

ОТЗЫВ

дополнительного члена диссертационного совета ДС.ТПУ.19 на диссертацию **Шаненковой Юлии Леонидовны** «Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности плазмодинамическим методом», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.12 – Техника высоких напряжений.

1. Актуальность темы диссертации.

Согласно статистическим данным, потери электрической энергии на контактных соединениях достигают 10% от всей потребляемой энергии. В связи с этим необходимо максимально снизить потери энергии в местах контактных соединений силовоточных цепей, которые обычно выполняются из меди и алюминия. Однако переход от медного проводника к алюминиевому требует решения задачи электрохимического совмещения этих материалов. Существующие способы решения данной проблемы недостаточно эффективны и имеют ряд недостатков. Создание покрытия с минимальной величиной переходного сопротивления на контактной поверхности позволяет решить проблему совмещения меди и алюминия, однако традиционные способы нанесения покрытий характеризуются низкой устойчивостью к динамическим воздействиям. Представленная диссертационная работа, посвящена решению актуальной задачи - разработке нового уникального способа нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности на основе высоковольтного силовоточного ускорителя плазмы. Актуальность работы подтверждается тем, что работа выполнялась в рамках грантов: Российского научного фонда № 15-19-00049, Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (УМНИК), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-08-31122 и № 18-32-00115).

2. Структура, объём и оценка содержания диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 121 наименование, и одно приложение. Диссертация изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 57 иллюстраций и 10 таблиц.

Во введении сформулирована актуальность темы исследования, обозначены цель и задачи диссертационной работы, приведены выносимые на защиту положения научной новизны и практическая значимость результатов, а также приведены сведения о структуре, объеме диссертации, ее апробации и количестве опубликованных работ.

В первой главе представлены результаты анализа литературных данных о поиске путей создания совмещенных контактных элементов из меди и алюминия и об их свойствах. Рассмотрены основные возможные решения проблемы совмещения контактной пары медь-алюминий, такие как электропроводящие смазки, использование биметаллических прокладок и нанесение покрытий различного состава на контактные поверхности.

Во второй главе рассмотрены методы экспериментальных и аналитических исследований. Представлены конструкции экспериментальных установок для нанесения покрытий на плоские подложки и на внутренние конусные алюминиевые поверхности. Рассмотрены методы исследований свойств полученных медных покрытий. Кроме того, описана установка для измерения переходных сопротивлений контактных пар, разработанная автором.

В третьей главе рассмотрены способы инициирования дугового разряда и проанализировано влияние энергетических и конструктивных параметров плазмодинамической системы на динамические характеристики сверхзвуковой плазменной струи, электроэрозионную наработку материала с поверхности ускорительного канала, величину площади и качество медного покрытия. Отдельный раздел посвящен нанесению медного покрытия при двухимпульсном режиме работы ускорителя.

В четвертой главе рассмотрены вопросы влияния параметров плазмодинамической системы и характеристик медного покрытия на переходное сопротивление контактной пары медь-алюминий. Описаны сравнительные исследования переходных сопротивлений различных типов контактных пар. Рассмотрены основные характеристики медного покрытия, такие как микроструктура, фазовый состав медного покрытия на алюминиевой подложке, физико-механические характеристики (твердость, шероховатость контактной поверхности, прочность сцепления медного плазменного покрытия с алюминиевой подложкой).

Пятая глава посвящена нанесению плазмодинамических покрытий на внутренние поверхности конических отверстий в алюминиевых образцах с использованием коаксиального магнитоплазменного ускорителя с оригинальной конструкцией ствола с медным ускорительным каналом. Рассмотрены основные характеристики полученных контактных элементов. Произведена оценка уровня переходного сопротивления контактных пар медь-алюминий с медным покрытием и исследованы микроструктура, элементный и фазовый состав, а также оценена твердость.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, подтверждающие достижение поставленной цели.

3. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 05.14.12 – Техника высоких напряжений

Материалы диссертации и автореферата соответствуют паспорту научной специальности:

05.14.12 – «Техника высоких напряжений»:

1. Исследование физических закономерностей и разработка методов расчета электрических разрядов в условиях, характерных для электроустановок высокого напряжения (молнии и другие атмосферные явления).

2. Разработка научных основ техники использования высоких напряжений для технологических процессов, разработка оборудования для технологий, использующих высокое напряжение.

3. Разработка специальных вопросов применения высоких напряжений в различных областях деятельности человека.

4. Методы исследования.

В диссертационной работе применялись разработанная автором экспериментальная методика нанесения медного покрытия на контактные поверхности, а также современные аналитические методы исследования. Общая методология соответствует уровню развития науки и техники, а используемые экспериментальные методы соответствуют поставленным в диссертации задачам.

5. Степень обоснованности научных положений и достоверности полученных результатов.

Защищаемые положения основаны на корректном анализе результатов фундаментальных теоретических, экспериментальных и аналитических исследований, что подтверждает их обоснованность. Экспериментальные данные получены на современном технологическом оборудовании, а полученные закономерности согласуются с основными теоретическими положениями и с данными, полученными другими исследователями.

6. Новизна результатов диссертационной работы.

На основе анализа опубликованных результатов ранее проведенных исследований в рассматриваемой работе спланированы и проведены систематические исследования практически всех этапов многофакторного процесса нанесения медного покрытия плазмодинамическим методом. Определены оптимальные параметры электропитания ускорителя в одно- и двухимпульсном режимах работы. Показана целесообразность

инициирования дугового разряда в ускорительном канале с помощью углеродной перемычки с начальным сопротивлением $400 \div 600$ Ом. Применена новая двухслойная конструкция ствола с повышенной механической прочностью, обеспечивающая более эффективное проникание внешнего магнитного поля в ускорительный канал, повышение эффективности электроэрозионной наработки меди и скорости плазменного течения. Установлено, что оптимальное расстояние от среза ствола до плоской обрабатываемой поверхности определяется поведением ударно-волновой структуры сверхзвукового течения плазмы.

В совокупности полученные новые научные результаты обеспечили создание плазмодинамической системы для нанесения медных покрытий на плоские и внутренние конические алюминиевые поверхности. Определены условия, конструктивные и энергетические параметры ускорителя, обеспечивающие нанесение медного покрытия регулируемой толщины (порядка 100 мкм), площадью до 200 см^2 и высокой прочностью сцепления (до 2500 МПа) с алюминиевой подложкой.

Экспериментально установлено, что плазмодинамическое медное покрытие с естественной шероховатостью на алюминиевой поверхности обеспечивает надежное совмещение плоской или конической контактной пары медь-алюминий и снижение переходного сопротивления в $2,5 \div 4$ раза за счёт образования граничного слоя взаимного перемешивания материалов и высокотвёрдых интерметаллидных фаз.

7. Практическая значимость и реализация результатов диссертационной работы.

Определены оптимальные параметры и разработаны научно-технические основы системы, базирующейся на использовании высоковольтного сильноточного коаксиального магнитоплазменного ускорителя эрозионного типа с медными электродами для создания промышленной технологии нанесения устойчивых медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности различной конфигурации, обеспечивающие надёжное совмещение сильноточных контактных пар медь-алюминий и снижение переходного сопротивления контактных соединений при монтаже силовых электрических цепей. Показана возможность применения разработанной системы для нанесения медных покрытий на контактные поверхности стандартных алюминиевых шинопроводов, электроконтактных наконечников и конусных отверстий контактных терминалов вакуумных выключателей.

8. Замечания.

1. В методике проведения научных исследований указано, что регистрация динамических характеристик плазменного потока производилась на двух фотоустановках, однако не объяснена необходимость использования двух различных видов фоторегистрации. Кроме того, отсутствует описание режима съемки процесса.

2. Фазовый анализ покрытий показал наличие интерметаллидных фаз, однако автор работы не называет условия, при которых образуются такие виды соединений.

3. Диссертационная работа содержит очень много сокращений и обозначений, что несколько затрудняет чтение текста и понимание результатов проведенных исследований.

9. Заключение.

Отмеченные замечания не затрагивают существа диссертации и, в целом, не снижают высокой оценки проведенных исследований. Совокупность выполненных диссертационных исследований и их результаты доказывают, что автором сделан существенный вклад в решение актуальной проблемы. Автореферат полностью отражает содержание, основные результаты и выводы диссертационной работы, а публикации автора достаточно полно доводят их до сведения заинтересованных лиц. Диссертация хорошо апробирована. Считаю, что диссертационная работа Шаненковой Ю.Л. «Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности плазмодинамическим методом» отвечает требованиям п.п. 8-9 Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (Приказ № 93/од от 06.12.2018):

п. 8. Представлена научно-квалификационная работа, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для развития соответствующей отрасли знаний (области электротехнических материалов и изделий) и в которой изложены новые научно-обоснованные технические решения в виде предложенного метода нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности.

п. 9. Работа написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о достаточном личном вкладе автора диссертации в науку. Кроме того, приводятся сведения о возможном практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов.

п. 10-11. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 15 работах, в том числе в 3 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, в 5 статьях в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

п. 12. Диссертация соответствует требованию указания в виде ссылок на заимствованные материалы.

Основываясь на вышеизложенном, считаю, что диссертационная работа «Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности плазмодинамическим методом» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и содержащей значимые научные и практические результаты, а её автор Шаненкова Юлия Леонидовна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.12 – техника высоких напряжений.

Дополнительный член диссертационного
совета ДС.ТПУ.19

Профессор отделения электроэнергетики
и электротехники ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
доктор технических наук по
специальности 05.14.12 – Техника
высоких напряжений, профессор

Ушаков
Василий
Яковлевич

06.05.2019

Подпись Ушакова В.Я. заверяю:
Ученый секретарь Ученого совета ТПУ



О.А. Ананьева

Полное наименование организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Юридический адрес: г. Томск, проспект Ленина, дом 30

Телефон: 8 (3822) 56-44-10

Эл. адрес: vyush@tpu.ru

Должность: Профессор отделения электроэнергетики и электротехники

Ф.И.О.: Ушаков Василий Яковлевич