ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ДС.ТПУ.19,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

решение диссертационного совета от 29 мая 2019 года № 2

О присуждении Шаненковой Юлии Леонидовне, гражданке Российской Федерации (РФ), ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация **«Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности плазмодинамическим методом»**
по специальности 05.14.12 – Техника высоких напряжений принята к защите 4 марта 2019 г., протокол № 1, диссертационным советом ДС.ТПУ.19, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования (ФГАОУ ВО) «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Министерство науки и высшего образования РФ, 634050, г. Томск, пр. Ленина 30, утвержденным приказом ректора Национального исследовательского Томского политехнического университета № 15895 от 06.12.2018 г.

Соискатель Шаненкова Юлия Леонидовна 1991 года рождения,
в 2014 году окончила ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Минобрнауки России,
в августе 2018 года соискатель окончила очную аспирантуру ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Минобрнауки России,
работает ассистентом Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Министерство науки и высшего образования РФ.

Диссертация выполнена в Отделении электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский

Томский политехнический университет», Министерство науки и высшего образования РФ.

Научный руководитель – доктор технических наук, с.н.с. Сивков Александр Анатольевич, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, профессор.

Дополнительно введенные члены диссертационного совета ДС.ТПУ.19:

Ушаков Василий Яковлевич, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики;

Пушкарев Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", профессор Отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий.

Официальные оппоненты:

Рыжков Сергей Витальевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (г. Москва), профессор кафедры теплофизики;

Королев Юрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки (ФГБУН) Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) (г. Томск), главный научный сотрудник лаборатории низкотемпературной плазмы,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Выбор официальных оппонентов и дополнительно введенных членов диссертационного совета обосновывается высокой профессиональной компетенцией в технике высоких напряжений, достижениями и наличием публикаций в данной области науки и практики.

Соискатель имеет 70 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 15 работ (также один патент РФ на полезную модель), из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 9 работ, 3 из которых относятся к первому квартилю. Общий объём публикаций составляет 36,84 печатных листов с долей авторского участия соискателя не менее 60%. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Shanenkova Y.L.** High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity / A.A. Sivkov, Y.L. Shanenkova, A.S. Saygash, I.I. Shanenkov // Surface and Coatings Technology. - 2016. - Vol. 292. - p. 63-71.
2. **Колганова (Шаненкова) Ю.Л.** Влияние свойств медного покрытия на алюминиевой контактной поверхности на переходное сопротивление / А.А. Сивков, А.С. Сайгаш, Ю.Л. Колганова // Электротехника. – 2013. - № 8. - С. 11-14.
3. **Shanenkova Y.L.** Deposition of a TiC/Ti coating with a strong substrate adhesion using a high-speed plasma jet / A.A. Sivkov, I.I. Shanenkov, A.Y. Pak, D.Y. Gerasimov, Y.L. Shanenkova // Surface and Coatings Technology. – 2016. - Vol. 291. - p. 1-6.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1) Отзыв на автореферат от д.т.н., г.н.с. **Калиты Василия Ивановича** заведующий лабораторией физикохимии и технологии покрытий ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва (с замечаниями); 2) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., доцента **Павленко Анатолия Александровича** главный научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов ФГБУН Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск (с замечаниями); 3) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., профессора **Минаковой Натальи Николаевны** профессор кафедры прикладной физики, электроники и информационной безопасности ФГБОУ ВО "Алтайский государственный университет", г. Барнаул (с замечаниями); 4) Отзыв на автореферат от к.т.н. **Решетова Александра Александровича** доцент кафедры кибернетических систем ФГБОУ ВО "Тюменский индустриальный университет", г. Тюмень (с замечаниями); 5) Отзыв на автореферат от к.ф.-м.н., доцента **Кирко Дмитрия Леонидовича** доцент каф физика плазмы ФГАОУ ВО

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва (без замечаний); 6) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., доцента **Косарева Владимира Федоровича** заведующий лабораторией “Физики многофазных сред” и члена-корреспондента Российской академии наук (РАН) **Клинкова Сергея Владимировича** главный научный сотрудник лаборатории “Физики многофазных сред” ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск (с замечаниями); 7) Отзыв на автореферат от д.т.н., г.н.с. **Сергеева Виктора Петровича** заведующий лабораторией материаловедения покрытий и нанотехнологий ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск (с замечаниями); 8) Отзыв на автореферат от к.т.н., **Бекетова Игоря Валентиновича**, заведующий лабораторией импульсных процессов, ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург (с замечаниями); 9) Отзыв на автореферат от д.ф.-м.н., члена-корреспондента НАН Беларуси **Асташинского Валентина Мироновича** заместитель директора по научной работе и инновационной деятельности, заведующий отделением физики плазмы и плазменных технологий, заведующий лабораторией физики плазменных ускорителей Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск (без замечаний); 10) Отзыв на автореферат от д.т.н., с.н.с., **Юшкова Георгия Юрьевича**, главный научный сотрудник лаборатории плазменных источников, Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск (с замечаниями)); 11) Отзыв на автореферат от д.т.н., профессор, **Лавриновича Валерия Александровича**, главный конструктор по электротехническому оборудованию, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина – филиал «Всероссийский электротехнический институт», г. Москва (с замечаниями); 12) Отзыв на автореферат от д.т.н., **Шарифуллина Фарида Саидовича**, профессор на кафедре «Плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов», Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань (с замечаниями).

Все отзывы положительные, замечания являются рекомендательными и касаются недостаточности информации об условиях образовании

интерметаллидных фаз в толще покрытия, методики оценки прочности сцепления медного покрытия с алюминиевой подложкой, отсутствует подробная информация об измерениях тока разряда, напряжения на электродах ускорителя, расчете мощности разряда и величины подведенной энергии, не приведены данные о стабильности полученных медных покрытий, в автореферате на некоторых рисунках плохо различимы надписи и не показаны доверительные интервалы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан метод нанесения медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности, включая внутренние конические, основанный на использовании усовершенствованного высоковольтного сильноточного импульсного коаксиального магнитоплазменного ускорителя эрозионного типа с медными электродами и ускорительным каналом, что подтверждено авторскими публикациями и патентом на полезную модель;

предложены новые подходы и технические решения по способу инициирования дугового разряда в ускорительном канале с использованием углеродной перемычки с оптимальным начальным сопротивлением 300÷600 Ом и конструкции электрода-ствола с двухслойной стенкой (нержавеющая сталь-медь), обеспечивающей повышение механической прочности и более эффективное использование электромагнитной энергии на электроэрозионную наработку материала и его ускорение до сверхзвуковых скоростей;

доказаны преимущества плазмодинамического метода нанесения медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности без их предварительной подготовки в атмосфере инертных газов и воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре, обеспечивающих надежное совмещение контактных пар медь-алюминий и снижение переходного сопротивления до четырех раз за счёт плотного прилегания с образованием граничного слоя взаимного перемешивания меди и алюминия, синтеза и формирования высокотвёрдых слоев интерметаллидных фаз ($CuAl_2$ и Al_4Cu_6) в толще покрытия, формирования естественной шероховатости поверхности покрытия;

введены уточнения закономерностей электроэрозионной наработки медного материала с поверхности ускорительного канала в более широком диапазоне

изменения его диаметра и при двухимпульсном режиме работы ускорителя, а также введены коррективы в метод расчета переходного контактного сопротивления и показана возможность его использования для расчета переходного сопротивления контактной пары медь-алюминий для случая медного плазмодинамического покрытия при определении параметров шероховатости методами бесконтактной профилометрии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана целесообразность использования высокоплотной сверхзвуковой импульсной струи медной электроэрозионной плазмы, истекающей из ускорительного канала коаксиального магнитоплазменного ускорителя для нанесения медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности различной конфигурации (плоские, внутренние конические) с высокой прочностью сцепления до 2500 МПа, обеспечивающего многократное снижение переходного сопротивления контактных пар медь-алюминий и алюминий-алюминий различной конфигурации;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** методы регистрации высоких импульсных напряжений и больших токов (порядка 10^5 А), высокоскоростной фото и видео регистрации быстропротекающих процессов развития ударно-волновой структуры сверхзвуковых струй, определения величин переходного контактного сопротивления (порядка 10^{-6} Ом) вольтамперным способом с использованием молекулярного емкостного накопителя энергии емкостью С=72 Ф, рентгеновского структурно-фазового анализа кристаллических материалов, оптической и сканирующей электронной микроскопии, бесконтактной лазерной профилометрии поверхности, определения физико-механических параметров твердых тел;

изложены основные этапы протекания сложного многофакторного плазмодинамического процесса нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности, а также гипотеза зависимости качества покрытия от местоположения обрабатываемой поверхности относительно положения прямого скачка уплотнения ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи;

раскрыты факторы плазмодинамического процесса, оказывающие влияние на качественные характеристики медного покрытия, на его фазовый состав микроструктуру, шероховатость, и, как следствие, на величину переходного сопротивления контактных пар медь-алюминий с медным покрытием и алюминий-алюминий с медными покрытиями обеих поверхностей;

изучено влияние параметров плазмодинамической системы на переходное сопротивление контактных пар и установлена зависимость величины площади медного покрытия на алюминиевой контактной поверхности от основных параметров ускорителя;

проведена модернизация плазмодинамической системы в целом за счет использования новых технических решений в конструкции ускорителя, оптимизации режима работы и основных энергетических и конструктивных параметров.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан и внедрен плазмодинамический метод нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности стандартных алюминиевых шинопроводов, электроконтактных наконечников, и внутренние поверхности конусных отверстий контактных терминалов вакуумных выключателей BB/Tel серии Shell, обеспечивающего совмещение контактной пары, снижение переходного сопротивления, и, следовательно, потерь энергии на контактах силовых электрических сетей;

определены перспективы использования плазмодинамического метода в качестве научно-технической основы для создания технологической промышленной установки по нанесению медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности различных конфигураций стандартных электротехнических токоведущих элементов;

созданы сильноточный высоковольтный коаксиальный импульсный магнитоплазменный ускоритель с медными электродами и ускорительным каналом на токи порядка 100 кА и энергию до 100 кДж с электропитанием от импульсного емкостного накопителя энергии; источник импульсных токов на основе

молекулярных конденсаторов МИГ-100 для измерения переходных сопротивлений порядка 10^{-6} Ом вольтамперным способом;

представлены рекомендации по регулированию площади и характеристик медного покрытия путем изменения энергетических и конструктивных параметров импульсного источника питания и ускорителя, режима его работы, расстояния расположения обрабатываемой поверхности от среза ускорительного канала, а также схемы воздействия плазменной струи на обрабатываемую поверхность.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты **получены** с использованием комплекса современного аналитического откалиброванного в установленном порядке оборудования, достигнута повторяемость и воспроизводимость экспериментов;

теория построена на проверяемых экспериментальных и аналитических данных и не противоречит ранее опубликованным работам по теме диссертации;

идея базируется на обобщении передового опыта и результатов экспериментальных исследований, изложенных в современной литературе, по нанесению медных покрытий и анализу их качественных характеристик;

использовано сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике;

установлено качественное соответствие результатов, полученных автором с результатами, представленными в опубликованных работах по данной тематике;

использованы современное оборудование и методы анализа экспериментальных данных, а также современная аппаратура для регистрации параметров быстропротекающих электромагнитных процессов.

Личный вклад соискателя состоит в планировании, постановке и проведении экспериментов по разработке, оптимизации параметров коаксиального магнитоплазменного ускорителя с медными электродами за счет использования конструкции двухслойного электрода-ствола в одно- и двухимпульсном режимах работы и получению медных покрытий на плоских и внутренних конических алюминиевых поверхностях, анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных. Автором сформулированы научные положения и основные выводы диссертации, выполнены и опубликованы научные работы.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи определения оптимальных условий, энергетических и конструктивных параметров коаксиального магнитоплазменного ускорителя для нанесения устойчивых медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности, обеспечивающие надежное совмещение сильноточных контактных пар медь-алюминий и снижение их переходного сопротивления, что имеет существенное значение для электроэнергетики и электротехники (соответствие требованию п. 8 абз. 2 Порядок присуждения ученых степеней в НИ ТПУ приказ №93/од от 06.12.2018 г.).

На заседании 29 мая 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Шаненковой Ю.Л. учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 7 человек (из них 6 докторов наук по научной специальности 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»), участвовавших в заседании, из 3 человек, входящих в состав совета, и дополнительно введенных на защиту 4 человек, проголосовали: за – 7, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Зам. Председателя диссертационного совета ДС.ТПУ.19 — Пичугин Владимир Федорович

Ученый секретарь диссертационного совета ДС.ТПУ.19 — Ивашутенко Александр Сергеевич