

На правах рукописи

**ХОРЬЯКОВА НАТАЛЬЯ МИХАЙЛОВНА**

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО СПОСОБА  
ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ МЕДИ  
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ**

Специальность 05.16.09 Материаловедение (машиностроение)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Брянск – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» в научно-образовательном центре «Порошковая металлургия и функциональные покрытия»

**Научный руководитель:** **Агеев Евгений Викторович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Серебровский Владимир Исаевич**,  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова», заведующий кафедрой «Электротехника и электроэнергетика», г. Курск

**Булычев Всеволод Валериевич**,  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана», заведующий кафедрой «Колесные машины и прикладная механика», г. Калуга

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва

Защита состоится «20» декабря 2018 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д999.112.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук», Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет», по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10 б, ауд. Б 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и на сайте: <http://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/khoryakova-natalya-mikhaylovna>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Хандожко Виктор Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Порошковая медь нашла широкое применение в различных областях машиностроения для производства электроконтактных и антифрикционных изделий. Технологический процесс изготовления спеченных изделий начинается с порошковой меди, от метода получения которой зависят величина и форма частиц, насыпная плотность, химический состав, прессуемость, спекаемость.

Для получения порошковой меди широкое распространение получил электролитический метод, обеспечивающий хорошую чистоту, прессуемость, спекаемость и стабильность свойств. Существенным недостатком получения порошковой меди способом электролиза является его дороговизна, обусловленная высокой энергоемкостью процесса, использованием сложного громоздкого дорогостоящего оборудования, также электродов, для изготовления которых использую рафинированную электролитическую медь марки МО или М1. В связи с этим, одной из актуальных задач является снижение стоимости порошковых материалов и улучшение их качества за счет применения прогрессивных технологических процессов, таких как способ электроэрозионного диспергирования (ЭЭД).

ЭЭД – энергоэффективный процесс, позволяющий получить порошковую медь из отходов, без использования химических реагентов и загрязнения рабочей жидкости и окружающей среды химическими веществами, что значительно снижает стоимость готовых изделий. Кроме того, ЭЭД позволяет получить порошковую медь с содержанием наночастиц, разработка методов получения которых, является одной из важнейших задач современной промышленности. Например, в гальванических покрытиях наночастицы в электролите присутствуют в виде суспензии и попадают в покрытия в основном по механизму конвективной диффузии с образованием дисперсно-упрочненного покрытия.

Физические основы явления электроэрозии подробно исследованы и описаны в литературе. Широко признана тепловая теория, основанная на разрушении металла за счет тепловых процессов в зоне искрового разряда. При этом, в литературе свойства образующихся в процессе электроэрозионного диспергирования частиц металла недостаточно освещены, что не позволяет прогнозировать их гранулометрический, химический, фазовый составы и состояние поверхности.

В связи с этим работа, посвященная разработке ресурсосберегающего способа получения пригодной к промышленному применению порошковой меди электроэрозионным диспергированием, а также изучению ее химического и фазового состава, структуры и свойств, возможных областей практического применения, является актуальной.

**Степень ее разработанности.** Выбором рациональных методов получения порошковых материалов занимаются ведущие специалисты, такие как: Андриевский Р.А., Анциферов В.Н., Антонов М.А., Байрамов Р.К., Бальшин М.Ю., Буланов В.Я., Вязников Н.Ф., Грацианов Ю.А., Джонс В.Д., Дорофеев

В.Ю., Кипарисов С.С., Кохан Л.С., Левина В.В., Либенсон Г.А., Логинов Ю.Н., Мажарова Г.Е., Набойченко С.С., Ничипоренко О.С., Номберг Н.И., Федорченко И.М., Раковский В.С., Рожкова Т.В. и другие.

Как показывает практика, большинство способов получения порошковой меди обладают существенными недостатками, такими как, энергоёмкость, экологические проблемы (сточные воды, вредные выбросы), высокая стоимость технологического оборудования и сырья, и, как следствие, получаемой порошковой меди.

Изложенное выше подтверждает, что тема диссертационного исследования является актуальной, имеет важное народно-хозяйственное значение и направлена на решение научно-практической задачи получения порошковой меди с низкой себестоимостью, невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса.

**Цель работы.** Разработка ресурсосберегающего способа получения электроэрозионной порошковой меди, пригодной к промышленному применению.

В соответствии с поставленной целью решали следующие **задачи**:

1. Определение оптимальных технологических режимов получения пригодной к практическому применению порошковой меди электроэрозионным диспергированием медных отходов.

2. Исследование химического и фазового состава, структуры и свойств порошковой меди, полученной электроэрозионным диспергированием медных отходов в различных средах (вода, керосин): гранулометрического состава, среднего размера частиц, удельной поверхности частиц, морфологии и элементного состава, фазового состава, насыпной плотности, текучести, прессуемости.

3. Исследование влияния свойств рабочей жидкости на свойства порошковой меди, полученной электроэрозионным диспергированием медных отходов.

4. Исследование свойств спеченных образцов, полученных из электроэрозионной порошковой меди: плотности, твердости, микроструктуры, элементного состава, электропроводности.

5. Исследование свойств гальванических покрытий, полученных с добавлением наночастиц электроэрозионной меди.

**Научная новизна работы:**

1. Применительно к процессу электроэрозионного диспергирования электротехнической меди марки М1 установлены оптимальные значения энергетических параметров диспергирования, позволяющие управлять производительностью процесса и средним размером частиц порошкового материала.

Отмечено, что оптимальными параметрами процесса электроэрозионного диспергирования отходов меди в дистиллированной воде являются следующие: емкость разрядных конденсаторов – 45,5 мкФ, напряжение на электродах – 220 В, частота следования импульсов – 44...100 Гц.

2. Установлены зависимости между свойствами рабочей жидкости и свойствами медного электроэрозионного порошкового материала, позволяющие управлять составом, структурой и свойствами последнего.

Отмечено, что в кислородсодержащей жидкости (дистиллированной воде) и углеродсодержащей жидкости (керосине осветительном) имеют место различия, а именно:

- по среднему размеру частиц: 24 мкм (вода) и 34 мкм (керосин);
- по удельной поверхности: 0,2 м<sup>2</sup>/г (вода) и 0,08 м<sup>2</sup>/г (керосин);
- по морфологии: электроэрозионная медь, полученная в воде, состоит из частиц правильной сферической формы; электроэрозионная медь, полученная в керосине, состоит из частиц неправильной формы;
- по элементному составу: электроэрозионная медь, полученная в воде, состоит из 99,92 % меди и 0,08 % примесей; электроэрозионная медь, полученная в керосине, состоит из 79,45 % меди, 17,7 % углерода, 2,85 % кислорода;
- по прессуемости: электроэрозионная медь, полученная в воде, прессуется в пресс-формах и изостатически; электроэрозионная медь, полученная в керосине не прессуется.

3. Установлены взаимосвязи между составом, структурой и свойствами электроэрозионной порошковой меди и спеченных изделий, полученных на ее основе, позволяющие добиться необходимого качества последних.

Отмечено, что порошковая медь, полученная методом электроэрозионного диспергирования в углеродсодержащей жидкости (керосине осветительном), не подвергается спеканию. Свойства спеченных при 900 °С образцов порошковой меди, полученной диспергированием в кислородсодержащей жидкости (вода) следующие: твердость 52,1 НV, плотность 8,25 г/см<sup>3</sup>. Свойства спеченных при 1000 °С образцов порошковой меди, полученной диспергированием в кислородсодержащей жидкости (вода) следующие: твердость 56,1 НV, плотность 8,51 г/см<sup>3</sup>. Элементный состав спеченных образцов порошковой меди, полученной в воде, совпадает с элементным составом порошковой меди, из которой он был получен.

4. Установлены взаимосвязи между концентрацией наночастиц электроэрозионной порошковой меди и свойствами медных гальванических покрытий, позволяющие управлять свойствами покрытий.

Отмечено, что твердость покрытия с наночастицами электроэрозионной меди возрастает с увеличением концентрации наночастиц в электролите. При увеличении концентрации наночастиц электроэрозионной меди с 0,03 до 0,05 г / 100 мл электролита среднее значение твердости медного покрытия с наночастицами электроэрозионной меди увеличивается с 290 НV до 316 НV, что выше значений твердости образца со стандартным медным покрытием на 8,3 % и 15,8 % соответственно.

**Диссертационная работа по тематике, содержанию и результатам соответствует п. 4 «Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, эксплуатационными и технологически-**

ми свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой», п. 5 «Установление закономерностей и критериев оценки разрушения материалов от действия механических нагрузок и внешней среды» и п. 10 «Разработка покрытий различного назначения (упрочняющих, износостойких и других) и методов управления их качеством» паспорта научной специальности 05.16.09 «Материаловедение (машиностроение)».

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в исследовании, разработке и апробации технологий получения порошковой меди в дистиллированной воде и керосине с низкой себестоимостью, невысокими энергетическими затратами путем применения экологически чистой технологии электроэрозионного диспергирования и технологий их применения:

- разработан и запатентован способ получения пригодной к промышленному применению порошковой меди электроэрозионным диспергированием медных отходов (патент на изобретение РФ № 2599476);

- разработан и запатентован способ пригодного к промышленному применению медного нанопорошка электроэрозионным диспергированием отходов (патент на изобретение РФ № 2597445);

- разработан и запатентован способ получения медных гальванических покрытий, модифицированных наночастицами электроэрозионной меди (патент на изобретение РФ № 2612119).

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач использовались современные методы испытаний и исследований, в том числе: гранулированный состав определяли на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec» и атомно-силовом микроскопе «SmartSPM»; определение формы и морфологии, рентгеноспектральный микроанализ, исследование элементного состава проводили с помощью электронно-ионного сканирующего растрового микроскопа QUANTA 600 FEG и энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX; определение фазового состава проводили на аналитическом рентгеновском дифрактометре ARL9900 Intellipower Workstation; насыпную плотность определяли по ГОСТ 19440-94; текучесть определяли по ГОСТ 20899-98; изостатическое прессование проводили на прессе «EPSI»; спекание – в высокотемпературной печи «Nabertherm»; механическую обработку спеченных образцов проводили с помощью автоматического высокоточного настольного отрезного станка «Accutom-5» и шлифовально-полировального станка «LaboPol-5»; гальванические медные покрытия получали на гальванической установке L1-210 AS v2; шероховатость поверхности покрытий определяли с помощью автоматизированного контактного профилометра SURTRONIC 25; металлографические исследования проводили с помощью электронно-ионного сканирующего микроскопа QUANTA 200 3D, растрового электронного микроскопа QUANTA 600 FEG, инвертированного оптического микроскопа OLYMPUS GX51; плотность спеченных образцов определяли с помощью инвертированного оптического микроскопа OLYMPUS GX51; твердость определяли с помощью микротвердомера «AFFRI DM-8»; электропроводность определяли на цифровом микроомметре

DLRO10X; коэффициент трения и скорость износа измеряли на автоматизированной машине трения Tribometer CSM Instruments др.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Теоретические и технологические решения, позволяющие получать пригодную к промышленному применению порошковую медь электроэрозионным диспергированием медных отходов.

2. Совокупность результатов экспериментальных исследований свойств порошковой меди, полученной методом электроэрозионного диспергирования медных отходов.

3. Совокупность результатов экспериментальных исследований свойств спеченных образцов, полученных из электроэрозионной порошковой меди.

4. Совокупность результатов экспериментальных исследований свойств гальванических покрытий, полученных с добавлением наночастиц электроэрозионной порошковой меди.

**Степень достоверности полученных результатов.** Обоснованность и достоверность выносимых на защиту научных положений и выводов обеспечиваются принятой методологией исследования, включающей в себя современные научные методы, апробацией при обсуждении результатов диссертации на международных научно-технических конференциях. Это позволило обеспечить репрезентативность, доказательность и обоснованность разработанных положений и полученных результатов. Достоверность теоретических положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами при внедрении в практическую деятельность, отмеченных в подразделе «Реализация результатов работы».

**Реализация результатов работы.** Разработанные технологии апробированы и внедрены в ООО «КВАЛИМЕТ» г. Курск, ООО «Росутилизация46» г. Курск. Результаты исследований используются в учебном процессе при чтении лекций, выполнении лабораторных работ, курсовых и выпускных квалификационных работ со студентами и аспирантами в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» г. Курск.

**Апробация и реализация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: III Международной научно-практической конференции «Современный материалы, техника и технология» (Курск, 2013, 2016 г.); III Международных научно-практической конференции «Перспективное развитие науки, техники и технологии» (Курск, 2013-2016 г.); Международном молодежном научном форуме «Ломоносов-2014» (Москва, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Физика, электроника и электротехника» (Сумы, 2014 г.); XI Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов (Курск, 2014); XXXVI Международной научно-технической конференции «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2014 г.); XVI Международной научно-практической конференции «Химия и химическая технология в XXI веке» (Томск, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Альтернативны источники энергии в транспортно-

технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования» (Воронеж, 2015-2016 г.) и др. (более 20 научных конференций).

**Личный вклад автора** заключается в постановке и решении важной научно-производственной задачи, на основе разработанных концепции исследования, идей и целей диссертационной работы. Автором лично выполнен весь объем экспериментальных исследований, проведены необходимые расчеты, обработка результатов и их анализ, выбран комплекс методик для аттестации электроэрозионной порошковой меди и полученных спеченных образцов и гальванических покрытий. Автор принимал непосредственное участие в разработанной методике проведения эксперимента.

**Публикации.** Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 55 работах, в том числе: 2 монографиях, 5 публикациях в журналах, входящих в международную базу SCOPUS, 14 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 231 страницу, в том числе, 62 таблицы, 96 рисунков, 6 страниц приложений. Список литературы включает в себя 146 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Обзор источников информации о способах получения и областях практического применения порошковой меди» обоснована возможность применения метода электроэрозионного диспергирования для получения порошковой меди, пригодной для изготовления изделий электротехнического и антифрикционного назначения. Описаны возможные области применения спеченных изделий из порошковой меди, технологические операции, применяемые для изготовления спеченных изделий. Описана возможная область применения наночастиц электроэрозионной меди – гальванические покрытия и варианты улучшения их свойств. Перечислены основные способы получения порошковой меди, а также особенности получения метода ЭЭД, проведен анализ существующего оборудования для осуществления процесса ЭЭД, обоснован выбор рабочих жидкостей. Отмечено, что метод ЭЭД отличается относительно невысокими энергетическими затратами, безвредностью и экологической чистотой процесса, отсутствием механического износа оборудования, возможностью получения порошковой меди непосредственно из кусков меди различной формы за одну операцию, получением частиц преимущественно сферической формы размером от нескольких нанометров до сотен микрон. Показано, что к настоящему времени уровень разработки метода ЭЭД достиг опытно-промышленного производства.

**Во второй главе** «Материалы и методики исследования» описаны используемые материалы и методики исследований. Процесс получения электроэрозионной порошковой меди осуществляется на экспериментальной установке для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов (патент на изобретение РФ № 2449859).

Для получения порошковой меди методом электроэрозионного диспергирования в качестве исходного (диспергируемого) материала использовали отходы электротехнической медной проволоки (ГОСТ 859-2001). В качестве рабочих жидкостей – дистиллированная вода и керосин. Процесс проводили при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 0,5 ... 55,5 мкФ, напряжение 0...250 В, частота следования импульсов 28...150 Гц. Для достижения равномерных электрических разрядов использовалась установка для встряхивания электродов, предотвращающая сплавление электродов с диспергируемым материалом.

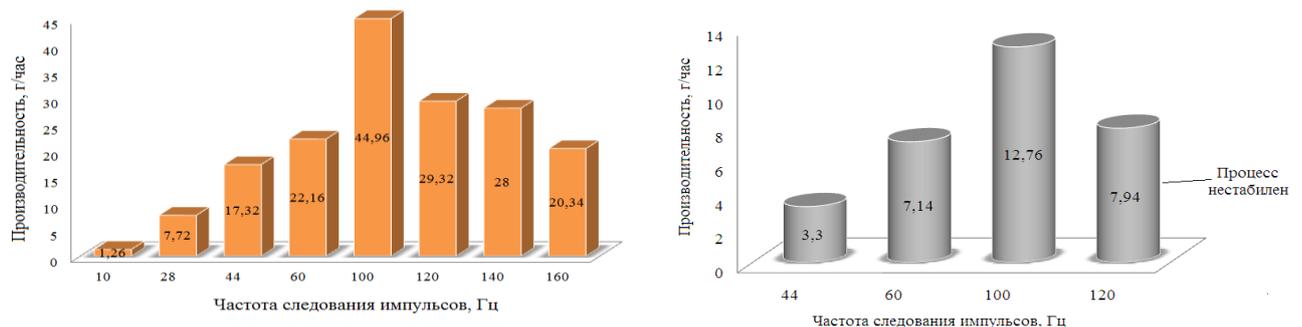
При решении поставленных задач использовали современные методы испытаний и исследований, в том числе: гранулометрический состав электроэрозионной порошковой меди определяли на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec» и атомно-силовом микроскопе «SmartSPM» фирмы «AIST-NT»; определение формы и морфологии поверхности частиц, рентгеноспектральный микроанализ, исследование элементного состава электроэрозионной порошковой меди проводили с помощью электронно-ионного сканирующего растрового микроскопа «QUANTA 600 FEG» и энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы «EDAX»; рентгеноструктурный (фазовый) анализ порошковой электроэрозионной обработки порошковой меди проведен на аналитическом рентгеновском дифрактометре ARL9900 Intellipower Workstation; насыпную плотность электроэрозионной порошковой меди определяли по ГОСТ 19440-94; текучесть электроэрозионной порошковой меди определяли по ГОСТ 20899-98; изостатическое прессование электроэрозионной порошковой меди проводили на прессе «EPSI» при давлении 300 МПа, а спекание – в высокотемпературной печи «Nabertherm» в вакууме при температуре 900 °С и 1000 °С; гальванические медные покрытия получали на гальванической установке модель L1-210 AS v2; шероховатость поверхности покрытий определяли с помощью автоматизированного прецизионного контактного профилометра SURTRONIC 25; механическую обработку спеченных образцов и гальванических покрытий проводили с помощью автоматического высокоточного настольного отрезного станка «Accutom-5» и шлифовально-полировального станка «LaboPol-5»; морфологию и микроструктуру спеченных образцов и гальванических покрытий определяли с помощью электронно-ионного сканирующего микроскопа QUANTA 200 3D, растрового электронного микроскопа QUANTA 600 FEG, инвертированного оптического микроскопа OLYMPUS GX51; плотность спеченных образцов определяли с помощью инвертированного оптического микроскопа OLYMPUS GX51; твердость спеченных образцов и гальванических покрытий определяли с помощью микротвердомера «AFFRI DM-8»; электропроводность определяли на цифровом микроомметре DLRO10X; коэффициент трения и скорость износа поверхности гальванических покрытий и контртела измеряли на автоматизированной машине трения Tribometer CSM Instruments и др.

В третьей главе «Результаты экспериментальных исследований свойств электроэрозионной порошковой меди» представлены результаты определения оптимальных технологических режимов получения и исследование свойств электроэрозионной порошковой меди. Для изучения тенденции изменения производительности (П) в зависимости от изменения электрических параметров установки, была проведена серия опытов, длительностью 1 час, с варьированием ёмкости разрядных конденсаторов, частоты следования импульсов и напряжения на электродах в дистиллированной воде и керосине.

На рис. 1 представлены графики зависимости производительности процесса электроэрозионного диспергирования меди, полученной в дистиллированной воде и керосине, от частоты следования импульсов.

На рис. 2 представлены графики зависимости производительности процесса электроэрозионного диспергирования меди, полученной в дистиллированной воде и керосине, от емкости разрядных конденсаторов.

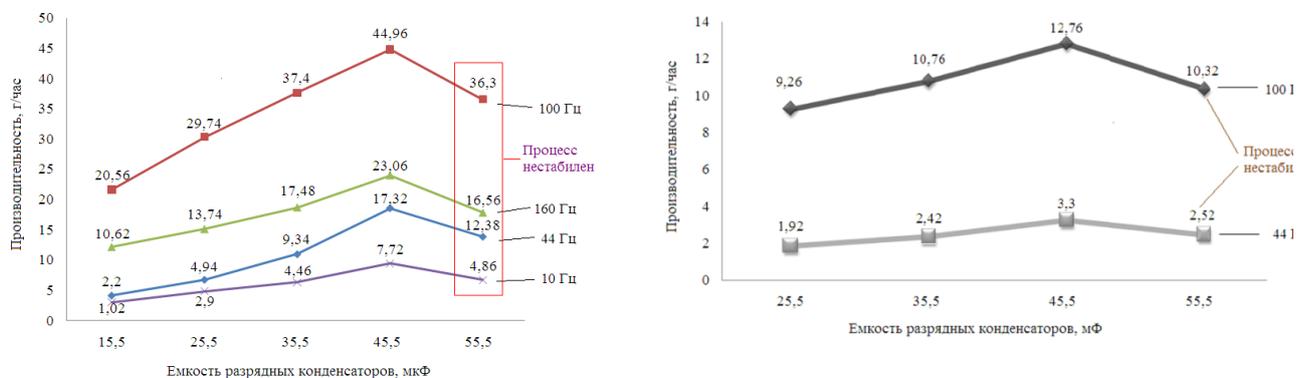
На рис. 3 представлены графики зависимости производительности процесса электроэрозионного диспергирования меди, полученной в дистиллированной воде и керосине, от напряжения на электродах.



а) дистиллированная вода

б) керосин

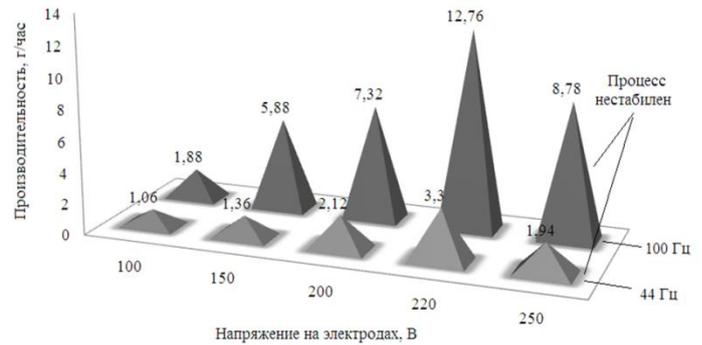
Рис. 1. Зависимость производительности процесса электроэрозионного диспергирования меди от частоты следования импульсов ( $U=220$  В,  $C=45,5$  мкФ)



а) дистиллированная вода

б) керосин

Рис. 2. Зависимость производительности процесса электроэрозионного диспергирования меди от емкости разрядных конденсаторов ( $U=220$  В)



а) дистиллированная вода

б) керосин

Рис. 3. Зависимость производительности процесса электроэрозионного диспергирования меди от напряжения на электродах ( $C=45,5$  мкФ)

В ходе проведенных экспериментальных исследований по оценке производительности процесса электроэрозионного диспергирования медных отходов в зависимости от изменения электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования, установлено:

- для процесса электроэрозионного диспергирования медных отходов в дистиллированной воде оптимальными электрическими параметрами установки является емкость разрядных конденсаторов 45,5 мФ, напряжение на электродах 220 В, частота следования импульсов 44... 100 Гц;

- для процесса электроэрозионного диспергирования медных отходов в керосине оптимальными электрическими параметрами установки является емкость разрядных конденсаторов 45,5 мФ, напряжение на электродах 220 В, частота следования импульсов 44 Гц;

- изменением емкости разрядных конденсаторов и напряжения питания установки ЭЭД можно регулировать массовую производительность процесса ЭЭД, а изменением рабочей частоты установки ЭЭД – количественную производительность процесса. Это подтверждает квадратичная зависимость массы получаемой порошковой меди от напряжения и линейная зависимость массы получаемой порошковой меди от емкости конденсаторов.

Для дальнейших физико-химических исследований были использованы образцы порошковой меди, полученные методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде и керосине при оптимальных электрических параметрах установки.

Результаты исследования формы и морфологии частиц электроэрозионной порошковой меди, полученные с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-103 QUANTA 600 FEG, представлены на рис. 4 (вода) и рис. 5 (керосин). Электроэрозионная порошковая медь, полученная в воде, состоит из частиц правильной сферической формы (или эллиптической). Электроэрозионная порошковая медь, полученная в керосине, состоит из частиц неправильной формы.

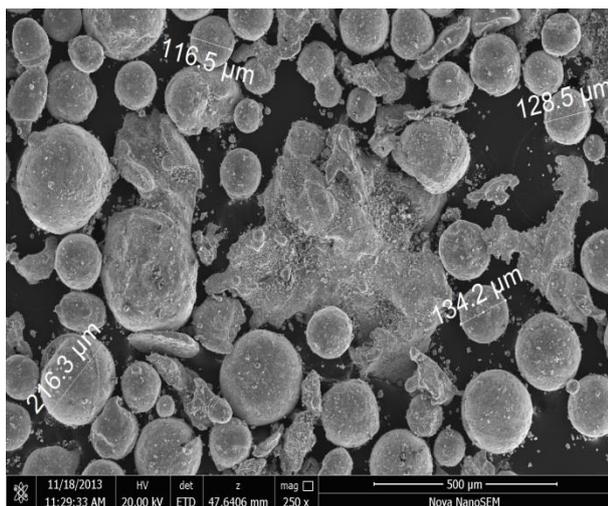


Рис. 4. Вид электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде

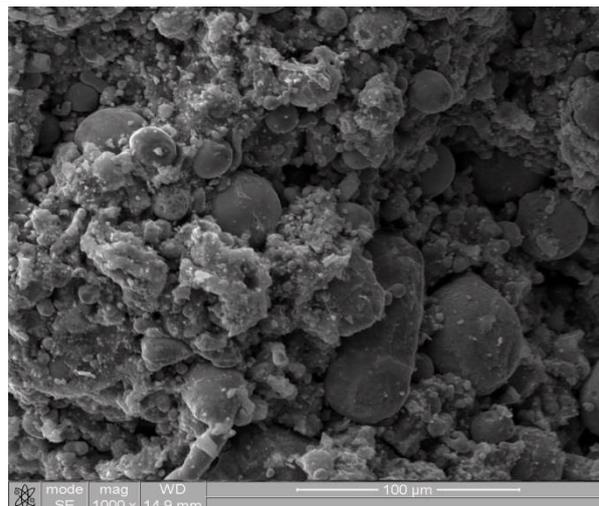


Рис. 5. Вид электроэрозионной порошковой меди, полученной в керосине

Результаты исследования гранулометрического состава электроэрозионной порошковой меди, полученные на лазерном анализаторе размеров частиц Analysette 22 NanoТес, представлены в табл. 1. Установлено, что средний размер частиц электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде составляет 24 мкм, удельная площадь поверхности – 0,2 м<sup>2</sup>/г. Установлено, что средний размер частиц электроэрозионной порошковой меди, полученной в керосине составляет 34 мкм, удельная площадь поверхности – 0,08 м<sup>2</sup>/г.

Таблица 1 – Распределение по размерам микрочастиц электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде и керосине

Параметр	Электроэрозионная порошковая медь, полученная в керосине	Электроэрозионная порошковая медь, полученная в воде
D10 (10% частиц), мкм	4,5	1,6
D50 (50% частиц), мкм	34,6	24,0
D90 (90% частиц), мкм	58,2	48,4
d[4,3] Объемный средний диаметр, мкм	33,6	23,7
d[3,2] Средний диаметр по площади поверхности, мкм	8,9	3,7
d[3,0] Средний диаметр по отношению к объёму, мкм	1,7	0,9
d[2,0] Средний диаметр по отношению к площади, мкм	0,8	0,4
d[1,0] Средний диаметр по отношению к длине, мкм	0,5	0,3

В результате рентгеноспектрального микроанализа электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, и ПМС-1, установлено, что основными

элементами в исследуемой электроэрозионной порошковой меди являются медь (99,84 %) и кислород (0,16 %), а единственным элементом в ПМС-1 являются медь (100,00 %). В результате проведенного рентгеноспектрального микроанализа электроэрозионной порошковой меди, полученной в керосине, установлено, что основными элементами являются медь (79,45 %), углерод (17,7 %) и кислород (2,85 %).

Исходя из элементного состава электроэрозионной порошковой меди, полученной в керосине, высокое содержание углерода и кислорода в ее составе не позволяет использовать ее для получения антифрикционных изделий. Поэтому, для дальнейших исследований целесообразно использовать медь, полученную электроэрозионным диспергированием в дистиллированной воде.

Для исследования фазового состава электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, был проведен рентгеноструктурный анализ на аналитическом рентгеновском дифрактометре ARL9900 Intellipower Workstation. В результате изучения концентраций элементного и минералогического состава образца, установлено, что основными фазами в электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, являются медь – 98,1 % и оксид меди (I) – 1,9 %.

Насыпную плотность электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, определяли по ГОСТ 19440-94. Насыпная плотность электроэрозионной порошковой меди – 4,1 г/см<sup>3</sup>, что выше, чем у ПМС-1. Более высокую насыпную плотность электроэрозионной меди обеспечивают мелкие сферические частицы, заполняющие пустоты между крупными.

Определение текучести электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, проводили по ГОСТ 20899-98. Экспериментально установить текучесть электроэрозионной меди не удалось, т.к. она не создает непрерывную струю при просыпании через воронку. Это можно объяснить факторами, влияющими на текучесть порошковых материалов, такими как трение и зацепление частиц друг о друга, затрудняющие их перемещение. Текучесть понижается при уменьшении размеров частиц, увеличении их удельной поверхности.

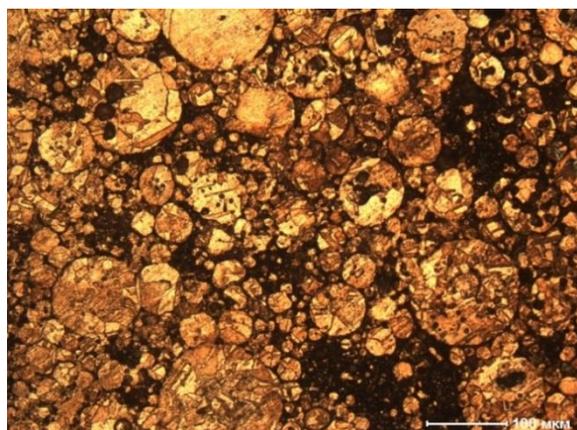
**В четвертой главе «Результаты исследования спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди»** представлены результаты экспериментальных исследований строения и свойств спеченных образцов размерами 10×10×50 мм, полученных холодным изостатическим прессованием и спеканием в вакууме при 900 °С и 1000 °С в течение 1 часа из электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, а также сравнение свойств спеченных образцов электроэрозионной меди и ПМС-1.

Рентгеноспектральный микроанализ спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди и ПМС-1, выполнен с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенный в РЭМ «QUANTA 200 3D». Установлено, что основными элементами в спеченном образце электроэрозионной меди, полученной в воде, являются медь (99,11 %), углерод (0,57 %) и кислород (0,32 %), в спеченном образце ПМС-1 – медь (99,30 %) и углерод (0,70 %).

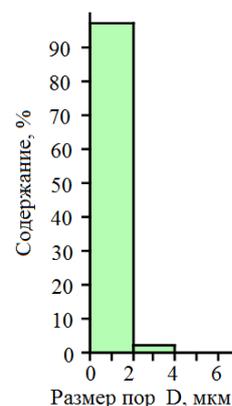
Результаты исследования пористости спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, определенной металлографическим методом с помощью инвертированного оптического микроскопа OLYMPUS GX51, приведены на рис. 6-7 и в табл. 2. Установлено, что пористость спеченного при 900 °С образца электроэрозионной порошковой меди равна 5,8 %, пористость спеченного при 1000 °С образца электроэрозионной порошковой меди равна 2,16 %, что соответствует третьей группе пористости для обоих образцов. Исходя из полученных гистограмм, установлено, что спеченный при 1000 °С образец имеет более узкое распределение пор по размеру и меньший размер пор, по сравнению с образцом, спеченным при 900 °С.

Таблица 2 – Пористость спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди

$T_{\text{спек}}, ^\circ\text{C}$	Площадь, $\text{мкм}^2$	Пористость, %	$D_{\text{min}}, \text{мкм}$	$D_{\text{max}}, \text{мкм}$	$D_{\text{med}}, \text{мкм}$
900	510075,6	5,8	0,1	6,0	2,1
1000	499722,4	2,16	0,2	4,3	0,6

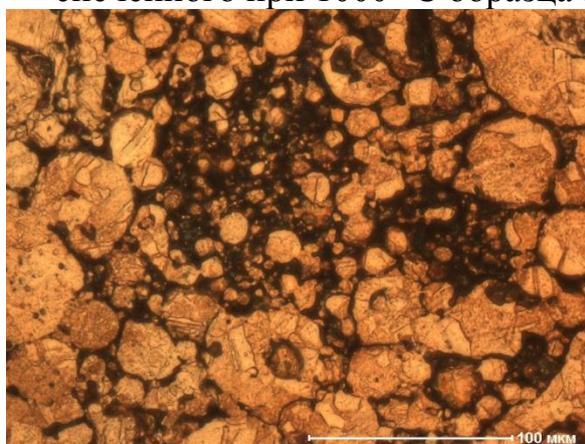


а) Микроструктура (x200)

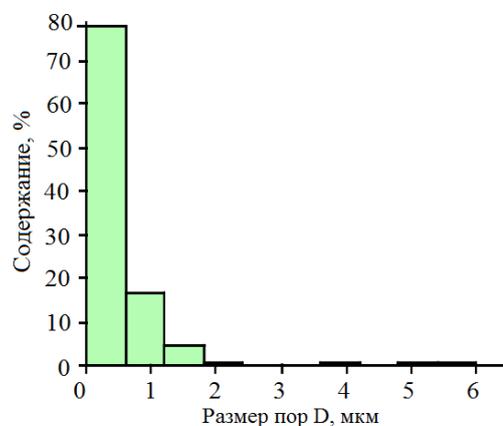


б) Гистограмма распределения пор по размеру (мкм)

Рис. 6. Микроструктура и гистограмма распределения пор по размеру спеченного при 1000 °С образца электроэрозионной порошковой меди



а) Микроструктура (x500)



б) Гистограмма распределения пор по размеру (мкм)

Рис. 7. Микроструктура и гистограмма распределения пор по размеру спеченного при 900 °С образца электроэрозионной порошковой меди

Результаты исследования микроструктуры спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, и ПМС-1, выполненные с помощью растрового электронного микроскопа «QUANTA 200 3D», представлены на рис. 8. Установлено, что спеченный образец электроэрозионной порошковой меди состоит из частиц меди, при этом, мелкие частицы заполняют пустоты между крупными, поэтому он является малопористым.

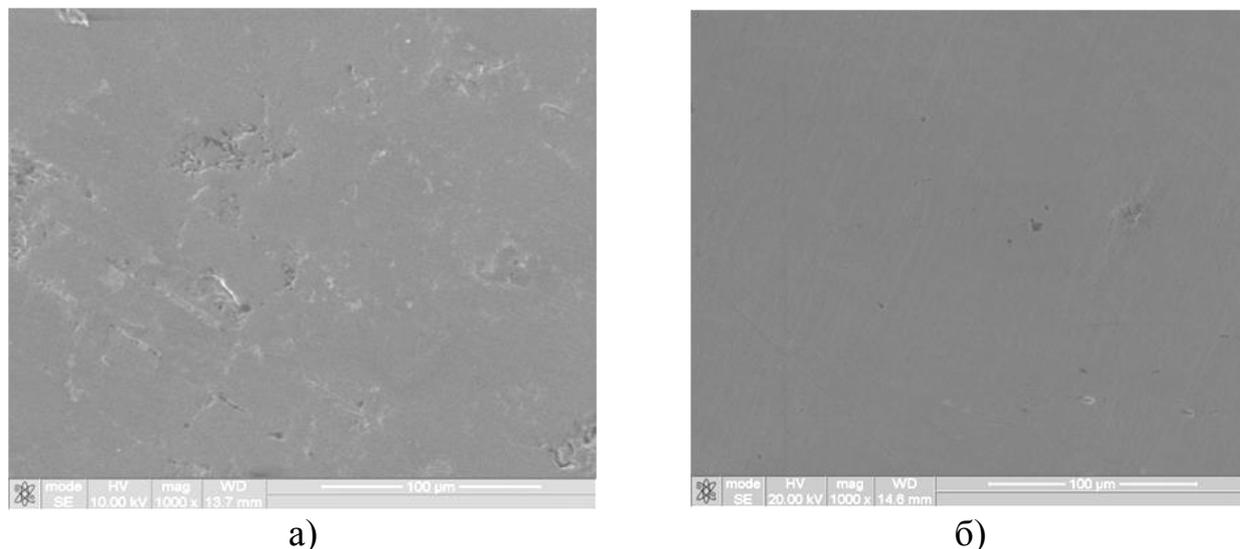


Рис.8. Микроструктура спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде (а), и ПМС-1 (б)

Измерения твердости образцов по поверхности и поперечному шлифу проводили с помощью автоматической системы анализа микротвердости DM-8. Установлено, что твердость спеченного при 900 °С образца электроэрозионной порошковой меди – 52,1 HV, твердость спеченного при 1000 °С образца электроэрозионной порошковой меди – 56,1 HV, т.е. увеличилась на 8 %. Установлено, что средняя твердость спеченных при 1000 °С образцов электроэрозионной порошковой меди – 56,1 HV, ПМС-1 – 51,1 HV, т.е. на 10 % выше. Таким образом, исследование твердости спеченных образцов подтверждает, что меньшая дисперсность электроэрозионной порошковой меди и наличие наночастиц в ее составе позволяет достигать большей твердости спеченных образцов при меньшей температуре спекания. Установлено, что имеет место повышение твердости спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди с увеличением температуры спекания от 900 °С до 1000 °С. С повышением температуры спекания плотность и прочность спеченных изделий возрастают, вследствие уменьшения пористости за счет взаимной диффузии элементов (залечивания).

Результаты исследования плотности полученных образцов представлены в табл.3. Установлено, что плотность спрессованных образцов электроэрозионной меди – 8,09 г/см<sup>3</sup>, ПМС-1 – 7,50 г/см<sup>3</sup>, т.е. на 8 % выше. Установлено, что плотность спеченных при 900 °С образцов электроэрозионной меди – 8,25 г/см<sup>3</sup>, ПМС-1 – 7,7 г/см<sup>3</sup>, т.е. на 7 % выше. Установлено, что плотность спеченных при 1000 °С образцов электроэрозионной меди – 8,51 г/см<sup>3</sup>, ПМС-1 – 7,88 г/см<sup>3</sup>,

т.е. на 8 % выше. Также выявили, что плотности спеченных образцов электроэрозионной меди меньше плотности литой меди, что, видимо, связано с остаточной пористостью порошковых материалов. Таким образом, исследование плотности изостатически спрессованных и спеченных образцов подтверждает, что меньшая дисперсность электроэрозионной порошковой меди и наличие наночастиц в ее составе позволяют достигать большей плотности при меньшей температуре спекания.

Таблица 3 – Плотность спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, и ПМС-1

Образец	Плотность, г/см <sup>3</sup> ( $\pm 0,05$ г/см <sup>3</sup> )	
	До спекания	После спекания
Электроэрозионная порошковая медь (900 °С)	8,09	8,25
Электроэрозионная порошковая медь, (1000 °С)		8,51
ПМС-1 (900 °С)	7,50	7,70
ПМС-1 (1000 °С)		7,88

Результаты исследования электропроводности  $r'$  спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди и ПМС-1, выполненные на цифровом микроомметре DLRO10X фирмы Megger, представлены в табл. 4. Установлено, что электропроводность образцов, полученных спеканием электроэрозионной меди сопоставима с электропроводностью спеченного образца ПМС-1.

Таблица 4 – Электропроводность спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, и ПМС-1

Образец	$\eta, \cdot 10^9$ Ом м ( $\pm 0,01$ Ом м)	$r', \cdot 10^7$ См/м ( $\pm 0,01$ Ом м)	$r, \%$ , от М1 ( $\pm 0,01$ Ом м)
Медь (М1)	17,80	5,62	100
Спеченный образец электроэрозионной порошковой меди (1000 °С)	18,76	5,33	94,8
ПМС-1 (1000 °С)	18,83	5,31	94,4
Спеченный образец электроэрозионной порошковой меди (900 °С)	18,94	5,28	93,9
ПМС-1 (900 °С)	18,90	5,29	94,1

В табл. 5 представлено сравнение свойств электроэрозионной меди и ПМС-1. Из сопоставления свойств порошковой меди, полученной методами электролиза и ЭЭД, следует, что электроэрозионная медь имеет меньшую пористость, но большую насыпную плотность, твердость прессовок и спеченных образцов. При этом, электроэрозионная медь получена из отходов без использования химических веществ с низким расходом электроэнергии, что делает данный способ конкурентоспособным.

Таблица 5 – Сравнение свойств и расхода энергии электроэрозионной меди и ПМС-1

Параметр	Электроэрозионная медь	ПМС-1
Размер частиц	от 10 нм до 100 мкм	до 100 мкм
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	0,2	0,1-0,17
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,25-2,0	4,1
Пористость при 1000 °С, %	2,16	11,3
Плотность прессовок, г/см <sup>3</sup>	8,1	7,5
Плотность спеченных образцов, г/см <sup>3</sup>	8,25-8,51	7,7-7,88
Твердость спеченных образцов по Виккерсу, HV	52,1-56,1	51,1
Электрическая проводимость, %, от М1	94-95	94
Расход электроэнергии, кг/кВт·час	1...3	230÷300

**В пятой главе** «Результаты исследования гальванических покрытий, модифицированных наночастицами электроэрозионной меди» представлены экспериментальные исследования свойств гальванических медных покрытий с добавкой наночастиц электроэрозионной порошковой меди.

Для электроосаждения меди использовали гальваническую установку (L1-210 v2, Италия). В качестве подложки использовали сталь 30ХГСА. Использовались составы и электролиты фирмы «24 КАРАТА» (Москва, Россия). Для подготовки стальной поверхности использовали состав электрохимического обезжиривания и раствор для электрохимической активации металлов. В качестве электролита использовали электролит гальванического блестящего меднения. На сталь медное покрытие наносили после никелевого, полученного с помощью электролита подслоного никелирования. Для модификации покрытий в качестве добавки к электролиту блестящего меднения использовали наночастицы электроэрозионной меди. При одинаковых количествах электролитов и режимах установки были получены стандартное покрытие, и покрытие, с добавкой наночастиц электроэрозионной меди.

Шероховатость поверхности определяли с помощью профилометра SURTRONIC 25. Установлено, что высота неровностей профиля по 10 точкам и среднее арифметическое отклонение профиля медного покрытия с добавкой наночастиц электроэрозионной меди незначительно выше, чем у стандартного медного покрытия. Средние арифметические отклонения профилей обеих покрытий соответствуют 8 классу шероховатости деталей. Высота неровностей профиля по 10 точкам обеих покрытий соответствуют 7 классу шероховатости деталей. Таким образом, существенного изменения шероховатости поверхности покрытия не обнаружено.

Результаты исследования микроструктуры покрытий, полученные с помощью электронного микроскопа «QUANTA 200 3D», приведены на рис. 9-10. Оба медных гальванических покрытия состоят из слоя меди, отделенного от стального основания резкой границей. Стандартное медное покрытие пористое,

а медное покрытие, полученное с добавкой наночастиц электроэрозионной меди, имеет более плотную структуру и практически не имеет пор.

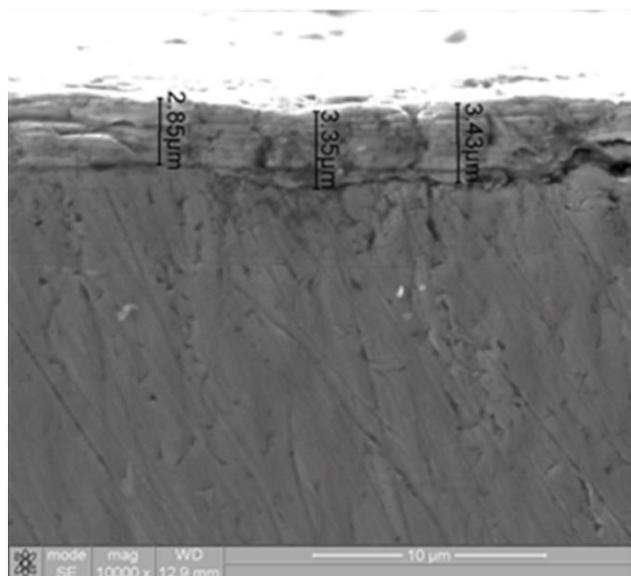


Рис.9. Микроструктура стандартного медного покрытия

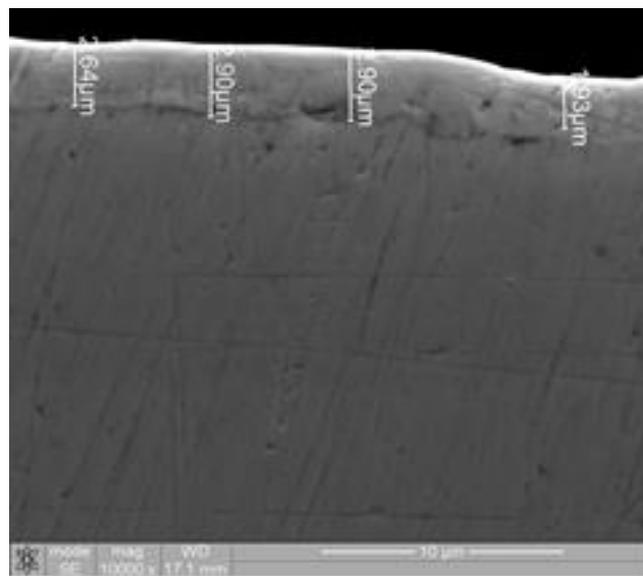


Рис.10. Микроструктура покрытия с добавкой наночастиц электроэрозионной меди

Результаты испытания твердости по поверхности гальванических покрытий, полученные с помощью автоматической системы анализа микротвердости AFFRI DM-8, приведены в табл. 6. Установлено, что твердость медных покрытий с наночастицами электроэрозионной меди возрастает с увеличением концентрации наночастиц электроэрозионной меди в электролите. При увеличении концентрации наночастиц электроэрозионной меди с 0,03 до 0,05 г / 100 мл электролита среднее значение твердости образца с медным покрытием и наночастицами электроэрозионной меди увеличивается с 290 HV до 316 HV, что выше значений твердости образца со стандартным медным покрытием на 8,3 % и 15,8 % соответственно, что вызвано присутствием в электролите наддисперсной фазы электроэрозионной меди, вызывающей совместный перенос на катод частиц и ионов с образованием дисперсно-упрочненного покрытия.

Таблица 6 – Среднее значение твердости медных гальванических покрытий

Концентрация наночастиц электроэрозионной меди, г/100 мл. электролита	Среднее значение твердости по Виккерсу, HV( $\pm 1,5$ HV)	
	Стандартное медное покрытие	Медное покрытие с добавкой наночастиц электроэрозионной меди
0,03	266,0	290,0
0,04		301,0
0,05		316,0

Коэффициент трения и скорость износа поверхности образца и контртела измеряли на автоматизированной машине трения Tribometer. Значения коэффи-

циента трения  $\mu$  и фактора износа, полученные при испытаниях, приведены в табл. 7. Установлено, что имеет место 10 процентное увеличение износостойкости покрытия с добавкой наночастиц электроэрозионной меди, связанное с введением высокотвердых наночастиц электроэрозионной меди и большей твердостью самого покрытия.

В табл. 8 представлено сравнение свойств медных гальванических покрытий (стандартного и модифицированного наночастицами электроэрозионной меди).

Таблица 7 – Трибологические характеристики исследуемых покрытий

Медное покрытие	Средний коэффициент трения ( $\mu$ ) ( $\pm 0,03$ )	Фактор износа статистического партнера, ( $\pm 0,01$ ) $\text{мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot 10^{-6}$	Фактор износа образца, ( $\pm 0,01$ ) $\text{мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot 10^{-6}$
Стандартное	0,94	7,28	254,20
С наночастицами	0,97	5,46	231,40

Таблица 8 – Сравнение свойств медных гальванических покрытий

Параметр	Стандартное медное покрытие	Медное покрытие с наночастицами электроэрозионной меди
Микроструктура	Пористое	Малопористое
Твердость по Виккерсу, ( $\pm 1,5 \text{ HV}$ )	266,0	290,0-316,0
Средний коэффициент трения ( $\mu$ ) ( $\pm 0,03$ )	0,94	0,97
Скорость износа образца, ( $\pm 0,01$ ) $\text{мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot 10^{-6}$	254,20	231,40

Таким образом, в ходе проведенного исследования получены и исследованы медные гальванические покрытия, изготовленные с добавлением наночастиц электроэрозионной меди, обладающие повышенной твердостью и износостойкостью, по сравнению со стандартными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан способ получения порошковой меди из отходов электротехнической медной проволоки, отличающийся тем, что отходы электротехнической медной проволоки, содержащие не менее 99,5% меди, подвергают электроэрозионному диспергированию в дистиллированной воде при частоте следования импульсов 28...100 Гц, напряжении на электродах 150...220 В и емкости разрядных конденсаторов 25,5...55,5 мкФ (патент на изобретение РФ № 2599476).

2. Разработан способ получения нанопорошка меди из отходов электротехнической медной проволоки, отличающийся тем, что отходы электротехнической медной проволоки, содержащие не менее 99,5 % меди, подвергают электроэрозионному диспергированию в дистиллированной воде при частоте следования импульсов 100...120 Гц, напряжении на электродах 200...220 В и емкости разрядных конденсаторов 25,5...35,5 мкФ, с последующим центрифугированием рас-

творя для отделения наноразмерных частиц от крупноразмерных (патент на изобретение РФ № 2597445).

3. Разработан способ получения медных гальванических покрытий, модифицированных наночастицами электроэрозионной меди, отличающийся тем, что в сульфатный электролит меднения вводят наночастицы меди, полученные электроэрозионным диспергированием медных отходов, размерностью 2,5...100 нм в концентрации до 0,1 г на 100 мл электролита (патент на изобретение РФ № 2612119).

4. Установлены закономерности изменения структуры и свойств порошковой меди, полученной при электроэрозионном диспергировании, от свойств рабочей жидкости.

При электроэрозионном диспергировании меди в дистиллированной воде: образуются частицы правильной сферической формы; средний размер частиц составляет 24 мкм; удельная площадь поверхности – 0,2 м<sup>2</sup>/г; основным элементом является медь (99,92 %), количество примесей незначительное (0,08 %); основными фазами является Cu и Cu<sub>2</sub>O.

При электроэрозионном диспергировании меди в керосине осветительном: образуются частицы в основном неправильной формы; средний размер частиц составляет 34 мкм; удельная площадь поверхности – 0,08 м<sup>2</sup>/г; основными элементами являются медь (79,45 %), углерод (17,7 %) и кислород (2,85 %); основными фазами является Cu, Cu<sub>2</sub>O и C.

5. Разработана технология получения пригодных к промышленному применению спеченных образцов, полученных холодным изостатическим прессованием и спеканием в вакууме при 900...1000 °С в течение 1 часа из электроэрозионной меди, полученной в дистиллированной воде. Исследованы свойства спеченных образцов, полученных из электроэрозионной меди холодным изостатическим прессованием и спеканием в вакууме при 900 °С и 1000 °С в течение 1 часа. Установлено, что среднее значение твердости образца, спеченного при 900 °С, составляет 52,1 HV, плотность – 8,25 г/см<sup>3</sup>; основным элементом являются Cu. Установлено, что среднее значение твердости образца, спеченного при 1000 °С, составляет 56,1 HV, плотность – 8,51 г/см<sup>3</sup>; основным элементом является Cu.

6. Доказано, что введение высокотвердых наночастиц электроэрозионной меди, образующихся при закалке паров металла в рабочей жидкости при диспергировании, способствует повышению твердости гальванического покрытия. При увеличении концентрации наночастиц электроэрозионной меди с 0,03 до 0,05 г / 100 мл электролита среднее значение твердости медного покрытия с наночастицами электроэрозионной меди увеличивается с 290 HV до 316 HV, что выше значений твердости стандартного медного покрытия на 8,3 % и 15,8 % соответственно.

7. Разработанные технологии и оборудование апробированы и внедрены в ООО «КВАЛИМЕТ» г. Курск, ООО «Росутилизация46» г. Курск. Результаты исследований используются в учебном процессе при чтении лекций, выполнении лабораторных работ, курсовых и выпускных квалификационных работ со студентами и аспирантами в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный универ-

ситет» г. Курск.

**Основные положения и результаты диссертации опубликованы:**

**Монографии**

1. Агеев, Е.В. Состав и свойства медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием [Текст]: монография / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014. – 143 с.
2. Агеева, Е.В. Получение и исследование композиционных медных гальванических покрытий, модифицированных медными электроэрозионными порошками микро- и нанодисперсий: монография / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. – 131 с.

**Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций**

3. Хорьякова, Н.М. Электроэрозионные медные порошки для гальванических покрытий / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеева, Е.В. Агеев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4. – С. 18-20.
4. Агеева, Е.В. Исследование формы и морфологии электроэрозионных медных порошков, полученных из отходов / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 8. – С. 73-75.
5. Агеева, Е.В. Исследование распределения микрочастиц по размерам в порошках, полученных электроэрозионным диспергированием медных отходов / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 9. – С. 63-65.
6. Агеева, Е.В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 10. – С. 66-68.
7. Агеева, Е.В. Изготовление заготовок из медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов электротехнической меди и изучение их свойств / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Н.М. Хорьякова // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 10. – С. 10-13.
8. Агеева, Е.В. Рентгеноструктурный анализ порошка, полученного электроэрозионным диспергированием в среде керосина / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Р.А. Латыпов, П.И. Бурак // Международный технико-экономический журнал. – 2015. – № 2. – С. 59-65.
9. Агеев, Е.В. Использование медного электроэрозионного нанопорошка в гальванических покрытиях поршневых колец / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 3 (50). – С. 24-33.
10. Агеева, Е.В. Состав, структура и свойства медного электроэрозионного порошка, полученного в среде керосина / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, С.В. Пикалов, Е.В. Агеев // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 4. – С. 4-8.
11. Хорьякова, Н.М. Исследования гранулометрического и элементного состава электроэрозионного медно-углеродного порошка, полученного в керосине / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, И.В. Егельский, Д.А. Чумак-Жунь // Известия

Юго-Западного государственного университета. Серия техника и технологии. – 2015. – № 4 (17). – С.18.24.

12. Агеева, Е.В. Исследование физико-механических и трибологических свойств медных гальванических покрытий, полученных с добавлением медного электроэрозионного нанопорошка / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2016. № 1. – С. 35–43.

13. Агеева, Е.В. Определение оптимальных электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования для диспергирования медных отходов в воде дистиллированной постановкой факторного эксперимента / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Г.Р. Латыпова // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – № 6 (69). – С. 28-35.

14. Хорьякова, Н.М. Сравнительная характеристика морфологии и твердости спеченных образцов из электроэрозионного медного порошка и ПМС-1 / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника и технологии. – 2017. – № 1 (22). – С.14-21.

15. Латыпов, Р.А. Сравнительный рентгеноспектральный микроанализ медного порошка полученного электроэрозионным диспергированием, и медного порошка ПМС-1 / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова // Электрометаллургия. – 2017. – № 4. – С.36-40.

16. Агеев, Е.В. Повышение срока службы поршневых колец ДВС медными электроэрозионными порошками / Е.В. Агеев, Н.М. Хорьякова // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – № 126. – С.137-143.

#### **Статьи в журналах, индексируемых международной системой цитирования Scopus**

17. Ageeva, E.V. Production of Copper Electroerosion Nanopowders from Wastes in Kerosene Medium / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, N.M. Horyakova, V.S. Malukhov // Journal of nano- and electronic physics. – 2014. – Vol. 6. – № 3. – pp. 03011-1-03013-3.

18. Ageeva, E. V. Morphology of Copper Powder Produced by Electrosark Dispersion from Waste / E.V. Ageeva, N.M. Horyakova, E.V. Ageev // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34. – №. 11. – pp. 694-696.

19. Ageeva, E.V. Morphology and Composition of Copper Electrosark Powder Suitable for Sintering / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, N.M. Horyakova // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35. – № 1. – pp. 33–35.

20. Ageev, E. V. Preparation of copper electroerosion nanopowders from waste of aquatic medium and its validation by physicochemical methods / E.V. Ageev, I.A. Avilova, N.M. Horyakova // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – pp. 23-27.

21. Ageeva, E.V. Insight into physicomachanical and tribological properties of copper galvanic coatings formed with the addition of electroerosion copper nanopowder / E.V. Ageeva, R.A. Latypov, N.M. Horyakova, E.V. Ageev // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2017, – Vol. 58. – No. 2. – pp. 161–167.

#### **Статьи и материалы конференций**

По теме диссертации опубликовано более 30 статей РИНЦ.

22. Агеев, Е.В. Возможность переработки медных отходов в порошки электроэрозионным диспергированием [Текст] / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова,

- В.С. Малюхов // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. XXXVI Международ. науч.-технич. конф. – Новосибирск: НП «СибАК», 2014. – № 32. – С. 50-55.
23. Агеев, Е.В. Получение медных электроэрозионных нанопорошков из отходов в среде керосина [Текст] / Е.В. Агеев, Н.М. Хорьякова, В.С. Малюхов // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: тр. XI Междунар. конф. в 2 частях. – Курск: ЮЗГУ, 2014. – Ч. 1. – С. 85-91.
24. Агеев, Е.В. Переработка медных отходов в порошки электроэрозионным диспергированием и их аттестация физико-химическими методами [Текст] / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, В.С. Малюхов // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVI Междунар. науч.-практич. конф. – Томск: Национ. исследований. Томский политехн. ун-т, 2015. – С. 98-100.
25. Хорьякова, Н.М. Разработка медных гальванических покрытий для поршневых колец, модифицированных наночастицами электроэрозионной меди [Текст] / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2015. – Т. 2. – №. 1. – С. 337-339.
26. Хорьякова, Н.М. Метод электроэрозионного диспергирования как способ получения нанопорошков, пригодных к применению в автомобильной промышленности для модификации медных гальванических покрытий [Текст] / Е.В. Агеев, Н.М. Хорьякова, Д.Н. Зубанов, А.Н. Братков, Е.А. Маховицкий, Д.О. Плохих, В.С. Малюхов // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы междунар. научно-практ. конф. – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2015. – С. 303-307.
27. Хорьякова, Н.М. Разработка технологии получения электроэрозионных медных наночастиц из отходов [Текст] / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев, Е.А. Маховицкий, Д.О. Плохих // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2016. – Т. 3. – № 1. – С. 520-524.

#### Патенты

28. Пат. 2599476 Российская Федерация, МПК<sup>51</sup> В 22 F 9/14, С 22 В 7/00, В 82 В 3/00. Способ получения медного порошка из отходов [Текст] / Агеев Е.В., Хорьякова Н.М., Гвоздев А.Е., Агеева Е.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2014135563/13; заяв. 02.09.14; опубл. 10.10.16, Бюл. № 28. – 11 с.: ил.
29. Пат. 2597445 Российская Федерация, МПК<sup>51</sup> В 22 F 9/14, С 22 В 7/00, С 22 В 15/00, В 82 Y 30/00. Способ получения нанопорошка меди из отходов [Текст] / Агеев Е.В., Хорьякова Н.М., Гвоздев А.Е., Агеева Е.В., Малюхов В.С.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2014135539/02; заяв. 02.09.14; опубл. 10.09.16, Бюл. № 25. – 10 с.: ил.
30. Пат. 2612119 Российская Федерация, МПК<sup>51</sup> С 25 D 15/00, В82 В 3/00. Способ получения медных гальванических покрытий, модифицированных наночастицами электроэрозионной меди [Текст] / Агеев Е.В., Хорьякова Н.М. Агеева Е.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2015131035/02; заяв. 27.07.15; опубл. 02.03.17, Бюл. № 7. – 14 с.: ил.

**ХОРЬЯКОВА НАТАЛЬЯ МИХАЙЛОВНА**

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО СПОСОБА  
ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ МЕДИ  
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ**

Специальность 05.16.09 Материаловедение (машиностроение)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2018 г. Формат 60x84 1/16.

Печ. л. \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_.

Юго-Западный государственный университет  
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94