

## ОТЗЫВ

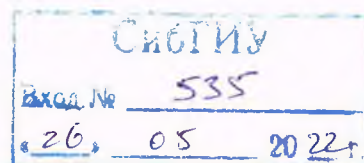
официального оппонента на диссертационную работу  
Почетухи Василия Витальевича «Формирование структуры и свойств  
электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и упрочняющих фаз  
методом электронно-ионно-плазменного напыления», представленную  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

### 1. Актуальность темы диссертации

Материалы электрических контактов переключателей мощных электрических сетей, должны обладать определенным комплексом свойств, включающим высокую электропроводность, электроэрозионную стойкость, износостойкость, твердость и др. Эти материалы могут использоваться в качестве объемных проводников, таких как медь, медные сплавы, алюминий, алюминиевые сплавы, серебро, серебряные сплавы и т.д. Другие проводники, такие как драгоценные металлы, олово, сплавы олова и сплавы серебра используются в качестве покрытий на электрических контактных поверхностях. Диапазон используемых материалов, применяемых для изготовления электрических контактов, определяется их конечным назначением, требованиями к сроку службы электрического контакта и т.д. Электрические контакты, изготовленные из меди и сплавов на основе меди, часто покрывают такими металлами, как серебро, олово или даже золото или палладий. Выбор материала и толщины покрытия также определяется требованиями к максимальному контактному сопротивлению, устойчивости к механическому износу и другим факторам, ограничивающим эксплуатационные характеристики. Чистое серебро обладает самой высокой электропроводностью и теплопроводностью среди всех материалов для электрических контактов. Серебро не окисляется на воздухе, но имеет склонность к образованию сульфидных и хлоридных пленок. Использование серебра в электрических контактах в основном сосредоточено на мощных электрических соединениях. Серебро также склонно к образованию вискеро́в, содержащих высокую концентрацию серосодержащих атмосферных загрязнителей, а также к образованию дендритов в присутствии поверхностных пленок влаги под действием разности потенциалов между контактирующими поверхностями.

Необходимость разработки новых дугостойких покрытий актуальна в настоящее время, поскольку только высочайшая степень защиты контактов переключателей мощных электрических сетей может удовлетворить современные требования напряженной энергетической жизни России и мира. Для физики конденсированного состояния в этом ключе актуальным является разработка новых эффективных методов формирования высокого комплекса свойств, обусловленного созданием определенной структуры.

В связи с вышеизложенным тема диссертационной работы Почетухи В.В., посвященная исследованию особенностей и физической природы



формирования структуры и свойств электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и упрочняющих фаз, полученных методом электронно-ионно-плазменного напыления на медных контактах переключателей мощных электрических сетей, является актуальной.

## **2. Новизна исследования и полученных результатов**

В диссертационной работе предложен новый способ комбинированной обработки медных электрических контактов, заключающийся в электровзрывном напылении композиционных покрытий на основе серебра и упрочняющих фаз Ni, C, WC, SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ag и последующей электронно-пучковой обработки напыленного покрытий и их азотированию, приводящим к гомогенизации покрытий, формированию новых упрочняющих фаз и многократному повышению микро- и нанотвердости, электроэрозионной стойкости в условиях дуговой эрозии, износостойкости и снижению коэффициента трения. Выявлены особенности структурно-фазовых состояний поверхностных слоев композиционных покрытий, полученных при электронно-ионно-плазменном напылении покрытий систем Ni–Ag–N, Ni–C–Ag–N, WC–Ag–N и SnO<sub>2</sub>–In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Ag–N. Показано, что в зоне обработки формируется градиентная многофазная структура, толщина слоев которой коррелирует с различными режимами электронно-ионно-плазменного напыления. Углублены знания о физических и химических процессах формирования структуры и свойств композиционных покрытий «серебряная матрица – включения упрочняющих фаз», протекающих при электровзрывном напылении, последующей электронно-пучковой обработке и азотировании, в частности, о влиянии на результаты обработки, полученные с использованием композиционных электрически взрывааемых проводников.

## **3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений**

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертации обеспечена использованием современных методов исследования структурно-фазовых состояний металлов и сплавов – сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновского, спектрального и фазового анализов. Результаты исследований согласуются с литературными данными по аналогичным видам комбинированной обработки других материалов.

## **4. Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций**

Научная значимость результатов определяется совокупностью новых знаний о градиентном строении напыленных покрытий, фазовом составе и структуре композиционных покрытий, сформированных при комбинированной обработке, включающей электровзрывное напыление, последующую электронно-пучковую обработку поверхности напыленного покрытия и его азотирование.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные способы упрочнения приводят к значительному повышению электроэрозионной стойкости в условиях дуговой эрозии, нанотвердости, износостойкости и снижению коэффициента трения, которые являются одними



из основных показателей уровня физико-механических, электрофизических и трибологических свойств металлов и сплавов.

### **5. Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям**

Диссертационная работа Почетухи В.В. по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует п. 9 паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния (технические науки). Диссертационная работа Почетухи В.В. построена логично и грамотно, ее оформление соответствует действующим стандартам и требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

#### ***Анализ содержания диссертации.***

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка литературы, содержащего 142 источника, и приложения. Она изложена на 143 страницах, включает 55 рисунков и 10 таблиц.

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, приведены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, отмечен личный вклад автора, соответствие паспорту специальности, указана структура и объем диссертации.

*Первая глава* «Композиционные материалы и покрытия для электроэрозионностойких электрических контактов» посвящена анализу результатов, полученных к настоящему времени в области упрочнения и защиты поверхности материалов электрических контактов, в том числе с использованием концентрированных потоков энергии и различными методами напыления покрытий. Рассмотрены работы по методам формирования объемных дугостойких материалов для их последующего использования в качестве контактов переключателей мощных электрических сетей. Также рассмотрены различные методы формирования электроэрозионностойких покрытий, в том числе электровзрывное напыление. Показано, что в ряде случаев значительного повышения функциональных свойств поверхности удастся достичь при использовании комбинированной обработки, включающей различные методы обработки поверхности концентрированными потоками энергии. Одним из эффективных методов такой упрочняющей обработки поверхности является электровзрывное напыление, которое основано на импульсном оплавлении поверхности подложки (мишени) многофазной плазменной струей продуктов электрического взрыва проводников. В результате такой обработки кардинально изменяются структура и фазовый состав зоны оплавления, многократно повышаются структурно-чувствительные свойства, такие как электроэрозионная стойкость, микро- и нанотвердость и износостойкость. Использование электровзрывного напыления в сочетании с последующей импульсно-периодической электронно-пучковой обработкой позволяет дополнительно повысить уровень свойств и улучшить качество поверхности. Все это обуславливает интерес к дальнейшим исследованиям в

области комбинированной обработки, включающей совместное использование электровзрывного напыления, электронно-пучковой обработки и азотирования. Также автор акцентирует внимание на влияние добавления редкоземельных металлов на свойства дугостойких покрытий на основе серебра.

Изложенные в главе результаты анализа литературных источников свидетельствуют о хорошем знании проблемы и позволяют сформулировать цель работы.

**Во второй главе** «Оборудование, материалы и методы исследований» приведено описание экспериментальных установок, режимы и параметры обработки поверхности медной подложки. Обоснован выбор электротехнической меди марки М00 для проведения упрочнения как одного из материалов электрических контактов, которые находят все большее применение в промышленности, однако обладают рядом недостатков, таких как низкая электроэрозионная стойкость и износостойкость. Рассмотрены методы исследования микроструктуры, фазового состава, электроэрозионной стойкости в условиях дуговой эрозии, износостойкости, нано- и микротвердости поверхностных слоев. Среди них – микрорентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализ, электронная сканирующая и просвечивающая микроскопия.

Выбор и многообразие взаимодополняющих методов исследования позволяют утверждать, что исследования проведены в соответствии с необходимыми требованиями.

Третья, четвертая и пятая главы посвящены оригинальным результатам исследования и их обсуждению.

**В третьей главе** «Разработка электроэрозионностойких покрытий для электрических контактов нагруженностью 10–100 А» приведены результаты исследования электроэрозионной стойкости в условиях дуговой эрозии. Представлены нанотвердость и модуль Юнга поверхности обработки медных электрических контактов, подвергнутых электровзрывному напылению, последующим электронно-пучковой обработки и азотированию покрытий систем Ni–Ag–N и Ni–C–Ag–N, а также результаты трибологических испытаний сформированных поверхностных слоев.

Приведены результаты исследований, в которых показано, что нанотвердость поверхности облучения превышает значение твердости медной подложки в 1,13–1,40 раза. Проведенные исследования показали, что формирование покрытий систем Ni–Ag–N и Ni–C–Ag–N комбинированным способом приводит к повышению износостойкости поверхности обработки в условиях сухого трения скольжения на 54 % для системы Ni–Ag–N и в 1,6 раза для системы Ni–C–Ag–N по сравнению с медной подложкой. Сформированные покрытия удовлетворяют испытаниям пускателей на электроэрозионную стойкость в условиях дуговой эрозии. Обоснование повышения этих свойств объясняется с позиции корреляции с нанокристаллической структурой формируемых покрытий.



**В четвертой главе** «Разработка электроэрозионностойких покрытий для электромагнитных пускателей и контакторов» представлены результаты исследования рельефа поверхности, строения по глубине, структуры и фазового состава покрытий систем WC–Ag–N и SnO<sub>2</sub>–In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Ag–N после электронно-ионно-плазменного напыления. Применение композиционного электрически взрывааемого материала при электровзрывном напылении позволяет придать упрочняемой поверхности дополнительный уровень функциональных свойств.

Электровзрывное напыление электротехнической меди композиционными проводниками на основе систем WC–Ag и SnO<sub>2</sub>–In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Ag приводит к формированию покрытий, толщина которых достигает 90 мкм. Последующая электронно-пучковая обработка сопровождается формированием слоя с гомогенизированной нанокристаллической структурой толщиной до 40 мкм. Азотирование, проводимое на финишном этапе обработки, обеспечивает формирование упрочняющих фаз, содержащих азот. Исследованы электроэрозионная стойкость, нанотвердость, износостойкость, коэффициент трения и модуль Юнга полученных покрытий.

Объем выполненных исследований показывает основательность подхода при решении поставленных задач.

**В пятой главе** «Апробирование результатов диссертационной работы» автор привел сведения о практическом применении результатов диссертации на промышленных предприятиях и учебном процессе сибирского ВУЗа. Опыт применения электровзрывного упрочнения поверхности конкретных деталей, их последующей электронно-пучковой обработки и азотирования, показавших возможность повышения их функциональных свойств в условиях эксплуатации, закладывает основы будущего практического внедрения метода в технологические циклы.

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований.

В конце диссертации приведены **Список литературы и приложение**, содержащие справки об использовании результатов работы в производственном процессе промышленных предприятий, научной и учебной деятельности.

Основное содержание диссертационной работы отражено в 21 печатной работе, в числе которых 6 статей в журналах из перечня ВАК, 1 статья в издании, входящем в перечень Scopus и Web of Science (входит в Q1), 3 патента РФ на изобретения и 2 патента РФ на полезную модель, остальные – в материалах международных и всероссийских конференций, семинаров, школ и чтений.

Диссертационная работа написана грамотно, в хорошем стиле и логически построена. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации.

## **6. Замечания по работе**

В качестве **замечаний** по содержанию работы можно указать следующее:

1. В таблице 2 автореферата (С. 13) приведено значение твердости меди – 1270 МПа. В диссертации не отмечены причины, вызывающие такую высокую

твердость. Здесь же приведено значение модуля Юнга для меди – 11.5 ГПа. Но по литературным данным для меди  $E=110-130$  ГПа.

2. В работе приведены данные по скользящему контакту покрытий, хотя покрытия получены для разрывных контактов. Не представлено обоснование необходимости проведения этих экспериментов по трению.

3. Не показана в явном виде взаимосвязь между параметрами структуры (размеры кристаллитов и их параметры решётки, размеры областей когерентного рассеяния и т.п.) и функциональными характеристиками покрытий.

4. Отсутствует сравнение функциональных характеристик предложенных покрытий с такими же характеристиками стандартного композита для разрывных контактов состава W-Cu.

## 7. Заключение

Представленные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне и содержит оригинальные, новые и достоверные результаты. Диссертационная работа Почетуки Василия Витальевича является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, вносит существенный вклад в решение задачи упрочнения контактов переключателей мощных электрических сетей путем электронно-ионно-плазменного напыления износостойких и электроэрозийноустойчивых покрытий составов Ni-Ag-N, Ni-C-Ag-N, WC-Ag-N и SnO<sub>2</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ag-N и способствует развитию физики конденсированного состояния. Можно считать, что диссертационная работа Почетуки Василия Витальевича по экспериментальному и методическому уровням, объёму работы, научной новизне, научной и практической значимости, актуальности полностью отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям и соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, а её автор - Почетука Василий Витальевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния)



**Фадин Виктор Вениаминович**

Даю свое согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационное дело В.В. Почетуки

Место работы: федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук».

Должность: старший научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности.

Адрес: 634055, Россия, Томская область, г. Томск, пр. Академический, 2/4, ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук»

Раб. тел. +7 (952) 150-22-53. E-mail: fvv@ispms.ru

Подпись Фадына Виктора Вениаминовича удостоверяю.

Ученый секретарь федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук»



Матолыгина Наталья Юрьевна

Адрес: Академический пр., 2/4, Томск, Томская обл., 634055

Раб. тел. +7 (3822) 492-125, E-mail: ksa@ispms.ru

Дата подписания отзыва 26 мая 2022 г.