточно крупных прослоек интерметаллидов в условиях сварки трением с перемешиванием разнородных материалов, например, меди и алюминия, возможно снижение как механических свойств сварных соединений, так и эксплуатационных характеристик (тепло- и электропроводности) изделия. Также возможно образование дефектов в виде трещин в интерметаллидных прослойках. Важным направлением работ в данной области является установление технологических приемов для повышения прочностных показателей и эксплуатационных характеристик соединений меди и алюминия. По этой причине актуальность исследований, представленных в диссертации, сложно переоценить.

Содержание работы

Диссертационная работа Рзаева Р.А. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы на 188 источников. Диссертация изложена на 167 страницах, содержит 118 рисунков и 9 таблиц.

Во введении приведено обоснование актуальности выполнения работы в заданном направлении и сформулированы цели и задачи исследований. Продемонстрированы в сравнении с традиционными способами сварки преимущества СТП для получения соединений разнородных металлов и сплавов. Автором показаны сильные стороны СТП и даны ссылки на работы коллег в данной области. Во введении Рзаев Р.А. формулирует цель исследования в виде повышения прочности СТП соединений алюминия и меди и разбивает общую цель на 5 отдельных задач, решение которых представляется весьма целесообразным для данной отрасли знаний.

Первая глава посвящена литературному обзору состояния проблемы. Приведены ссылки на работы в данной области. Представлена историческая ретроспектива развития методов соединения материалов на основе СТП. Представлены данные об организации в зоне перемешивания при СТП различных потоков металла, формирующих соединение. Показаны основные проблемы формирования зоны перемешивания алюминиевых сплавов с медью или медными сплавами, формирование дефектов в виде пор или трещин, туннельных дефектов, пустот, грата и др. Проанализировано влияние параметров процесса сварки на прочность соединений. Проведен анализ применения математического моделирования для расчета температурных полей при СТП.

Вторая глава посвящена рассмотрению материалов и методики исследований в области сварки трением с перемешиванием, использованных в работе материалов. Приведены исходные химические составы материалов, их механические свойства и теплофизические характеристики. Продемонстрировано оборудование для сварки трением с перемешиванием с оценкой тепловыделения, оборудованием для определения термических циклов и измерением крутящего момента. Представлены методы исследования микро-, макроструктуры, измерения микротвердости и механических испытаний полученных образцов соединений. Приведена методика моделирования температуры и дефектообразования при СТП.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных работ по сварке трением с перемешиванием алюминия и меди, связи параметров процесса СТП со свойствами соединений. Показано, что качественное сварное соединение формируется при расположении меди на наступающей стороне соединения. Исследована организация структуры и фазового состава соединений, формирование интерметаллидных фаз,

распределение микротвердости в поперечном сечении швов. Проведено математическое моделирование распределения температуры и деформации в зоне формирования соединений. Установлены требуемые для достижения высоких механических свойств параметры процесса сварки меди и алюминия.

В четвертой главе приведены результаты разработки методики определения режимов СТП соединений меди и алюминия встык. Автором применена математическая модель и определены величины параметров процесса сварки, допустимых для формирования высокопрочных соединений. Использовано для сварки трением с перемешиванием меди и алюминия несколько видов оригинальной разделки кромок соединяемых деталей, показавших высокую эффективность.

В заключении приводятся основные выводы по проделанной работе.

В приложениях приведен Акт о производственном апробировании разработанных подходов в области сварки трением с перемешиванием меди М1 и алюминия АД1 и соответствующие протоколы результатов механических испытаний на растяжение и изгиб. Показано, что сварка трением с перемешиванием не только позволяет в 3-6 раз ускорить процесс соединения медных и алюминиевых деталей, но и значительно увеличивает прочностные показатели сварных швов.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов

Достоверность полученных данных обусловлена большим объемом накопленных экспериментальных результатов, применением математического моделирования, апробацией работы на большом количестве научных мероприятий и публикацией результатов исследований во многих изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых РИНЦ, Scopus и Web of Science.

Научная новизна

Проведенные в работе исследования вносят значительный вклад в развитие метода сварки трением с перемешиванием разнородных соединений. Автором представлена оригинальная методика определения режимов СТП соединений алюминия с медью. Исследованы закономерности организации структуры и свойств соединений меди и алюминия при использовании оригинальной разделки кромок.

Теоретическая и практическая значимость

В процессе исследований автором были получены важные для отрасли данные о формировании соединений меди и алюминия с применением различных способов подготовки кромок, применении разных сочетаний параметров процесса сварки и методики подбора параметров режимов, что важно как с теоретической, так и с практической точки зрения. Практическая значимость работы подчеркивается также внедрением полученных

данных в производственный цикл промышленного предприятия для получения электротехнических шин. Теоретическая значимость работы подчеркивается согласованностью экспериментальных данных и результатов математического моделирования.

Оформление диссертации, публикации и апробация

Материал диссертации достаточно хорошо оформлен и структурирован, основные полученные данные представлены на большом количестве научных мероприятий. По результатам выполнения диссертационного исследования опубликовано 62 работы, из них 24 статьи в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science и 21 статья в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ. По материалам исследований получено 4 патента РФ на изобретение и зарегистрированы 4 программы для ЭВМ.

По представленной диссертационной работе можно сделать лишь небольшое количество **замечаний**:

1. В положении №3 указано, что использованы технологические приемы СТП для предотвращения образования и роста интерметаллидных фаз. Но, избавиться от данных процессов полностью при сварке меди и алюминия практически невозможно. Уместнее было бы утверждать о сдерживании процесса образования и роста интерметаллидных фаз, что в работе было достигнуто.

2. Примененная в работе схема с волнообразной формой кромок увеличивает механическое перемешивание меди и алюминия, что может привести к значительному увеличению образования интерметаллидных фаз и снижению прочностных и эксплуатационных характеристик изделия. Избыточное перемешивание компонентов в ряде работ приводило к реализации лавинообразного увеличения тепловложения с контактным плавлением материала и образованием сплошных хрупких интерметаллидных прослоек с большим количеством дефектов. По этой причине такая конфигурация стыка представляется весьма нелогичной. Но, при СТП в исследовании были получены высокие механические свойства для данной конфигурации стыка. В работе следовало обсудить, каким образом было реализовано такое положение.

3. Центральная зона сварного соединения, полученного методом СТП, в работе называется «ядро сварного шва, ЯСШ», в то время как в литературе принято наименование «зона перемешивания, ЗП». Также имеется небольшое количество терминологических расхождений с применяемыми в литературе обозначениями зон соединений или элементов инструмента. В работе и автореферате имеется небольшое количество опечаток и неточностей, что в целом не ухудшает её восприятия.

4. На большинстве рисунков со структурой в поперечном сечении образцов не указаны наступающая и отступающая стороны соединения. Также в выводах и положениях не указано, в какой области более выгодно было располагать медь и алюминий по результатам данного исследования. Это крайне важно при анализе формирования структуры и свойств соединений, полученных методом сварки трением с перемешиванием, так как перед инструментом течение металла начинается на наступающей стороне и заканчивается на отступающей, а за инструментом материал движется от отступающей стороны – к наступающей. Хотелось бы в выводах или положениях отразить обнаруженные в работе закономерности организации структуры и свойств соединений в зависимости от расположения алюминия и меди на наступающей или отступающей стороне (особенно при учете того, что исследования в данном направлении в работе проводились).

5. По имеющимся литературным данным материал заготовок с наступающей стороны в целом более подвержен термическому и деформационному воздействию со стороны инструмента. При сварке стыковых разнородных соединений по данным литературных источников желательнее на данной стороне размещать материал с меньшей температурой плавления, в противном случае избыточное тепловыделение в материале с большей температурой плавления способно значительно перегреть материал с меньшей температурой плавления и увеличить образование интерметаллидов. Также в работах по сварке разнородных материалов преимущественно движение инструмента при этом организуется в алюминии с небольшим касанием с медью для минимизации образования интерметаллидов, что обуславливает формирование соединения за счет сдавливания потоков перемещаемого алюминия и, в небольшом количестве – меди, в зоне между инструментом и медью на отступающей стороне. Таким образом возможно минимизировать тепловыделение и образование интерметаллидов в граничной зоне. Но, в настоящей работе в основном по полученным результатам более оптимальным было расположение меди на наступающей (набегающей) стороне, что достаточно интересно и было бы интересно дополнительно проанализировать.

6. Несколько непонятным выглядит в алгоритме подбора и расчета параметров режима СТП для разнородных соединений критерии минимизации скорости сварки от температуры перехода материала в СВС, скорости пластической деформации и др. Преимущественно по результатам работ в литературе именно увеличение скорости сварки (при прочих равных параметрах) снижает тепловое воздействие на материал, что может положительно сказываться на образовании интерметаллидов в зоне сварки и повысить качество соединений.

7. В выводе №2 по проделанной работе указано, что значения твердости в ядре сварного шва (или зоне перемешивания) выше, чем у свариваемых материалов из-за высокой плотности дислокаций, формирования мелкого зерна и наличия интерметаллидных фаз. Полностью согласен со связью высокой твердости с наличием интерметаллидных фаз, что подтверждается и прямыми результатами наблюдений в работе, но не могу согласиться с высокой плотностью дислокаций, так как преимущественно по результатам исследований в работах нашего коллектива и в современной литературе строение сварного шва представлено рекристаллизованным зерном с отсутствующими или в незначительном количестве присутствующими дислокациями.

8. В работе не проведен анализ влияния дополнительного охлаждения на формирование структуры при сварке трением с перемешиванием алюминия и меди. В достаточно широком спектре работ по сварке трением с перемешиванием чистой меди применяется активное жидкостное охлаждение и показывает достаточно хорошие результаты, позволяя более интенсивно снимать тепло из зоны сварки. В данном случае применение охлаждения потенциально могло снизить образование интерметаллидных фаз на границе меди и алюминия. Данное замечание больше относится к пожеланию для дальнейших исследований в области сварки разнородных материалов, чем к критике работы, так как автором получены достаточно высокие значения механических свойств при сварке меди и алюминия.

Представленные замечания не снижают положительного впечатления о работе, её актуальности, значимости и научной новизне. Диссертация является законченной научной работой на актуальную тему. Работа имеет и прикладное, и фундаментальное значение. Многие представленные в работе технологические решения были защищены патентами на изобретения. Приведенные данные свидетельствуют о разработке технологии сварки электротехнических шин для промышленного предприятия и внедрении её в производство. Автором диссертационной работы выполнено качественное и хорошо проработанное исследование как в научном, так и в технологическом направлении. Диссертационная работа Рзаева Р.А. по своему содержанию полностью соответствует 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» и п.7 «Влияние конструктивных особенностей сварных соединений и технологии сварки на прочность, надежность и ресурс сварных конструкций» паспорта научной специальности 2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки).

Заключение

Диссертационная работа «Совершенствование технологии сварки трением с перемешиванием алюминия и меди с целью улучшения прочностных характеристик электромонтажных шин» является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям п.п. 9 и 14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, предъявляемых к докторским диссертациям, 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).

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник лаборатории
локальной металлургии в аддитивных
технологиях ИФПМ СО РАН, доктор технических наук



Чумаевский
Андрей Валерьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук.
634055, Россия, Томск, Академический просп., 2/4. Телефон: +7 (3822) 286-941. E-mail:
root@ispms.tomsk.ru

Подпись А.В. Чумаевского удостоверяю
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН



Матолыгина
Наталья Юрьевна

Сотрудник отдела
Вадим Рзаев
18.02.2026 г.

«07» ЛИСТОВ	Вх. № 08.00-65-15 «17» 08 2026 г. ВолгГТУ
----------------	---