



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке и
трансферу технологий,
д.ф.-м.н.

Л.Г. Сухих
«30 » мая 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на диссертационную работу Почетухи Василия Витальевича «Формирование структуры и свойств электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и упрочняющих фаз методом электронно-ионно-плазменного напыления», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертационного исследования

Электрические контакты для тяжелых условий эксплуатации часто работают в условиях высокого напряжения (сотни киловольт), где их свариваемость и дуговой износ, возникающие в процессе коммутации, являются серьезной проблемой. Наиболее часто используемыми устройствами, в которых применяются контакты переключателей мощных электрических сетей, являются контакторы, автоматические выключатели и пускатели. На сегодняшний день не существует расчётного метода, позволяющего подобрать оптимальный материал электрического контакта с позиции структуры и свойств для использования в конкретном коммутационном аппарате. Точный выбор электроконтактного материала в каждом конкретном случае определенной марки электрических контактов основывается, в первую очередь, на проведении экспериментов по исследованию структуры и свойств, а также по их изучению в аналогичных электрических контактах.

Контактные материалы из серебра и никеля обычно используются в устройствах средней мощности: переключатели, реле, контакторы, автоматические выключатели переменного тока. Контактное сопротивление таких сплавов относительно низкое и остается стабильным с течением времени по сравнению с другими сплавами серебра, но по мере увеличения содержания никеля стойкость материала к дуговой эрозии улучшается, а контактное сопротивление также увеличивается. Одним из недостатков серебряно-никелевых сплавов является снижение его дугостойкости при силе тока более 100 А.

Серебряно-углеродные электроконтактные материалы используются как контакты автоматических выключателей и коммутационных устройств из-за их превосходных антисварочных свойств и относительно стабильного контактного сопротивления. Недостатками таких материалов являются относительно высокая скорость эрозии, плохая подвижность дуги, ограниченная пластичность и относительно высокая стоимость.

Вх. № 572

02.06.2022г.

В коммутационных устройствах большой мощности наиболее часто используются контактные материалы на основе серебра и оксидов олова и индия благодаря их высокой и стабильной электропроводности, антисварочных и дугогасительных свойств. Сочетание в материале электрического контакта тугоплавких частиц, таких как вольфрам, карбид вольфрама и молибден с серебром используется для производства самых прочных материалов для энергетики.

В условиях постоянного роста цен на драгоценные металлы, в том числе серебро, все более актуальным становится вопрос максимального эффективного использования таких материалов. Однако, получить композиционные покрытия известными методами напыления к настоящему моменту времени не представлялось возможным. В диссертационной работе Почетухи В.В. предлагается формировать на медных электрических контактах покрытия систем Ni–Ag–N, Ni–C–Ag–N, WC–Ag–N и SnO₂–In₂O₃–Ag–N методом электронно-ионно-плазменного напыления. Выбранные системы используются в промышленности в качестве объёмных электрических контактов.

В связи с этим диссертационная работа Почетухи В.В., посвященная исследованию природы влияния электровзрывного напыления, последующей электронно-пучковой обработки и азотирования на формирование структуры и изменение свойств поверхности медных дугостойких электрических контактов, является актуальной, а отраженные в ней результаты имеют важное научное и прикладное значение

Общая характеристика работы.

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка использованных источников. Текст изложен на 143 страницах, включает 55 рисунков и 10 таблиц. Список использованной литературы содержит 142 наименования.

Во введении приведены актуальность диссертационного исследования, показана научная новизна, приведены основные результаты исследования, положения выносимые на защиту, а также теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** проведен анализ литературных источников, посвященных особенностям формирования структуры и свойств композиционных электроэрозийностойких материалов, применяемых в качестве электрических контактов переключателей мощных электрических сетей. Показана перспективность использования в таких устройствах композиционных покрытий.

Во **второй главе** приведены методики экспериментов по изучению особенностей микро- и наноструктуры, механических и электрофизических свойств исследуемых покрытий. Для исследования структуры были использованы методы сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, а также метод рентгенофазового анализа. Также объясняется выбор режимов формирования покрытий методом электронно-ионно-плазменного напыления.

В **третьей главе** приведены результаты исследования структуры и свойств электроэрозийностойких покрытий на основе серебра, никеля и нитридов никеля, полученных на медных электрических контактах. Также показано как влияет добавление углеграфитового волокна на такие покрытия. Показано влияние режимов электронно-ионно-плазменного напыления на формирование определенной структуры и свойств.

В четвертой главе исследованы структура и свойства электроэрозионно-стойких покрытий на основе серебра, карбидов вольфрама, нитридов и карбонитридов вольфрама, а также покрытий системы $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3\text{-Ag}$. Результаты о строении и свойствах сложных многокомпонентных покрытий получены с помощью современных методов исследований структуры и фазового состава.

В пятой главе приведены результаты внедрения результатов, полученных в диссертационном исследовании на ООО «Ремкомплект», ООО «ВЕСТ 2002», ООО «Мысковский завод электромонтажных изделий» и ООО «Сибирские промышленные технологии». Приведены сведения о внедрении результатов диссертационной работы в учебный и образовательный процесс.

В заключении изложены основные результаты исследования.

В приложениях приведены справки об использовании и апробации результатов диссертационной работы.

Научная новизна полученных результатов

Анализ диссертационной работы показал, что автором выполнен большой объем экспериментальных исследований, позволивший получить новые результаты, представляющие теоретический и практический интерес и отличающиеся научной новизной, связанной с применением сложных композиций покрытий и комплексного применения методов электронно-ионно-плазменного напыления.

К основным результатам можно отнести следующие:

1. Разработаны способы поверхностного упрочнения медных электрических контактов, включающие электронно-ионно-плазменное напыление покрытий систем Ni-Ag-N , Ni-C-Ag-N , WC-Ag-N и $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3\text{-Ag-N}$.
2. Впервые установлено влияние режимов электронно-ионно-плазменного напыления на изменение фазового состава поверхностных слоев, повышение значений электроэрозионной стойкости в условиях дуговой эрозии, износостойкости, твердости.
3. Изучены структурно-фазовые состояния покрытий и показано, что упрочнение достигается вследствие формирования высокодисперсной структуры систем Ni-Ag-N , Ni-C-Ag-N , WC-Ag-N и $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3\text{-Ag-N}$.
4. Показано влияние электронно-ионно-плазменного напыления медных электрических контактов на структуру, износостойкость поверхности, коэффициент трения, модуль Юнга, нано- и микротвердость, электроэрозионную стойкость в условиях дуговой эрозии.
5. Установлены зависимости изменения параметров кристаллической решетки и областей когерентного рассеяния фаз, образующихся в результате электронно-ионно-плазменного напыления.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений, сформулированных в диссертации, подтверждается грамотностью постановки решаемых задач, корректным использованием базовых положений теории физики конденсированного состояния, а также большим объемом экспериментальных данных и сопоставлением полученных методами современного физического материаловедения результатов с результатами других авторов. Результаты работы соответствуют поставленным целям и задачам исследования. Все сформулированные в работе научные положения, выводы и рекомен-

дации имеют достаточное обоснование. Научные результаты диссертации, выносимые на защиту, получены лично автором.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертанта не вызывает сомнения. Они заключаются в расширении представлений о физических процессах формирования и эволюции структуры и фазового состава и свойств поверхностности меди марки М00, модифицированной электровзрывным напылением с использованием композиционных электрически взрывааемых проводников составов Ni–Ag, Ni–C–Ag, WC–Ag и SnO₂–In₂O₃–Ag, последующим облучением высокоинтенсивным импульсным электронным пучком и азотированием в различных режимах.

Апробированный в работе на электротехнической меди марки М00 метод комбинированной обработки, обеспечивающий увеличение износостойкости на 56–160 % и аналогичные объемным материалам значения коммутационной износостойкости, нашел применение на предприятиях промышленности. Это подтверждается справками о внедрении и использовании результатов, представленными в Приложении к диссертации. Полученные автором новые научные результаты могут служить как фундаментальной основой внедрения предложенного метода комбинированной обработки на предприятиях промышленности с целью упрочнения медных электрических контактов различной номенклатуры, так и для восстановления поверхности отработавших электрических контактов после проведения дополнительных исследований.

Научные результаты, полученные в работе, могут быть использованы в научных учреждениях и образовательных организациях, таких как Кемеровский государственный университет, Кузбасский государственный технический университет, Новосибирский государственный технический университет, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Институт проблем машиноведения РАН, Институт физики твёрдого тела РАН, Институт физики металлов УрО РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Институт материаловедения и физики металлов им. Г.В. Курдюмова ЦНИИ черной металлургии им. И.П. Бардина, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» для развития фундаментальных основ влияния электровзрывного напыления, последующей электронно-пучковой обработки и азотирования на структуру и свойства металлов и сплавов. Результаты работы могут быть рекомендованы для использования в качестве учебного материала в курсах лекций и при подготовке курсовых работ по «Физике конденсированного состояния», «Физическому материаловедению» и при написании монографий.

Коллективу научной школы «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» СибГИУ необходимо продолжить работу в области поверхностного упрочнения металлов и сплавов с привлечением новых материалов, используя более широкий комплекс физических методов исследований.

Подтверждение опубликования основных результатов исследования.

Основные результаты работы достаточно полно опубликованы в научной печати в статьях (6 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 1 в издании, входящем в перечень Scopus и Web of Science, относящемся к Q1), тезисах до-

кладов и обсуждены на Всероссийских и Международных конференциях. Интеллектуальная собственность защищена 3 патентами РФ на изобретения и 2 патентами РФ на полезную модель.

В качестве замечаний по диссертационной работе можно отметить следующие:

1. Во введении к работе не нашли должного отражения работы в данном направлении, проводимые в ИФПМ СО РАН и ИТПМ СО РАН, в последнем проводились работы именно по нанесению покрытий.
2. Особенностью настоящей работы является большое количество полученных в ней новых результатов. Вместе с тем, для их правильной оценки необходимо провести более детальное сравнение с результатами, полученными другими способами, использующими концентрированные потоки энергии.
3. Второе и четвертое положение выносимые на защиту громоздки, что не оправдано.
4. В четвертом положении отмечена физическая интерпретация формирования повышенных механических, электрофизических и трибологических свойств покрытий. Однако суть интерпретации не описана.
5. При оценке свойств полученных покрытий не проведено исследование одной из важных характеристик – адгезии.
6. На рисунке 3.2 приведено распределение элементов в зависимости от толщины покрытия, хотя правильнее было бы написать по сечению покрытия.
7. На рисунке 4.15 представлены зависимости контактного сопротивления от числа циклов включения, однако не приводятся доверительные интервалы для полученных значений. Такое же замечание можно сделать в отношении данных представленных на рисунке 4.18.

По существу, сформулированные замечания не снижают положительного впечатления от работы, а лишь подчеркивают сложность, комплексность и важность решаемой проблемы автором диссертации В.В. Почетухой.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

Заключение

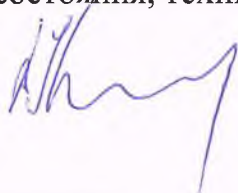
В целом диссертационная работа Почетухи В.В. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи выявления природы упрочнения контактов переключателей мощных электрических сетей путем электронно-ионно-плазменного напыления износостойких покрытий составов Ni–Ag–N, Ni–C–Ag–N, WC–Ag–N и SnO₂–In₂O₃–Ag–N, имеющей существенное значение для физики конденсированного состояния.

По актуальности проблемы, уровню и объему выполненных исследований, научной новизне и практической значимости результатов, достоверности выводов представленная работа соответствует паспорту специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» и требованиям п.9 «Положения о по-

рядке присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Автор диссертационной работы Почетуха Василий Витальевич заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв на диссертационную работу составлен и утвержден на научном семинаре отделения материаловедения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (протокол № 68 от « 30 » мая 2022 г.).

Председатель семинара
Заведующий кафедрой –
руководитель отделения
на правах кафедры,
доктор технических наук,
профессор (01.04.07 – Физика
конденсированного состояния, технические науки)



Клименов Василий Александрович

Ученый секретарь семинара
Д.т.н., доцент (05.16.09. –
Материаловедени
(машиностроение))



Ковалевская Жанна Геннадьевна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО ТПУ)

634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30, тел.: (+7 3822) 60-62-60 или 70-17-77 доб. 1021

<http://tpu.ru>, e-mail: scs@tpu.ru

Подписи В.А. Клименова и Ж.Г. Ковалевской заверяю,
Ученый секретарь Ученого совета ТПУ, к.т.н



Е.А. Кузнецов

Дата подписания отзыва 30.05. 2022 г.