

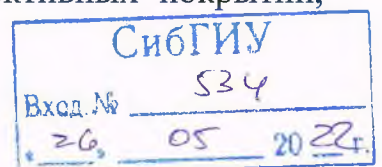
ОТЗЫВ

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 к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации

Одним из определяющих факторов при выборе материала для электрических контактов является допустимая нагрузка по току. Для практических приложений чистое серебро или медь, часто являются наиболее подходящими контактными материалами, поскольку они обеспечивают наименьшее сопротивление электрическому току и устойчивы к окислению. Однако, по мере увеличения силы тока на контактном интерфейсе, температурные характеристики таких материалов часто превышаются из-за возникновения перегрева, связанного с условиями дугового разряда и увеличением электрического тока. В связи с этим возникает необходимость разрабатывать новые сплавы для электрических контактов.

Добавление тугоплавких металлов в контактный сплав является надежным решением, так как делает контакт более устойчивым к разрушению в условиях высоких тепловых нагрузок и высокого контактного давления. Но удельное электрическое сопротивление сплава будет увеличиваться по мере добавления тугоплавких металлов. Снизить электрическое сопротивление электрического контакта можно за счет увеличения контактного давления. Тот факт, что тугоплавкие металлы устойчивы к деформации под давлением, делает приемлемым это решение. Композиционные сплавы серебра с добавлением тугоплавких соединений подходят для электрических контактных пар, работающих при более высокой силе тока, поскольку они сочетают в себе низкое удельное электрическое сопротивление серебра с устойчивостью тугоплавких металлов к высоким тепловым нагрузкам и высокому контактному давлению. Предложенный в диссертационной работе метод электронно-ионно-плазменного напыления является перспективной технологией формирования на поверхности композиционных покрытий с широким спектром структурно-морфологических, физико-химических, адгезионных и электротехнических свойств. Задачи создания на контактах переключателей мощных электрических сетей новых экономичных, высокоэффективных покрытий,



обладающих уникальной структурой и повышенным набором свойств, являются научно значимыми и представляют практический интерес для развития электротехнической промышленности. В связи с этим, цель диссертационной работы: разработка физических основ и установление механизмов формирования структуры и свойств электроэрозионностойких покрытий при комплексной электронно-ионно-плазменной обработке мощных электрических контактов системами Ni-Ag-N, Ni-C-Ag-N, WC-Ag-N и $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3\text{-Ag-N}$ является безусловно актуальной.

Анализ содержания диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 143 страницах, содержит 10 таблиц, 55 рисунков. Список литературы составляет 142 наименования.

Во *введении* обоснована актуальность темы исследований и степень ее разработанности; сформулированы цели и задачи диссертации; представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту; обоснована достоверность результатов и выводов; отмечен личный вклад соискателя и приведены данные по апробации работы.

В *первом разделе* приведен обстоятельный обзор литературы по материалам дугостойких электрических контактов, применяемым в современной электротехнике, и способам придания им уникальных эксплуатационных свойств. Приведено подробное описание методов формирования композиционных электроэрозионностойких покрытий на поверхности электрических контактов, а также методов получения объемных электрических контактов. Описаны физические принципы методов электровзрывного напыления и электронно-пучковой обработки для формирования покрытий на поверхности металлов и сплавов. Рассмотрены представления о влиянии материала подложки, состава взрывааемых проводников и параметров процессов на структуру и свойства формируемых покрытий.

Второй раздел включает в себя характеристику материалов и объектов исследования, режимов электровзрывного напыления, электронно-пучковой обработки и азотирования для получения покрытий систем Ni-Ag-N, Ni-C-Ag-N, WC-Ag-N и $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3\text{-Ag-N}$, а также методов экспериментального исследования.

В *третьем разделе* представлены результаты структурных исследований методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии покрытий систем Ni-Ag-N и Ni-C-Ag-N,

используемых для работы контактов электромагнитных пускателей и реле среднего и тяжелого режима работы. Исследованы дугостойкость, износостойкость, коэффициент трения, модуль Юнга, нано- и микротвердость покрытий этих систем. Проанализированы основные закономерности формирования структуры покрытий в нано- и микрокристаллическом состоянии.

В *четвертом разделе* описаны результаты исследования структурно-фазовых состояний, элементного состава и физических свойств покрытий систем WC–Ag–N и SnO₂–In₂O₃–Ag–N, используемых в качестве электроэрозионностойких покрытий для сильно нагруженных электромагнитных пускателей и контакторов постоянного и переменного тока.

В *пятом разделе* описаны примеры конкретного использования электрических контактов, упрочненных покрытиями, полученными при выполнении исследований. Электрические контакты с электровзрывными покрытиями внедрены в производственную деятельность четырех предприятий. Их применение позволило добиться экономического эффекта. Также результаты исследований используются в учебной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.

В *выводах* приведены основные результаты, полученные в работе, которые отражают поставленную цель.

В *приложении* размещены копии справок об использовании результатов диссертации.

Основное содержание диссертационной работы отражено в 21 работе, в числе которых 6 статей в журналах из перечня ВАК РФ, 1 статья в журнале, индексируемом в базах данных Web of Science и Scopus (издание относится к Q1), 3 патента РФ на изобретение и 2 патента РФ на полезную модель. Результаты работы неоднократно докладывались и опубликованы в материалах международных и всероссийских конференций, обладают патентной чистотой.

Новизна исследований и полученных результатов

Успешное выполнение поставленной в работе цели позволило диссертанту получить ряд новых и оригинальных результатов.

Впервые разработан метод электронно-ионно-плазменного напыления электроэрозионностойких композиционных покрытий на основе систем Ni–Ag–N, Ni–C–Ag–N, WC–Ag–N и SnO₂–In₂O₃–Ag–N на медные электрические контактные поверхности. Определены оптимальные параметры этого метода на каждой стадии: электровзрывное напыление – электронно-пучковая обработка – азотирование.

Впервые установлены физические закономерности формирования покрытий различных систем, проведены комплексные экспериментальные исследования влияния электронно-ионно-плазменного напыления на формирование и эволюцию структуры, фазового состава и дефектной субструктуры электровзрывных покрытий на основе серебра и используемых в работе упрочняющих фаз. При этом отмечено значительное повышение механических и электрофизических свойств.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов

В работе автор исходит из комплексности рассмотрения проблемы повышения электроэрозионной стойкости контактов переключателей мощных электрических сетей современным методом электронно-ионно-плазменного напыления для последующего применения в качестве электрических контактов различной номенклатуры. Научные положения работы достаточно обоснованы, опираются на известные проверяемые факты и согласуются с опубликованными экспериментальными данными и научными представлениями о формировании покрытий методами, использующими концентрированные потоки энергии. Полученные в работе результаты не противоречат данным других авторов, физически обоснованы и интерпретированы, что обеспечивает достоверность основных выводов и положений, выносимых на защиту

Достоверность экспериментальных данных, и рекомендаций, представленных в диссертации, обеспечивается применением современных методов исследования: сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, механических испытаний на износостойкость и определение коэффициента трения, нанотвердость, электроэрозионную стойкость в условиях дуговой эрозии и оборудования для анализа структуры и свойств модифицированных слоев материалов; применением аппарата математической статистики для обработки полученных результатов.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций

Научная значимость заключается в получении фундаментальных знаний о закономерностях формирования композиционных электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и химических соединений, содержащих Ni, C, W, Sn, In, O₂ и N₂ в условиях сложного многофакторного процесса электровзрывного напыления, последующей электронно-пучковой обработки и азотирования. Совокупность экспериментальных данных позволяет расширить представления об особенностях формирования структурно-

фазового и элементного составов покрытий в процессе электронно-ионно-плазменного напыления, а также свойств этих покрытий.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные в работе электроэрозионностойкие покрытия используются в реальном секторе экономики, – электротехнической промышленности. Такие покрытия могут быть использованы для упрочнения медных электрических контактов различной номенклатуры. Практическая значимость результатов диссертационного исследования подтверждается прилагаемыми справками о практическом применении полученных результатов.

Научные и практические результаты работы могут быть применены в других научно-исследовательских институтах, высших учебных заведениях, на промышленных предприятиях.

Диссертационная работа написана технически грамотным языком, в хорошем стиле и логически построена. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Содержание работы соответствует паспорту специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния п.п. 6,7.

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

1. Обзор литературы перегружен ссылками на источники, не имеющие прямого отношения к теме диссертации, а таким важным подходам, как моделирование сложных процессов, сопровождающих электровзрывное напыление и электронно-пучковую обработку, уделено недостаточное внимание.
2. В главе 2, посвященной методам исследования, не обоснован выбор режимов электровзрывного напыления, электронно-пучковой обработки и азотирования.
3. Автором получен большой объем экспериментальных исследований по формированию электровзрывных электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и упрочняющих фаз. Однако нет сравнения этих результатов с результатами по использованию других методов формирования аналогичных покрытий на медных поверхностях.
4. Каков вклад формирующихся в результате электронно-ионно-плазменного напыления упрочняющих фаз в повышение электроэрозионной стойкости электрических контактов?
5. Целью работы предусмотрено установление механизмов формирования структуры и свойств покрытий. Однако в выводах работы это положение не нашло отражения.

Высказанные замечания не изменяют общей положительной оценки работы и не ставят под сомнение выводы.

Заключение

По научному уровню решаемых задач, объему и актуальности выполненных исследований, обоснованности вынесенных на защиту положений, достоверности и научной новизне полученных результатов, их значимости для науки и производства диссертация «Формирование структуры и свойств электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и упрочняющих фаз методом электронно-ионно-плазменного напыления», соответствует п. 9 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» утвержденному постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (в редакции от 11.09.2021), является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований решена научная задача, имеющая важное значение для электротехнической промышленности, заключающаяся в выявлении 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 $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3\text{-Ag-N}$, а ее автор Почетуха Василий Витальевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук (научная специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния), профессор, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р.Державина».

На обработку персональных данных согласен.



Федоров Виктор Александрович

392000, Тамбов, ул. Интернациональная 33, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р.Державина», Тел.8(4752)72-34-34 доб.20-18.

E-mail: fedorov-tsu.tmb@inbox.ru

20.05.2022 г.

