

На правах рукописи



Агеева Екатерина Владимировна

**Научно-технологические основы получения
многофункциональных сплавов и покрытий
из диспергированных электроэрозией легковесных
отходов цветных металлов и легированных сплавов**

Специальность 2.6.1. Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Курск – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

**Официальные
оппоненты:**

Романов Александр Никитович

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБУН «Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова» Российской академии наук,
главный научный сотрудник, заведующий отделом
«Конструкционное материаловедение», г. Москва;

Овчинников Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Московский политехнический университет»,
заведующий кафедрой «Материаловедение»,
г. Москва;

Еремеева Жанна Владимировна

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС», профессор кафедры
порошковой металлургии и функциональных
покрытий, г. Москва.

**Ведущая
организация:**

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск.

Защита состоится «24» декабря 2021 г. в 13-00 на заседании
диссертационного совета 24.2.435.02 при ФГБОУ ВО
«Юго-Западный государственный университет» по адресу:
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО
«Юго-Западный государственный университет» и на сайте <https://swsu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Алтухов Александр Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Создание новых многофункциональных мелкодисперсных сплавов, отличающихся сверхвысокой прочностью и другими уникальными свойствами, является приоритетным направлением развития современного металлургического производства. Однако это развитие сдерживается проблемой чрезвычайно высокой стоимости таких материалов, связанной с дефицитностью компонентов, технологической сложностью и дороговизной их получения. Одним из путей решения названной проблемы является переработка в мелкодисперсное сырье легковесных металлоотходов, содержащих дорогостоящие компоненты, такие как W, Ti, Mo, Ni, Cr, Co, Al, Cu и др., силами собственных производственных мощностей предприятий при минимальных затратах энергии и экологическом уроне окружающей среды. Существующие в настоящее время способы переработки металлоотходов в мелкодисперсное сырье являются крупнотоннажными, энергоемкими и экологически вредными. На данный момент одной из основных проблем металлургических предприятий является широкое использование ресурсосберегающих технологий с высоким коэффициентом использования материала.

Одним из эффективных, но недостаточно изученных, металлургических способов измельчения легковесных металлоотходов является электродиспергирование. К настоящему времени в промышленности данный способ практически не применяется, ввиду отсутствия полноценных комплексных сведений о составе, структуре и свойствах диспергированных электроэрозией частиц, а также сплавов и покрытий, полученных на их основе. Для этого требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Решение данных задач позволит решить проблему создания многофункциональных мелкодисперсных сплавов и покрытий за счет электроэрозионной металлургии легковесных отходов цветных металлов и легированных сплавов.

Связь работы с научными программами. Актуальность работы подтверждается ее выполнением в рамках грантов Президента РФ (МК-1765.2013.8 и НШ-2564.2020.8), государственного задания Минобрнауки (Проект № 2104), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (соглашение № 14.В37.21.1845), а также соответствием:

– Указу Президента РФ от 7.07.2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ» в части рационального природопользования и энергоэффективности;

– Указу Президента РФ от 1.12.2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития РФ» в части обеспечения перехода к передовым производственным технологиям и новым материалам;

– Распоряжению Правительства РФ от 31.12.2020 г. № 3684-р «Программа фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период (2021 - 2030 годы)» в части разработки научных основ создания новых материалов с заданными свойствами и функциями.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в разработку и исследование новых функциональных мелкодисперсных сплавов и покрытий внесли следующие ученые: К.В. Григорович, Е.Н. Каблов, Г.Н. Еланский, А.А. Казаков, Г.А. Филиппов, А.Е. Лигачев, С.Я. Бецоффен, С.И. Богодухов, В.С. Панов, С.В. Коновалов, В.Б. Деев, Б.Р. Гельчинский, А.М. Гурьев, Л.М. Петров, А.С. Рогачев, С.В. Скворцова, Е.И. Хлусова, В.Н. Анциферов, С.Е. Порозова, Ю.Н. Симонов, В.Н. Чувильдеев, А.В. Нохрин, Н.В. Белоусова, А.А. Шатульский, А.Н. Романов, В.В. Овчинников, Ж.В. Еремеева, С.А. Никулин, В.И. Колмыков, Р.А. Латыпов, Е.А. Левашов, А.Е. Гвоздев, А.Н. Чуканов, С.В. Давыдов, А.О. Горленко, А.П. Кузьменко, В.И. Серебровский, А.В. Коломейченко, А.Е. Корнеев, В.В. Столяров, Л.И. Куксенова, Л.М. Гуревич и др. Вопросы получения легированных мелкодисперсных частиц электродиспергированием металлов и сплавов занимались такие ученые, как: Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко, Б.Н. Золотых, К.К. Намитоков, Г.А. Исхакова, О.И. Авсеевич, А.К. Шидловский, А.А. Щерба, В.А. Муратов, В.Б. Карвовский, Т.Б. Ершова, А.Д. Верхотуров, В.Л. Бутуханов, М.И. Дворник, Л.И. Коневцев, Н.В. Лебухова, Р.К. Байрамов, А.И. Ермаков, Н.Р. Ведерникова, Н.Б. Даниленко, Г.Г. Савельев, Т.А. Юрмазова, Н.А. Яворовский и др. Вместе с тем, в трудах перечисленных ученых отсутствуют сведения, касающиеся изучения состава, структуры и влияния технологии электродиспергирования легковесных металлоотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 на свойства шихты, а также сплавов и покрытий, полученных на их основе. Целесообразность решения данной проблемы обусловила выбор тематики, цель диссертационного исследования и круг научных задач.

Целью работы являлось разработка научно-технологических основ решения проблемы получения многофункциональных мелкодисперсных сплавов и покрытий из диспергированных электроэрозией легковесных отходов цветных металлов и легированных сплавов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 в дистиллированной воде и осветительном керосине.

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

1. Разработка теории процесса измельчения металлоотходов электрической эрозией и оценка влияния режимов электродиспергирования на дисперсность шихты и на скорость диспергирования. Расширение представления о механизме электродиспергирования металлических материалов и его пригодности для измельчения легковесных высокотвердых и теплостойких металлоотходов.

2. Исследование процесса измельчения легковесных металлоотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 электроэрозией в двух рабочих средах (кислородсодержащей и углеродсодержащей). Оптимизация процесса электродиспергирования легковесных металлоотходов по среднему размеру частиц шихты. Разработка моделей процесса электродиспергирования металлоотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1.

3. Аттестация состава, структуры и свойств электроэрозионной шихты с использованием современных взаимодополняющих методов физического материаловедения. Выявление закономерностей между составом, структурой, свойствами ших-

ты и составом, свойствами рабочих жидкостей при электродиспергировании легко-весных металлоотходов.

4. Получение новых многофункциональных сплавов искровым плазменным сплавлением электроэрозионной шихты, полученной из металлоотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 в двух рабочих средах. Оптимизация процесса получения новых многофункциональных сплавов и аттестация их состава, структуры и свойств с использованием современных взаимодополняющих методов физического материаловедения. Разработка моделей процессов получения новых многофункциональных сплавов искровым плазменным сплавлением электроэрозионной шихты.

5. Получение функциональных композиционных электрохимических покрытий с добавлением частиц, диспергированных электроэрозией легко-весных металлоотходов марок Т30К4 и М1. Оптимизация процесса получения функциональных покрытий и аттестация их состава, структуры и свойств с использованием современных взаимодополняющих методов физического материаловедения.

6. Исследование влияния состава, структуры и свойств частиц, полученных электродиспергированием легко-весных металлоотходов, на состав, структуру и свойства новых многофункциональных легированных сплавов и покрытий, полученных на их основе.

7. Апробация, патентование и внедрение способов измельчения легко-весных металлоотходов, а также новых многофункциональных сплавов и покрытий, полученных на основе диспергированных электроэрозией легко-весных металлоотходов.

Научная новизна

1. С использованием электроконтактной теории обоснованы механизмы структурообразования частиц цветных металлов и легированных сплавов в процессе электроэрозионной металлургии легко-весных металлоотходов (Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1) и объяснено наличие двух экстремумов наиболее вероятных размеров частиц в экспериментально определенном фракционном составе: мелкая фракция (0,25 ... 25,0 мкм) образуется за счет конденсации парообразной фазы и крупная фракция (25,0 ... 100 мкм) образуется за счет конденсации жидкой фазы. Отмечено, что соотношение объемов, образуемых при диспергировании парообразной и жидкой фаз, определяется теплофизическими свойствами диспергируемого металлоотхода. Установлена зависимость, показывающая, что средний размер легированных мелкодисперсных частиц увеличивается с повышением энергии импульса. Получены зависимости, позволяющие выполнить расчетную оценку фракционного состава диспергируемого материала, получаемого в условиях действия электроконтактных тепловых источников.

2. Установлены корреляционные зависимости дисперсного, элементного и фазового составов продуктов электродиспергирования легко-весных металлоотходов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 от состава и свойств окружающей рабочей жидкости, позволяющие управлять их свойствами. Показано, что на элементный и фазовый составы продуктов электродиспергирования оказывает влияние химический состав рабочей среды, а на гранулометрический состав –

диэлектрическая проницаемость. Отмечено, что наличие в составе рабочей жидкости (керосин) углерода способствует образованию фаз карбидов, таких как WC, TiC, Ni₃C, Fe₃C, Mo₂C и Cr₃C₂, а наличие в составе рабочей жидкости кислорода (вода) приводит к образованию оксидных фаз WO₂, Fe₂O₃, Ni₂O₃, Fe₃O₄, MoO₃, Cr₂O₃, Al₂O₃, Cu₂O, а также приводит к обезуглероживанию карбидов вплоть до фаз чистых металлов W, Fe, Ni, Cr и др. Большая диэлектрическая проницаемость воды приводит к большей потере энергии импульса на ее пробой и меньшему среднему размеру частиц диспергируемого материала, по сравнению с электродиспергированием в керосине.

3. Определены корреляционные зависимости дисперсного состава продуктов электродиспергирования металлоотходов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 от энергетических характеристик (напряжения на электродах, емкости разрядных конденсаторов и частоты следования импульсов) самого процесса электродиспергирования, позволяющие обеспечить требуемые для практического применения характеристики. Разработаны модели процесса электродиспергирования металлоотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1, использование которых позволит управлять средним размером частиц электроэрозионной шихты.

4. Получены закономерности состава, структуры и свойств новых многофункциональных сплавов от состава, структуры и свойств шихты из диспергированных электроэрозией частиц металлоотходов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1, позволяющие оказывать влияние на их физико-механические свойства. Разработаны модели процессов получения новых многофункциональных сплавов искровым плазменным сплавлением шихты, изготовленной путем измельчения легковесных металлоотходов электрической эрозией, использование которых позволит управлять процессом сплавления с целью обеспечения требуемых физико-механических и эксплуатационных свойств новых многофункциональных сплавов.

5. Установлена зависимость состава, структуры и свойств композиционных электрохимических покрытий на основе диспергированных частиц из металлоотходов марок Т30К4 и М1 от их состава, структуры и свойств, позволяющая оказывать влияние на физико-механические свойства. Разработаны модели процессов получения композиционных электрохимических покрытий, использование которых позволит управлять их физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Теоретическая и практическая значимость

1. Проведен теоретический анализ механизма структурообразования и изменения размера частиц шихты в процессе электроэрозионной металлургии легковесных металлоотходов (Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1). На основе электроконтактной теории обоснованы механизмы структурообразования частиц электроэрозионной шихты.

2. Разработана и аттестована электроэрозионная шихта, полученная электроэрозионной металлургией легковесных отходов цветных металлов и легированных сплавов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1.

3. Разработаны и исследованы функциональные сплавы из шихты, полученной электроэрозионной металлургией легковесных отходов цветных металлов и легиро-

ванных сплавов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1.

4. Разработаны и исследованы новые функциональные композиционные электрохимические покрытия на основе диспергированных частиц из металлоотходов марок Т30К4 и М1.

5. Проведены патентование и внедрение в производство новых способов получения электроэрозионной шихты из легковесных металлоотходов, а также функциональных сплавов и покрытий на ее основе (Патенты на изобретения РФ: № 2364482; № 2563609; № 2597443; № 2590045; № 2597445; № 2599476; № 2612117; № 2631549; № 2612119; № 2612886; № 2613240; РФ № 2664149; № 2680536; № 2681237; № 2681238; № 2688025; № 2699479; № 2683162; № 2705837; № 2709561; № 2710707; № 2713900; № 2735844; № 2747197; № 2747205; № 2748 659; № 2750720).

Соответствие работы паспорту научной специальности. Диссертационная работа по тематике, содержанию и результатам соответствует паспорту научной специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» в части:

– п.3 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов»;

– п.8 «Исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях, выбор и рекомендация наиболее экономичных и надежных металлических материалов для конкретных технических назначений с целью сокращения металлоемкости, увеличения ресурса работы, повышения уровня заданных физических и химических характеристик деталей машин, механизмов, приборов и конструкций»;

– п.9 «Разработка новых принципов создания сплавов, обладающих заданным комплексом свойств, в том числе для работы в экстремальных условиях».

Методология и методы исследования. Поставленные в работе задачи решались с использованием современного оборудования и взаимодополняющих методов физического материаловедения, в том числе: электродиспергирование металлоотходов осуществляли на оригинальной установке (Патент РФ № 2449859); форму и морфологию поверхности частиц исследовали на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды); гранулометрический состав и коэффициент элонгации (удлинения) частиц электроэрозионной шихты исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec» (Германия); рентгеноспектральный микроанализ частиц, сплавов и покрытий проводили на энергодисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы «EDAX» (Нидерланды), встроенном в растровый электронный микроскоп «QUANTA 200 3D» (Нидерланды); фазовый анализ частиц, сплавов и покрытий выполняли на рентгеновском дифрактометре «Rigaku Ultima IV» (Япония); сплавление электроэрозионной шихты осуществляли в системе «SPS 25-10 Thermal Technology» (США); осаждение электрохимических покрытий с добавлением электроэрозионной шихты осуществляли на гальванической установке «L1 DIGIT» (Италия); механическую обработку образцов сплавов и покрытий проводили на автоматическом высокоточном настольном отрезном станке «Accutom-5» (Дания) и шлифовально-полировальном станке «LaboPol-5» (Дания); микроструктуру частиц,

сплавов и покрытий исследовали на оптическом инвертированном микроскопе «OLYMPUS GX51» (Япония) и электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды); пористость и размер зерна в сплавах исследовали на оптическом инвертированном микроскопе «OLYMPUS GX51» (Япония), оснащенном системой автоматизированного анализа изображений «SIMAGIS Photolab»; микротвёрдость сплавов и покрытий определяли с помощью прибора «Instron 402 MVD» (Великобритания); твердость сплавов по Роквеллу и по Бринеллю определяли с помощью прибора «Instron 600 MRD» (Великобритания); предел прочности при сжатии и при изгибе образцов сплавов определяли с помощью прибора «Instron 300 LX-B1-C3-J1C» (Великобритания); шероховатость поверхности образцов покрытий определяли с помощью автоматизированного прецизионного контактного профилометра «SURTRONIC 25» (Великобритания); износостойкость образцов сплавов и покрытий исследовали по стандартной схеме испытания «шарик-диск» на автоматизированной машине трения «Tribometer, CSM Instruments» (Швейцария); адгезию покрытий исследовали на скретч-тестере «Revetest CSM Instruments» (Швейцария); оптимизацию технологических процессов электродиспергирования металлоотходов, сплавления и электрохимического осаждения электроэрозионной шихты проводили путем постановки полного факторного эксперимента и метода крутого восхождения Бокса и Уилсона.

Положения, выносимые на защиту

1. Технические и технологические решения и разработки, подтвержденные патентами на изобретения РФ, позволяющие получать пригодные к промышленному применению диспергированные электроэрозией частицы цветных металлов и легированных сплавов (Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1) в двух рабочих средах (дистиллированной воде и осветительном керосине).

2. Технические и технологические решения и разработки, подтвержденные патентами на изобретения РФ, позволяющие получать пригодные к промышленному применению новые многофункциональные сплавы на основе шихты из диспергированных электроэрозией отходов цветных металлов и легированных сплавов (Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1).

3. Технические и технологические решения и разработки, подтвержденные патентами на изобретения РФ, позволяющие получать пригодные к промышленному применению функциональные покрытия на основе частиц, изготовленных электродиспергированием легковесных металлоотходов (М1, Т30К4).

4. Совокупность результатов экспериментальных исследований, полученных с использованием современных взаимодополняющих методов физического материаловедения, состава, структуры и свойств диспергированных электроэрозией частиц в двух рабочих средах металлоотходов (Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1), позволяющая определить их наиболее рациональную область практического применения.

5. Совокупность результатов экспериментальных исследований, полученных с использованием современных взаимодополняющих методов физического материаловедения, свойств новых многофункциональных сплавов, полученных на основе

диспергированных электроэрозией частиц металлоотходов (Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1), позволяющая определить их наиболее рациональную область практического применения.

6. Совокупность результатов экспериментальных исследований свойств функциональных покрытий, полученных на основе диспергированных электроэрозией частиц металлоотходов (Т30К4 и М1), позволяющая определить их наиболее рациональную область практического применения.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются принятой методологией исследования, включающей в себя современное исследовательское оборудование и взаимодополняющие методы физического материаловедения, получением 27 патентов на изобретения РФ, а также апробацией основных положений диссертационной работы на 56 международных и всероссийских научных конференциях в период с 2006 г. по н.в. Достоверность и обоснованность выносимых на защиту научных положений и выводов подтверждена положительными результатами при их внедрении в образовательный процесс и в производство.

Реализация результатов работы

Разработанные новые многофункциональные сплавы и покрытия, а также технологии их получения апробированы и внедрены в производство: ООО «Инжиниринговый центр двигателестроения «ТрансМашХолдинг» г. Коломна Московская обл.; ООО НПП «ТЕЛАР» г. Тула; ООО ПП «МехМаш» г. Тула; ООО «Репар Ко Механикс» г. Тула; ООО «РосУтилизация 46» г. Курск; ООО «Краснополянская сельхозтехника» г. Курск с общим годовым экономическим эффектом более 20 млн. руб. Основные результаты работы используются в образовательном процессе студентов и аспирантов ЮЗГУ, СПбПУ им. Петра Великого, ВУЦ ТулГУ и ОГУ им. И.С. Тургенева.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является обобщением результатов исследований, выполненных автором в ЮЗГУ (КурскГТУ) в период с 2006 г. по н.в. Лично автором: выполнен весь объем экспериментальных исследований по получению электроэрозионной шихты, а также сплавов и покрытий на ее основе; выбран комплекс современных методик для аттестации шихты, сплавов и покрытий; выполнена обработка результатов, их анализ, интерпретация в виде заявок на изобретения РФ, статей, монографий. Помимо того, автором разработаны новые технические и технологические решения, позволяющие получать пригодные к промышленному применению новые многофункциональные сплавы и покрытия, полученные на основе частиц, изготовленных электродиспергированием в кислород- и углеродсодержащих рабочих жидкостях легковесных металлоотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1. Проведено патентование и внедрение в производство способов измельчения легковесных металлоотходов, а также новых электроэрозионных материалов и способов их практического применения.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на международных и всероссийских научных конференциях в период с 2006 г. по н.в., в том числе: Современные инструментальные системы, ИТиИ (г. Курск, 2006-2021 гг.); Материалы и упрочняющие технологии (г. Курск, 2006-2012 гг.); Современное материаловедение и нанотехнологии (г. Комсомольск-на-Амуре, 2010 г.); Современные проблемы машиностроения (г. Томск, 2010-2020 гг.); Современные твердофазные технологии (г. Тамбов, 2010, 2011 гг.); Современные автомобильные материалы и технологии (г. Курск, 2010-2020 гг.); Техника и технологии: пути инновационного развития (г. Курск, 2011-2021 гг.); Перспективное развитие науки, техники и технологий (г. Курск, 2012-2021 гг.); Актуальные вопросы современной техники и технологии (г. Липецк, 2012 г.); Современные технологии в машиностроении (г. Пенза, 2012 г.); Машиностроение – основа технологического развития России (г. Курск, 2013 г.); Dny vědy – 2013, 2014 (г. Praha, 2013, 2014 гг.); Ключови въпроси в съвременната наука – 2013 (г. София, 2013 г.); Найновите постижения на европейската наука – 2013 (г. София, 2013 г.); Динамиката на съвременната наука – 2013 (г. София, 2013 г.); Физика и технология наноматериалов и структур (г. Курск, 2013-2017 гг.); Современные материалы, техника и технологии (г. Курск, 2013-2020 гг.); Strategiczne pytania swiatowej nauki – 2014 (г. Praha, 2014 г.); Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов (г. Москва, 2014-2020 гг.); Технические науки – от теории к практике (г. Новосибирск, 2014 г.); Химия и химическая технология в XXI веке (Томск, 2015 г.); Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (г. Севастополь, 2017-2021 гг.); Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование (Ялта, 2020, 2021 гг.); Современные проблемы и направления развития металлостроения и термической обработки металлов и сплавов (г. Курск, 2020, 2021 гг.); Материаловедение, машиностроение и энергетика: проблемы и перспективы развития (г. Барнаул, 2020 г.); Современные тенденции машиностроения и техносферной безопасности (г. Ростов-на-Дону, 2020 г.) и др. (всего 56 конференций).

Публикации. Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 188 работах, в том числе: 12 монографий, 27 патентов на изобретения РФ, 107 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 42 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 366 страниц, в том числе 29 таблиц, 85 рисунков, 40 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен анализ проблемы создания новых материалов с заданными свойствами и функциями. Отмечено, что повышение физико-механических свойств многофункциональных дисперсных сплавов является важнейшей проблемой современного металлургического производства, для решения которой предлагается несколько направлений исследований. Первое направление заключается в разработке научных и технологических основ создания качественных и недорогих легированных мелкодисперсных частиц (ЛМЧ), а второе направление – разработка научных и технологических основ сплавления ЛМЧ с целью получения беспористой структуры с мелким зерном. Одним из эффективных, но недостаточно изученных, металлургических способов получения ЛМЧ путем измельчения легковесных металлоотходов является электродиспергирование. К настоящему времени в промышленности данный способ практически не применяется, ввиду отсутствия полноценных комплексных сведений о составе, структуре и свойствах диспергированных электроэрозией частиц, а также сплавов и покрытий, полученных на их основе. В связи с этим актуальным является создание многофункциональных мелкодисперсных сплавов и покрытий с заданным комплексом свойств из шихты, полученной из диспергированных электроэрозией легковесных отходов цветных металлов и легированных сплавов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 в дистиллированной воде и осветительном керосине. Сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе обоснованы механизмы структурообразования частиц цветных металлов и легированных сплавов в процессе электроэрозионной металлургии легковесных металлоотходов с использованием электроконтактной теории, а также описаны теоретические и технологические особенности измельчения металлоотходов электроэрозией.

В настоящее время в научно-технической литературе для описания механизма электродиспергирования металлов и сплавов применяется тепловая теория, согласно которой разрушение материала происходит в результате его высокоскоростного нагрева до температур плавления и испарения. Применительно к процессу электродиспергирования металлоотходов принято выделять три возможных варианта процессов, протекающих между электродами и кусками диспергируемого материала.

Первый вариант процесса предполагает, что под влиянием электрического поля между электродами и гранулами диспергируемого материала происходит пробой промежутка. После пробоя капли расплавленного металла и его пары беспрепятственно удаляются из зоны разрядов. Разрушение металла происходит исключительно за счет действия поверхностного теплового источника.

Второй вариант процесса предполагает, что при выбросе металла электроды замыкаются расплавленным металлом. При этом, если достаточно энергии электрического импульса, металлический мостик взрывообразно разрушается при его перегреве джоулевым теплом и межэлектродный промежуток освобождается от металла.

Третий вариант процесса предполагает, что к моменту прохождения импульса тока электроды уже соприкасаются друг с другом. При прохождении импульса тока достаточной мощности происходит перегрев и разрушение контактирующих микровыступов джоулевым теплом с последующим возможным образованием разрядного канала.

Применительно к рассматриваемому процессу электроэрозионного диспергирования легковесных металлоотходов реализация первого и второго вариантов, предусматривающих электрический пробой межэлектродного промежутка, представляется мало вероятной из-за шунтирования (параллельного соединения) импульсов электрического тока в цепи электрод – объемы диспергируемого металла – электрод. Поэтому именно третий вариант нагрева с предварительным коротким замыканием и последующим возможным искрообразованием при размыкании электрической цепи является наиболее вероятным механизмом диспергирования.

Исходя из этой теории, была выполнена расчетная оценка эффективности мощности тепловыделения на контактных сопротивлениях применительно к размеру частиц электроэрозионной шихты, образующихся в процессе электродиспергирования металлоотходов, без учета последующего искрообразования. Размер частиц является одним из важнейших свойств шихты, влияющих на физико-механические свойства функциональных сплавов. При этом ограничили учет только сопротивления стягивания. Рассмотрена схема для расчета нагрева зоны контакта гранул диспергируемого материала, представленная на рисунке 1.

Считаем, что электрический контакт возникает в области точки O , причем площадь контакта пренебрежимо мала по сравнению с размерами контактирующих частиц. Предполагаем также, что эквипотенциальные поверхности 1 и 2 с потенциалами Φ_R и Φ_{R+h} , удаленные друг от друга на расстоянии h , представляют собой полусферы. Из данного допущения следует, что плотность тока j по поверхности сферы с произвольным радиусом R постоянна.

Тогда приращение теплоты dQ , выделившееся в объеме частицы, ограниченной эквипотенциальными поверхностями 1 и 2 за время dt составит

$$dQ = d(I^2 \omega t), \quad (1)$$

где ω – электрическое сопротивление металла частицы, ограниченного эквипотенциальными поверхностями 1 и 2.

Полагая, что $R \gg h$, получим

$$\omega = \rho \frac{h}{2\pi R^2}, \quad (2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление.

Учтем также зависимость ρ от температуры нагрева T

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha T), \quad (3)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление при начальной температуре, α – температурный коэффициент электрического сопротивления.

Приняв также допущение, что $I=const$, и подставив (2) и (3) в (1), получили

$$dQ = I^2 \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{h}{2\pi R^2} dt \quad (4)$$

Учитывая кратковременность действия импульсов тока диспергирования, а также интенсивное охлаждение частиц рабочей средой, приняли, что возникающее в частицах поле температур определяется исключительно полем мощности тепловыделения, при этом процессы теплопередачи на распределение температур в частице влияния не оказывают.

С другой стороны, можно записать

$$dQ = mcdT, \quad (5)$$

где m – масса металла, расположенного между эквипотенциальными поверхностями 1 и 2,

c – теплоемкость.

Приравнивая правые части уравнений (4) и (5) получили

$$mcdT = I^2 \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{h}{2\pi R^2} dt \quad (6)$$

На основе геометрических построений из рисунка 1 найдем, что

$$m = 2\pi R^2 h \gamma, \quad (7)$$

где γ – плотность металла.

Подставив (7) в (6), получили

$$2\pi R^2 h \gamma c dT = I^2 \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{h}{2\pi R^2} dt \quad (8)$$

Перепишем уравнение (8) в виде

$$\frac{dT}{(1 + \alpha T)} = \frac{I^2 \rho_0}{4\pi^2 R^4 \gamma c} dt \quad (9)$$

Интегрируя выражение (9), получили

$$t = \frac{4\pi^2 R^4 c}{I^2 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha T) + B, \quad (10)$$

где B – постоянная интегрирования.

При $T < T_{nl}$ (где T_{nl} – температура плавления) $B=0$ и выражение (10) примет вид

$$t = \frac{4\pi^2 R^4 c}{I^2 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha T) \quad (11)$$

В случае полного расплавления нагреваемого объема металла необходимо учесть скрытую теплоту плавления. В этом случае

$$B = \frac{4\pi^2 R^4 \lambda}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{nl})}, \quad (12)$$

где λ – удельная теплота плавления.

С учетом (10) и (12) время нагрева выделенной сферы с радиусом R до температуры плавления составит

$$t_{nl} = \frac{4\pi^2 R^4 c}{I^2 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha T_{nl}) + \frac{4\pi^2 R^4 \lambda}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{nl})}. \quad (13)$$

Для случая нагрева металла до его испарения

$$B = \frac{4\pi^2 R^4 \lambda}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{nl})} + \frac{4\pi^2 R^4 L}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{исн})}. \quad (14)$$

Продолжительность $t_{исн}$ нагрева металла до его испарения на основании (10) и (14) составит

$$t_{исн} = \frac{4\pi^2 R^4 c}{I^2 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha T_{исн}) + \frac{4\pi^2 R^4 \lambda}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{nl})} + \frac{4\pi^2 R^4 L}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{исн})}, \quad (15)$$

где L – удельная теплота парообразования.

Из выражений (13) и (15) можно получить значения радиусов R_{nl} и $R_{исн}$ полу-сфер, соответствующих границам плавления и испарения металла при произвольной продолжительности нагрева t

$$R_{nl} = \left(\frac{I}{2\pi} \right)^{0,5} \left(\frac{\rho_0 \alpha t}{c \ln(1 + \alpha T_{nl}) + \frac{\lambda}{1 + \alpha T_{nl}}} \right)^{0,25}, \quad (16)$$

и

$$R_{исн} = \left(\frac{I}{2\pi} \right)^{0,5} \left(\frac{\rho_0 \alpha t}{c \ln(1 + \alpha T_{исн}) + \frac{\lambda}{1 + \alpha T_{nl}} + \frac{L}{1 + \alpha T_{исн}}} \right)^{0,25}. \quad (17)$$

Объем материала, расположенный на удалении от контакта на расстояние $R < R_{исн}$, при нагреве превращаются в пар. Объем материала, расположенный на удалении от контакта на расстояние $R < R_{nl}$, при нагреве переходит как в жидкое, так и парообразное состояния.

Объем испаренного металла вокруг одного контакта найдем как

$$V_{исн} = \frac{4}{3} \pi R_{исн}^3. \quad (18)$$

Суммарный объем испаренного и расплавленного металла соответственно составит

$$V_{nl} = \frac{4}{3} \pi R_{nl}^3. \quad (19)$$

Подставив в (18) и (19) зависимости (16) и (17), получили

$$V_{усн} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{I}{2\pi} \right)^{1,5} \left(\frac{\rho_0 \alpha t}{c \ln(1 + \alpha T_{усн}) + \frac{\lambda}{1 + \alpha T_{нл}} + \frac{L}{1 + \alpha T_{усн}}} \right)^{0,75}, \quad (20)$$

и

$$V_{нл} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{I}{2\pi} \right)^{1,5} \left(\frac{\rho_0 \alpha t}{c \ln(1 + \alpha T_{нл}) + \frac{\lambda}{1 + \alpha T_{нл}}} \right)^{0,75}. \quad (21)$$

Доля парообразной фазы в диспергированном объеме составит

$$\mu = \frac{V_{усн}}{V_{нл}}. \quad (22)$$

Подставив в (22) зависимости (20) и (21), получили

$$\mu = \left(\frac{c \ln(1 + \alpha T_{нл}) + \frac{\lambda}{1 + \alpha T_{нл}}}{c \ln(1 + \alpha T_{усн}) + \frac{\lambda}{1 + \alpha T_{нл}} + \frac{L}{1 + \alpha T_{усн}}} \right)^{0,75}. \quad (23)$$

Зависимость (23) показывает, что при электроконтактном способе нагрева соотношение объемов, образуемых при диспергировании парообразной и жидкой фаз, определяется теплофизическими свойствами диспергируемого материала.

Рассмотрим в качестве примера электродиспергирование отходов меди. Приняв, что $T_{нл}=1083 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{усн}=2560 \text{ }^\circ\text{C}$, $\alpha=0,01 \dots 0,03 \text{ град}^{-1}$ (в диапазоне $T = 0 \dots T_{усн} \text{ }^\circ\text{C}$), $c=400 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$, $\lambda=213 \text{ Дж/кг}$, $L=4800 \text{ Дж/кг}$, по зависимости (23) получили $\mu \approx 0,1$. Таким образом, порядка 10% диспергируемого материала должно образовываться при конденсации паров металла. На основе зависимостей (16) и (17) выполнили расчетную оценку размеров частиц, получаемых из парообразной и жидкой фаз в предположении, что за один импульс тока на одном контакте образуется одна шарообразная частица из парообразной фазы диаметром

$$D_n = 2R_{усн}, \quad (24)$$

и одна шарообразная частица из жидкой фазы диаметром

$$D_{ж} = 2(R_{нл} - R_{усн}). \quad (25)$$

Результаты расчетов представлены на рисунке 2.

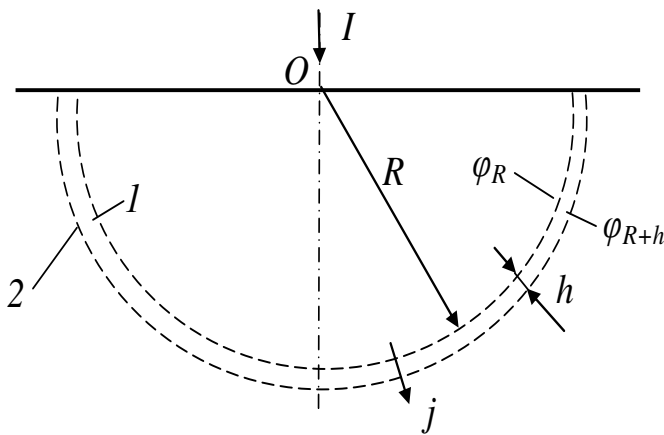


Рисунок 1 – Схема для расчета нагрева зоны контакта

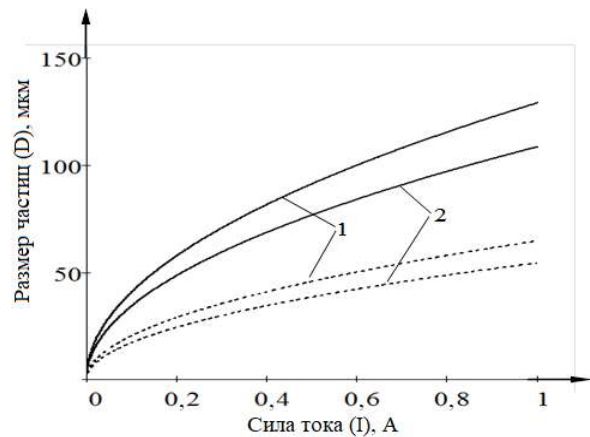


Рисунок 2 – Изменение размеров частиц в зависимости от силы тока:

1 – $t=0,01$ с; 2 – $t=0,05$ с; — – из жидкой фазы; - - - из парообразной фазы

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 2 показывает, что размер частиц электроэрозионной шихты увеличивается с повышением силы тока (напряжения). Размеры частиц, образованных из парообразной и жидкой фаз, резко различаются, что объясняет наличие нескольких экстремумов наиболее вероятных размеров частиц в экспериментально определенном фракционном составе полученной электроэрозионной шихты (см. главу 4). Проведенные исследования показали, что мощность электроконтактных тепловых источников может быть достаточной для реализации процесса электроэрозионного диспергирования металлоотходов. Прогнозируемые размеры получаемых частиц в целом согласуются с результатами эксперимента с погрешностью до 5%.

В третьей главе описаны используемые материалы, рабочие жидкости, оборудование и методики исследований. Для выполнения намеченных исследований были выбраны металлоотходы, содержащие дорогостоящие легирующие компоненты, и наиболее распространённые на современных машиностроительных предприятиях: цветные металлы марок АД0Е, М1 (отходы электротехнической проволоки); легированные стали марок: Р6М5, Х15Н60; твердые сплавы марок: Т30К4, ВНЖ95. В качестве рабочих жидкостей применялись наиболее технологичные и дешевые жидкости: кислородсодержащая жидкость – дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72) и углеродсодержащая жидкость – осветительный керосин (ТУ 38.401-58-10-01). При решении поставленных задач использовали современные взаимодополняющие методы физического материаловедения, перечисленные в подразделе «Методология и методы исследования». Для получения ЛМЧ из легковесных отходов цветных металлов и легированных сплавов использовалась оригинальная запатентованная установка для измельчения токопроводящих материалов электроэрозией. Для получения мелкодисперсных функциональных сплавов использовалась установка «SPS 25-10 Thermal Technology», спецификой которой является сочетание процессов давления и сплавления шихты при воздействии на нее импульсного электрического тока. Для получения композиционных электрохимических покрытий использовался метод

электроосаждения полученных электроэрозионных частиц в стандартных электролитах.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований состава, структуры и свойств электроэрозионной шихты, полученной электродиспергированием металлоотходов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 в дистиллированной воде и осветительном керосине, а также дана оценка производительности и выполнена оптимизация процесса электродиспергирования металлоотходов. Результаты предварительных исследований размерных характеристик частиц электроэрозионной шихты показали, что на ее дисперсность влияют электрические параметры работы установки. Для стабилизации дисперсности электроэрозионной шихты требуется проведение оптимизации процесса электродиспергирования металлоотходов металлов и сплавов. Для достижения оптимальной дисперсности электроэрозионной шихты использовалась постановка полного факторного эксперимента, в ходе которого установлены корреляционные зависимости дисперсного состава продуктов электродиспергирования металлоотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 от электрических характеристик (напряжения на электродах, емкости разрядных конденсаторов и частоты следования импульсов) самого процесса, позволяющие обеспечить требуемые для практического применения характеристики. Разработаны модели процесса электродиспергирования металлотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1, использование которых позволит управлять процессом получения шихты.

По производительности электродиспергирования металлоотходов экспериментально установлены следующие зависимости: квадратичная от напряжения на электродах в интервале до 200 В; прямо пропорциональная зависимость от емкости разрядных конденсаторов и от частоты следования импульсов. Полученные зависимости связаны со спецификой процесса и элементной базой установки. Отмечено также, что производительность процесса электродиспергирования металлоотходов в дистиллированной воде ниже производительности процесса в осветительном керосине в 1,3... 1,8 при одинаковых режимах получения электроэрозионных материалов, что связано с различием диэлектрической проницаемости сред, в которых происходит процесс электроэрозии и потерей энергии импульса на ее пробой.

Далее представлены результаты экспериментальных исследований состава, структуры и свойств диспергированных электроэрозией частиц металлоотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 в дистиллированной воде и осветительном керосине, полученные при оптимальных режимах. Результаты исследования формы и морфологии частиц электроэрозионной шихты представлены на рисунках 3 и 4.

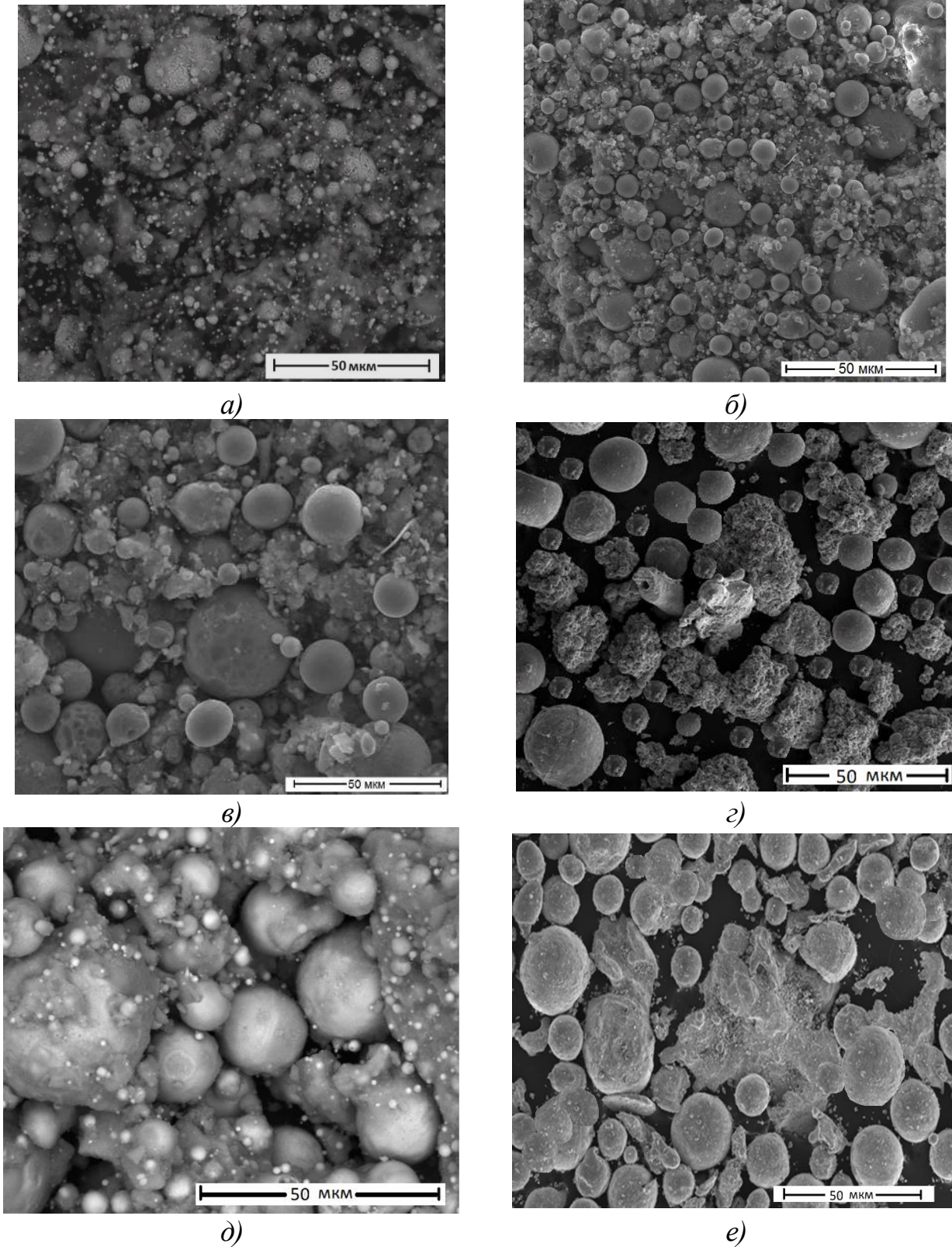
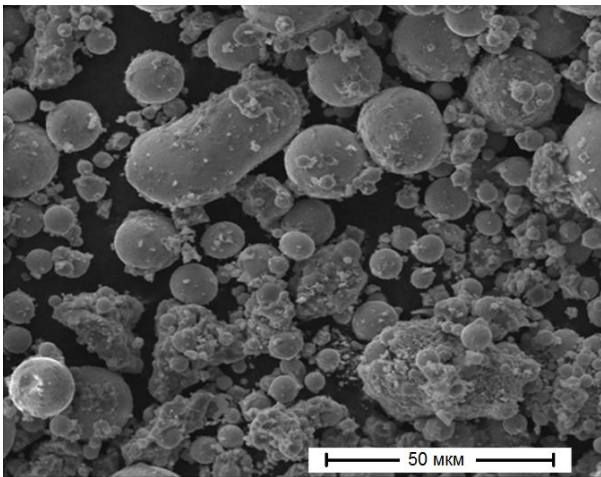
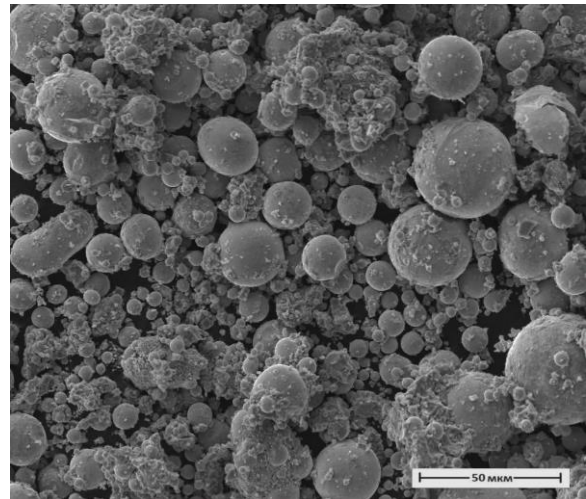


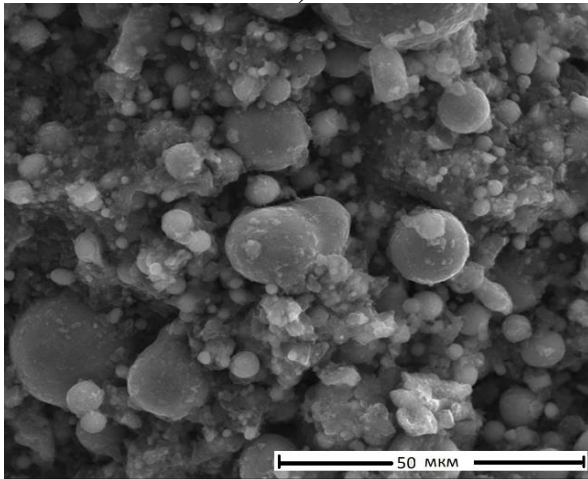
Рисунок 3 – Микрофотографии частиц электроэрозионной шихты, полученной в дистиллированной воде: а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; г) Х15Н60; д) АД0Е; е) М1 (растровый микроскоп QUANTA 600 FEG)



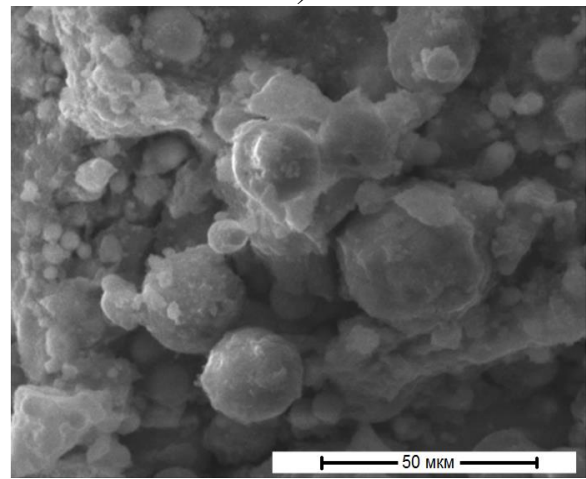
а)



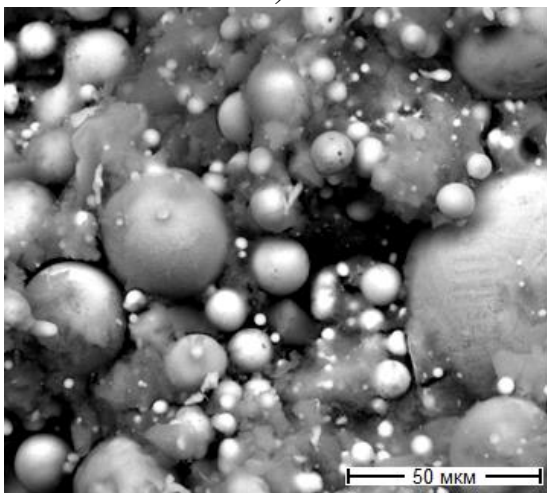
б)



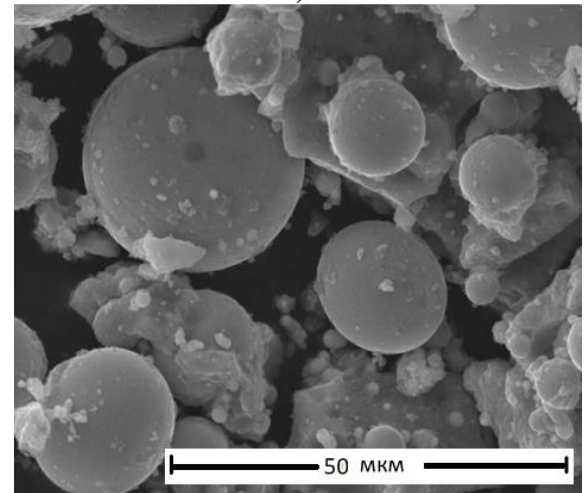
в)



г)



д)



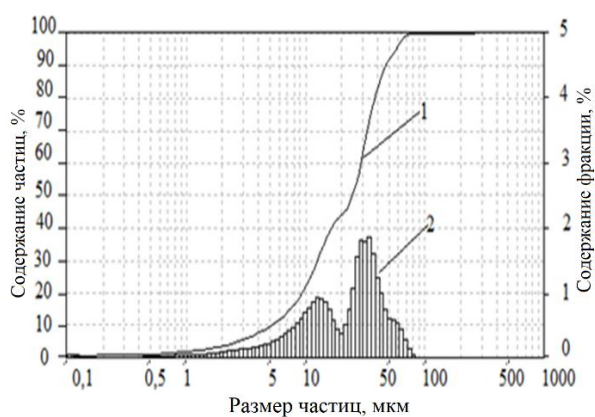
е)

Рисунок 4 – Микрофотографии частиц электроэрозионной шихты, полученной в осветительном керосине: а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; г) X15H60; д) АД0Е; е) М1 (растровый микроскоп QUANTA 600 FEG)

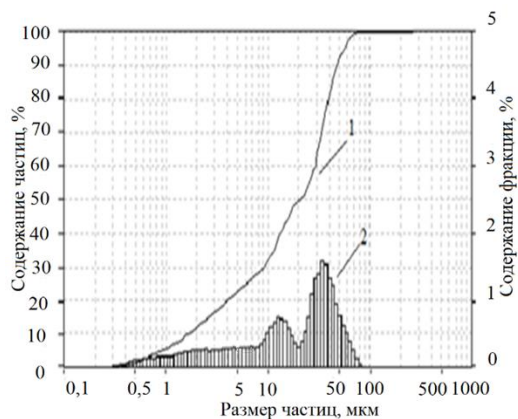
В процессе электродиспергирования частицы металлоотхода, которые выбрасываются из канала электрического разряда в расплавленном виде в реактор, заполненный рабочей жидкостью, очень быстро кристаллизуются. Процесс быстрой кристаллизации расплавленного материала в жидкой рабочей среде способствует приданию частицам формы сферы и эллипса.

Анализ параметров формы частиц электроэрозионной шихты с размером 25 ... 100 мкм по величине коэффициента элонгации (удлинения), который составляет 1,1 ... 1,6, и изображениям с растрового микроскопа говорит о том, что электроэрозионные частицы имеют сферическую и эллиптическую форму, а также образуются агломераты. После выхода из зоны разряда частицы расплавленного материала весьма часто сталкиваются между собой. Если в момент столкновения кристаллизация была полностью завершена, то на частицах остаются характерные следы от ударов и сетчатая поверхность. Если же разница температур столкнувшихся частиц не значительна, то происходит их слипание с образованием агломератов неправильных форм. Отмечено, что наличие мелкодисперсной фракции частиц электроэрозионной шихты с высокой удельной поверхностью, склонной к слипанию и образованию агломератов, препятствует ее текучести.

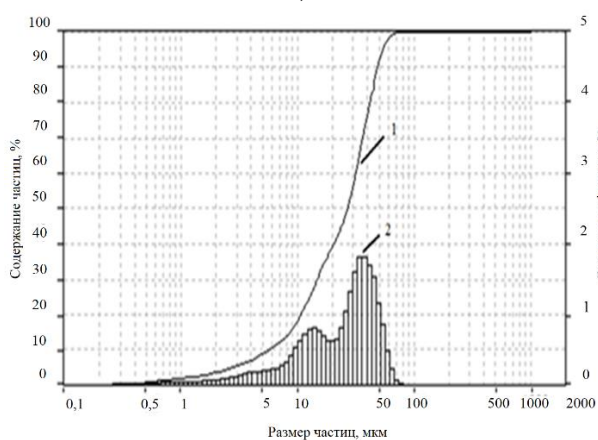
На рисунках 5 и 6 показан результат исследования гранулометрического состава частиц, полученных электродиспергированием металлоотходов в дистиллированной воде и осветительном керосине. Экспериментально установлено, что электроэрозионные частицы могут иметь размеры от 0,25 до 100 мкм. Показано, что средний размер частиц, полученных в керосине осветительном в 1,3...1,8 раза больше среднего размера частиц, полученных в воде дистиллированной. Это связано с большими потерями энергии электрического разряда на пробой рабочей жидкости ввиду разности диэлектрической проницаемости керосина (2,1) и воды (81,0), а также различием в охлаждающей способности жидкостей. Как показали результаты анализа элементного состава электроэрозионной шихты при диспергировании металлоотходов в кислородсодержащей жидкости (дистиллированной воде) на поверхности дисперсных частиц обнаруживается кислород, а в углеродсодержащей жидкости (керосине) – избыточный углерод. Анализ фазового состава электроэрозионной шихты показал, что электродиспергирование металлоотходов в кислородсодержащей жидкости (воде дистиллированной) способствует образованию оксидных фаз, таких как: WO_2 , Fe_2O_3 , Ni_2O_3 , Fe_3O_4 , MoO_3 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , Cu_2O и образованию фаз чистых металлов, таких как: W, Fe, Ni и Cr. В свою очередь, электродиспергирование металлоотходов в углеродсодержащей жидкости (керосине осветительном) способствует образованию карбидных фаз, таких как: WC, TiC, Ni_3C , Fe_3C , Mo_2C и Cr_3C_2 . Различие фазового состава электроэрозионной шихты связано с различием химического состава рабочих жидкостей, обеспечивающих поставку кислорода и (или) углерода в реакционную зону – зону расплава.



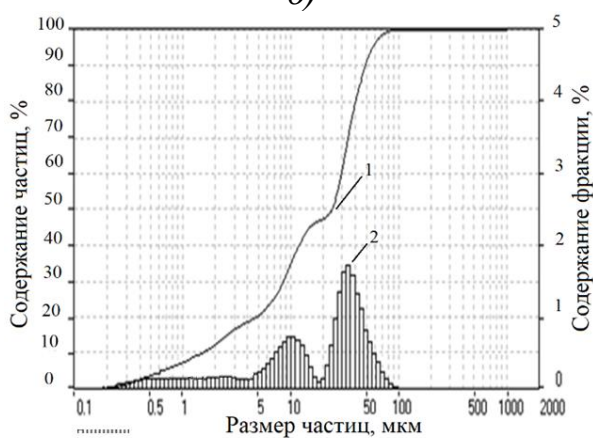
а)



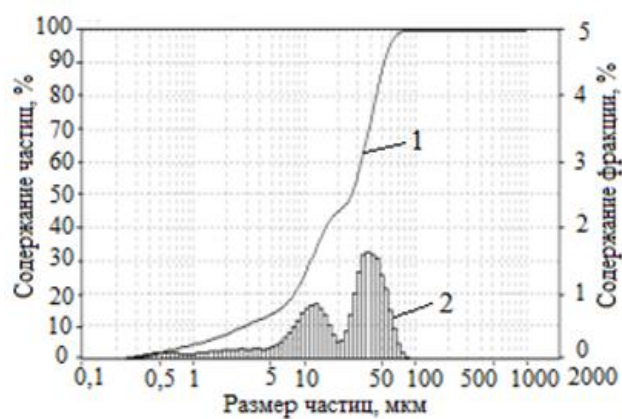
б)



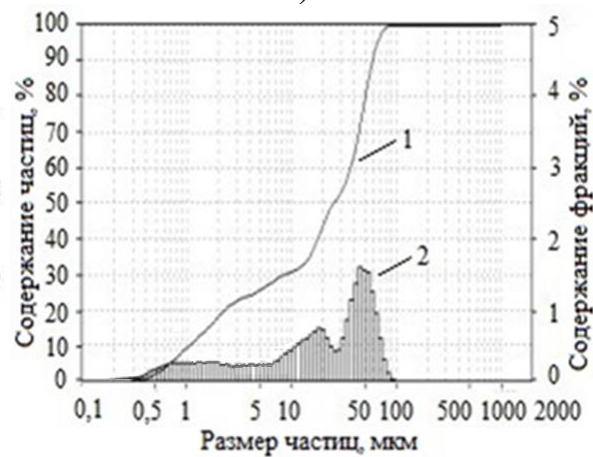
в)



г)

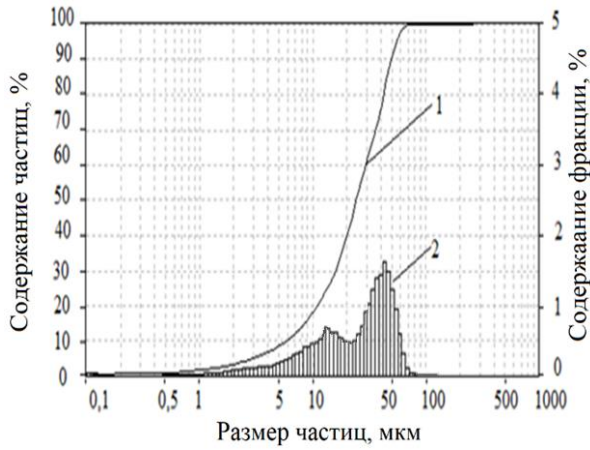


д)

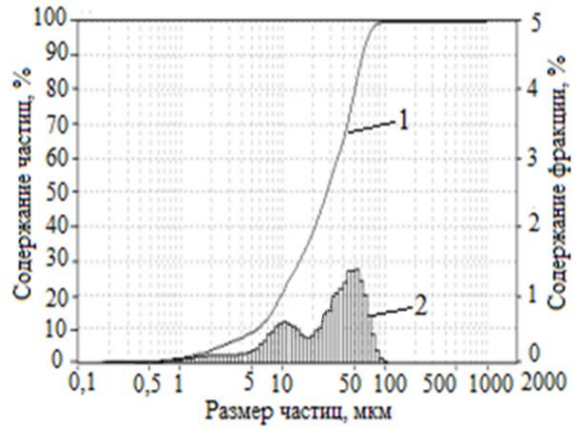


е)

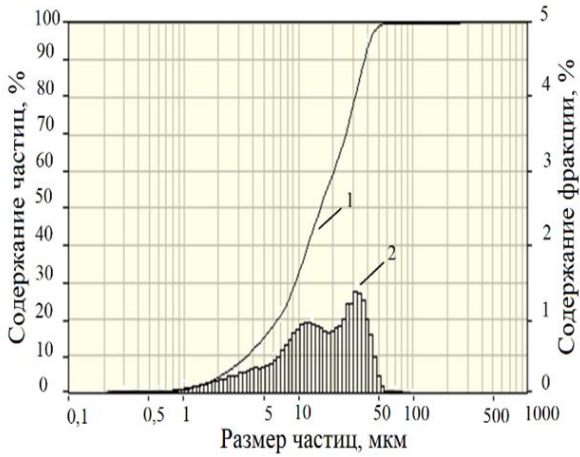
Рисунок 5 – Интегральная кривая (1) и гистограмма (2) распределения по размерам частиц электроэрозионной шихты, полученной в дистиллированной воде: а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; г) X15H60; д) АД0Е; е) М1



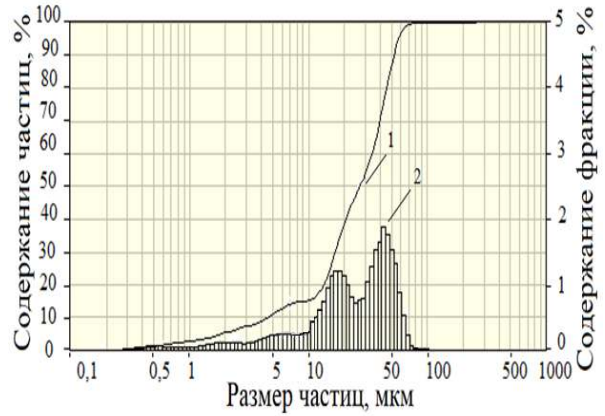
а)



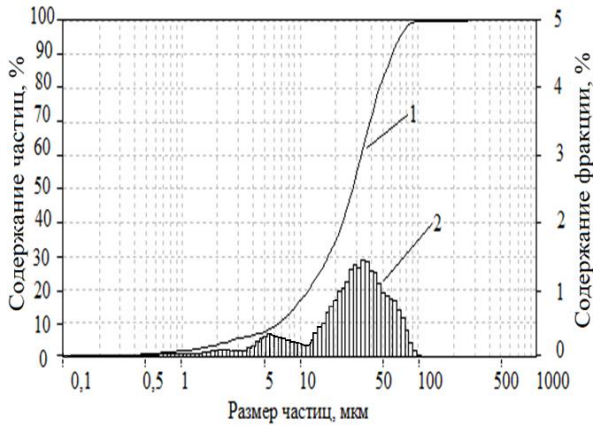
б)



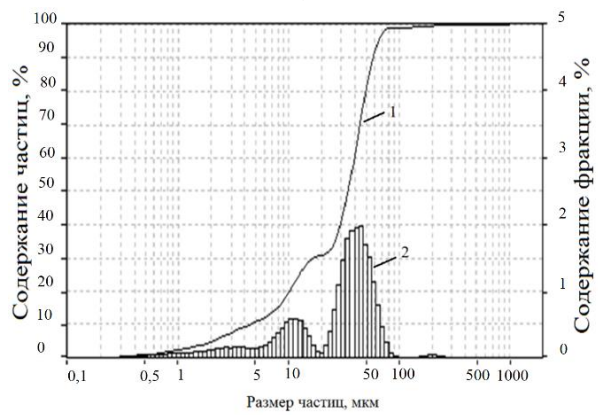
в)



г)



д)



е)

Рисунок 6 – Интегральная кривая (1) и гистограмма (2) распределения по размерам частиц электроэрозионной шихты, полученной в осветительном керосине: а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; г) X15H60; д) АД0Е; е) М1

В пятой главе представлены результаты получения новых многофункциональных сплавов искровым плазменным сплавлением шихты из диспергированных электроэрозией отходов металлов и сплавов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1. Помимо того, представлены результаты оптимизации процесса получения новых многофункциональных сплавов и аттестации их состава, структуры и свойств с использованием современных взаимодополняющих методов физического материаловедения.

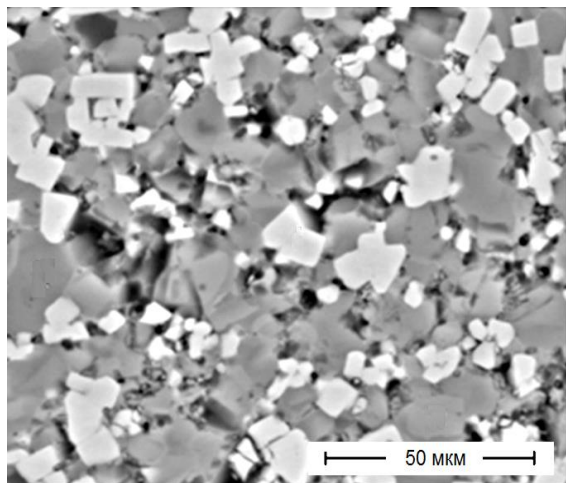
Результаты предварительных исследований показали влияние технологических параметров процесса сплавления (температуры, давления и времени выдержки) на структуру и свойства полученных сплавов. Поскольку для практического применения функциональных сплавов требуются регламентированные свойства, то требуется их управляемость.

Из свойств, лимитирующих ресурс многофункциональных сплавов, технологически просто и информативно определяется твердость, поэтому оптимизацию процесса получения сплавов проводили по данному параметру путем проведения полного факторного эксперимента, который позволил разработать модели получения новых многофункциональных сплавов искровым плазменным сплавлением электроэрозионной шихты.

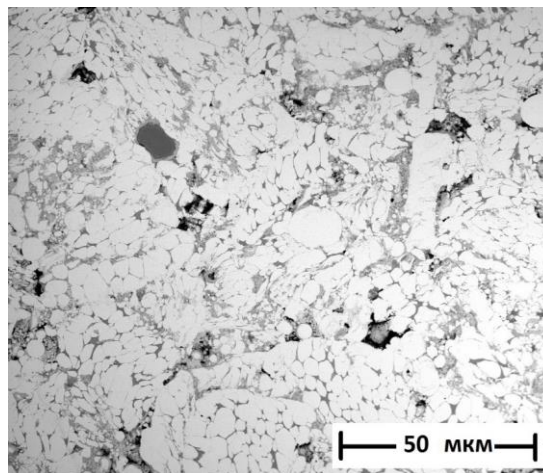
Далее представлены результаты экспериментальных исследований состава, структуры и свойств новых многофункциональных сплавов на основе шихты из диспергированных электроэрозией частиц, полученных при оптимальных режимах сплавления.

Анализ микроструктур многофункциональных сплавов показал, что новые сплавы имеют мелкозернистое строение, без включений, равномерное распределение фаз и отсутствие значительных пор, трещин и несплошностей (рисунки 7 и 8). На основе анализа спектрограмм элементного состава установлено, что в функциональных сплавах из кислородсодержащей шихты содержится кислород, а в сплавах из углеродсодержащей шихты – углерод, а все остальные элементы распределены относительно равномерно (рисунки 9 и 10). Анализ дифрактограмм фазового состава исследуемых сплавов показал наличие в них незначительного количества оксидных фаз: WO_2 , Fe_2O_3 , Ni_2O_3 , Fe_3O_4 , MoO_3 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 и Cu_2O и фаз чистых металлов: W, Fe, Ni и Cr в сплавах из электроэрозионной шихты, полученной в дистиллированной воде. Также отмечено наличие карбидных фаз: WC, TiC, Ni_3C , Fe_3C , Mo_2C и Cr_3C_2 в сплавах из электроэрозионной шихты, полученной в керосине осветительном (рисунки 11 и 12). Различие фазового состава исследуемых сплавов связано с различием фазового состава исходной электроэрозионной шихты.

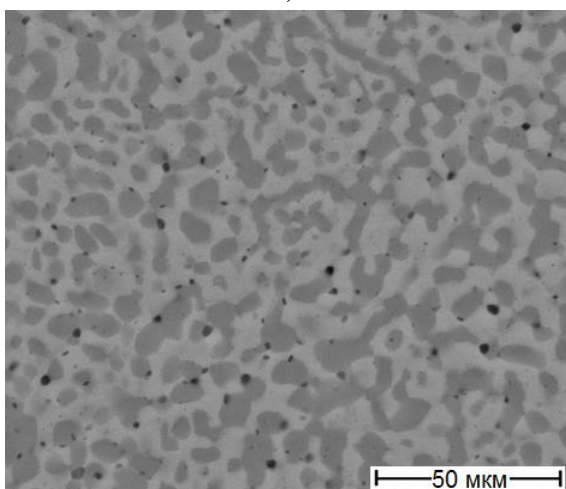
Основные характеристики функциональных сплавов из электроэрозионной шихты представлены в таблице 1. Экспериментально установлено, что новые функциональные сплавы, полученные искровым плазменным сплавлением электроэрозионной шихты, имеют размер зерна порядка 0,22 ... 0,93 мкм.



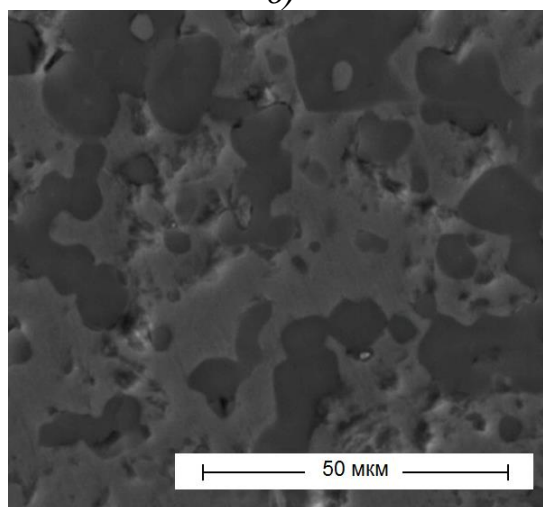
а)



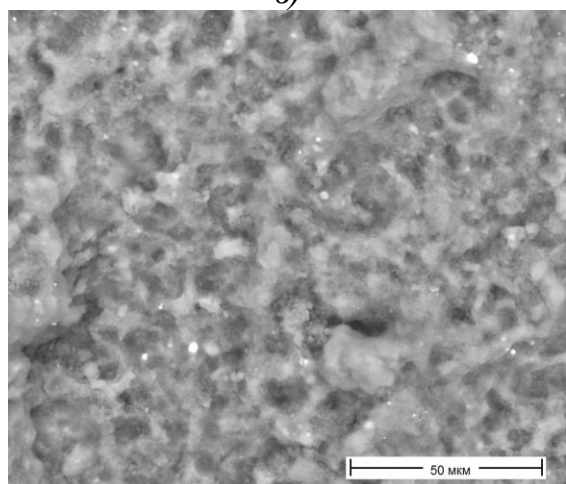
б)



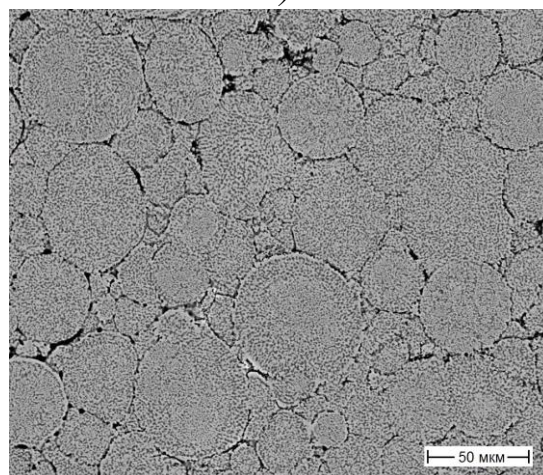
в)



г)



д)



е)

Рисунок 7 – Микроструктура функциональных сплавов из электроэрозионной шихты, полученной в дистиллированной воде:
а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; г) X15Н60; д) АД0Е; е) М1

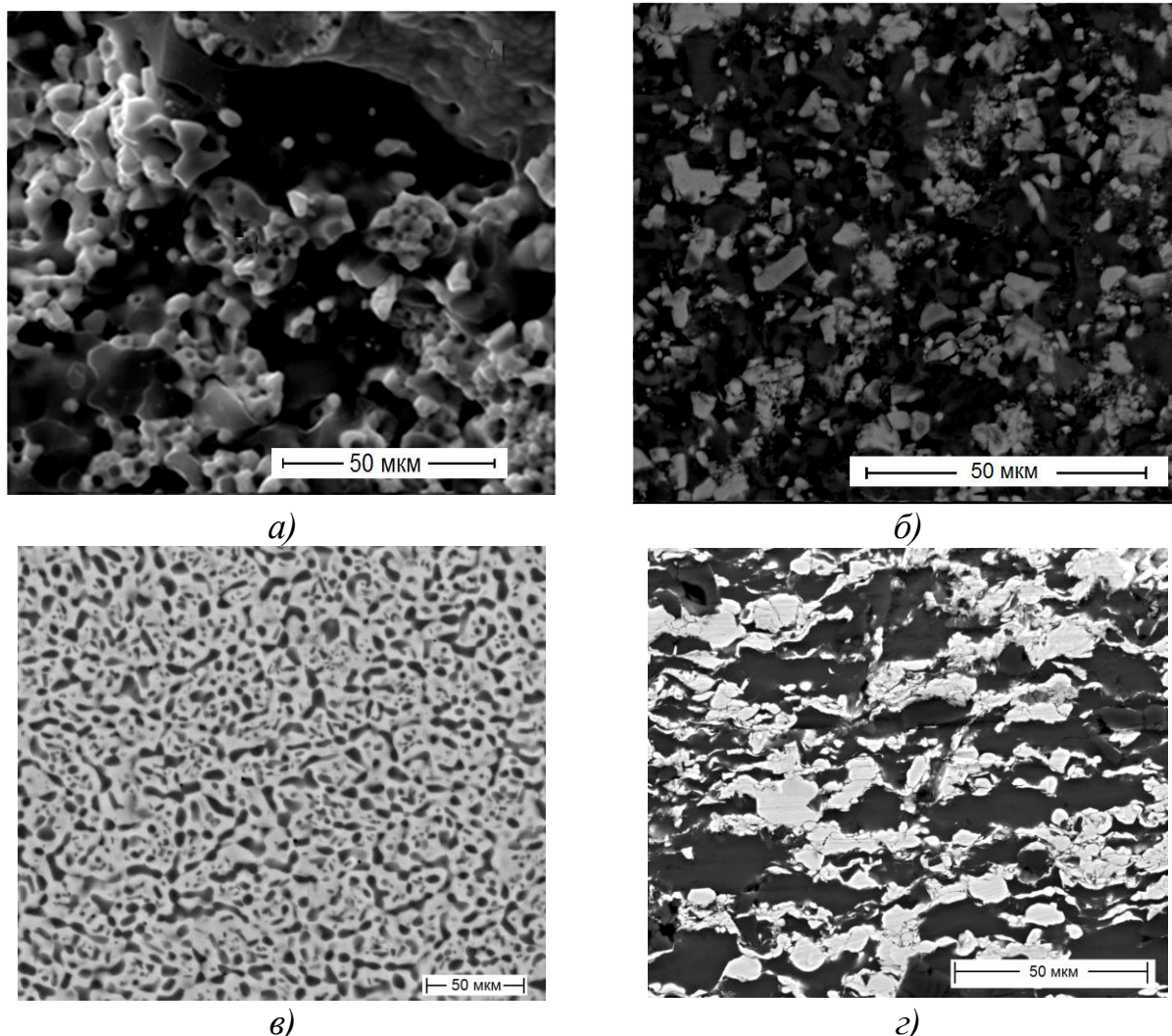


Рисунок 8 – Микроструктура функциональных сплавов из электроэрозионной шихты, полученной в осветительном керосине:
 а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; з) Х15Н60

Мелкодисперсность функциональных сплавов объясняется высокой дисперсностью исходной электроэрозионной шихты и эффектом «подавления роста зерна» при искровом плазменном сплавлении за счет короткого времени рабочего цикла, высокого давления и равномерного распределения тепла по образцу при воздействии на него импульсного электрического тока и так называемого «эффекта плазмы искрового разряда». Отмечено также, что сплавы, полученные из электроэрозионной шихты, изготовленной в керосине, обладают меньшим размером зерна по сравнению со сплавами, полученными из шихты, изготовленной в воде. Данное различие обусловлено различием фазового состава исходной шихты.

Так, электроэрозионная шихта, полученная в керосине, состоит из высокотемпературных карбидных фаз, таких как WC , TiC , Mo_2C , Fe_3C и др., в то время, как электроэрозионная шихта, полученная в воде, состоит из относительно легкоплавких оксидных фаз таких, как WO_2 , Ni_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и фаз чистых металлов W , Fe , Ni , Cr и др.

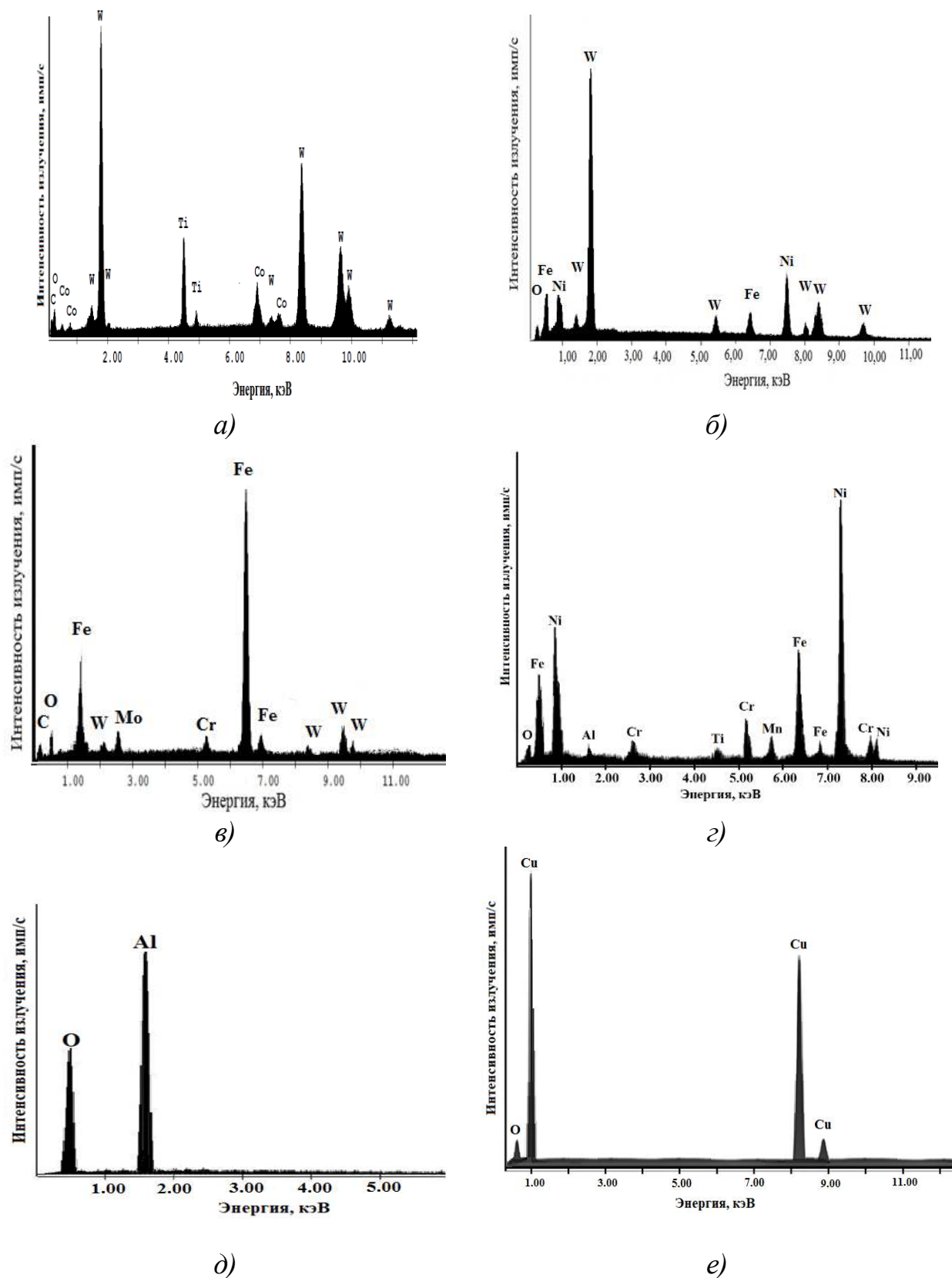


Рисунок 9 – Спектрограммы элементного состава функциональных сплавов из электроэрозионной шихты, полученной в дистиллированной воде:
 а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; г) X15Н60; д) АД0Е; е) М1

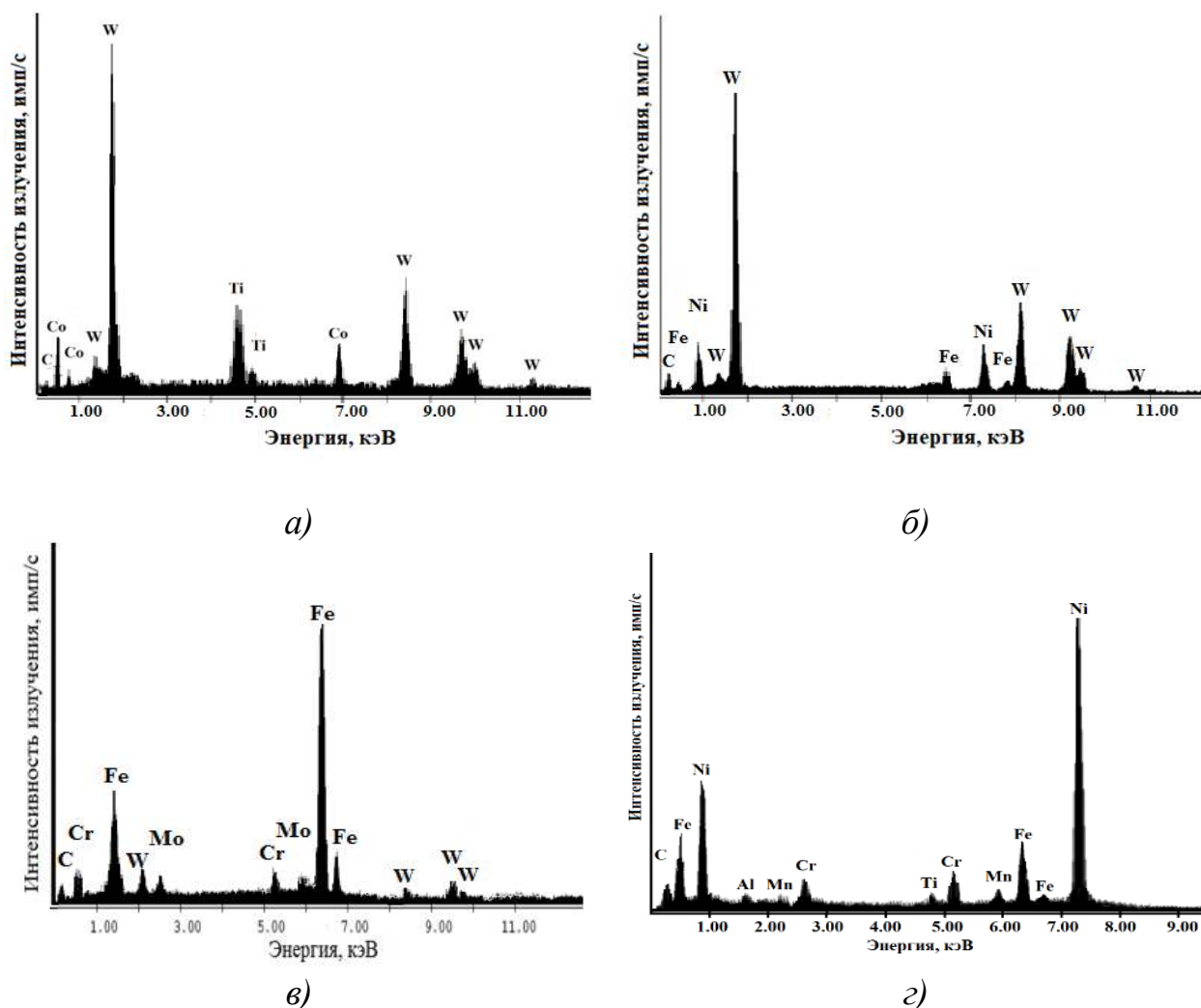
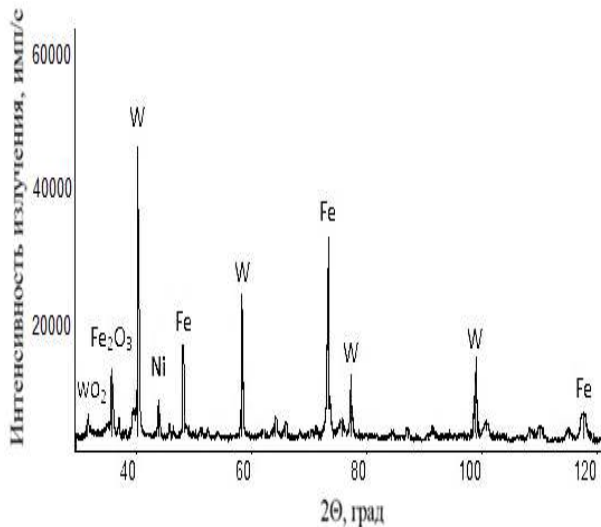
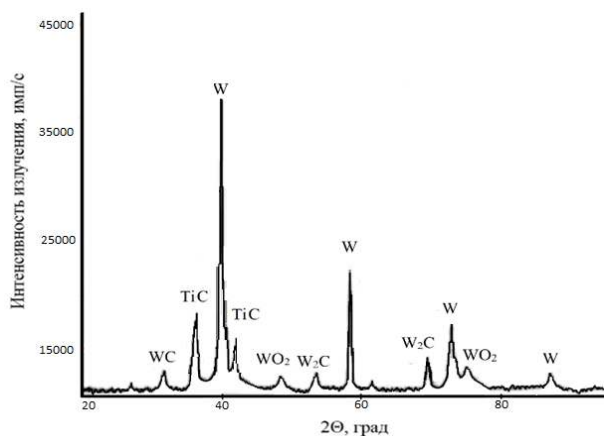


Рисунок 10 – Спектрограммы элементного состава функциональных сплавов из электроэрозионной шихты, полученной в осветительном керосине:
 а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; г) Х15Н60

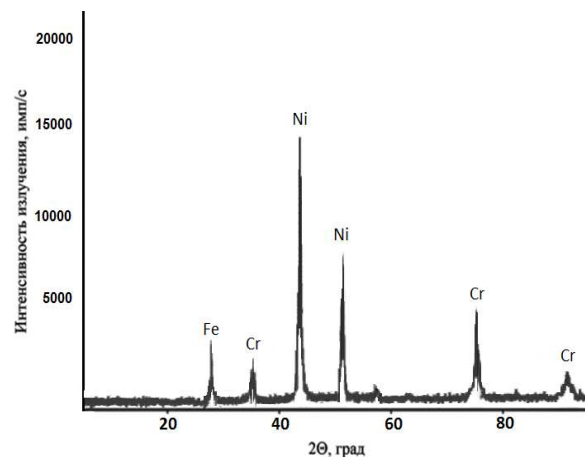
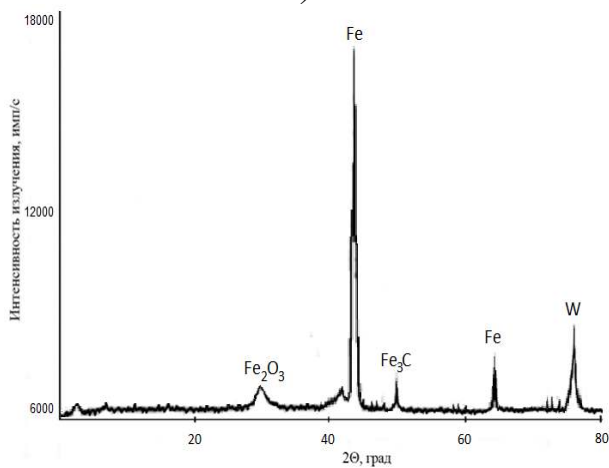
Отмечено, что полученные сплавы обладают более высокой микротвердостью по сравнению с аналогичными промышленными сплавами. Данный эффект достигается при искровом плазменном сплавлении диспергированных электроэрозией частиц практически беспористой структурой и наличием высокотвердых фазовых составляющих. Экспериментально установлено, что наличие карбидов в шихте, полученной в керосине, способствует повышению микротвердости сплавов.

Установлено, что новые функциональные сплавы имеют более высокую твердость по сравнению с аналогичными промышленными. Данный эффект достигается при искровом плазменном сплавлении электроэрозионной шихты с мелким размером зерна, высокой микротвердостью, практически беспористой и бездефектной структурой и фазовым составом. Экспериментально установлено, что наличие карбидов в шихте, полученной в керосине, способствует повышению твердости сплавов. Отмечено также, что наличие в сплаве АД0Е фазы Al_2O_3 также способствует увеличению его твердости.



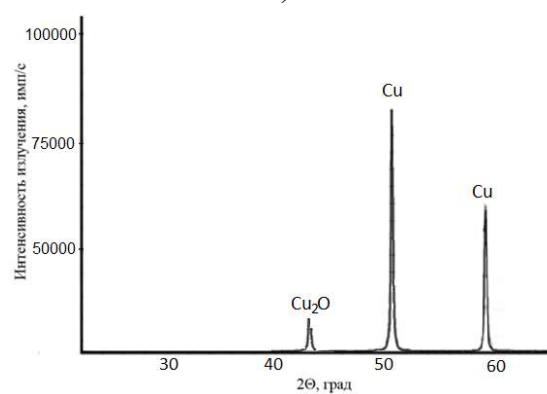
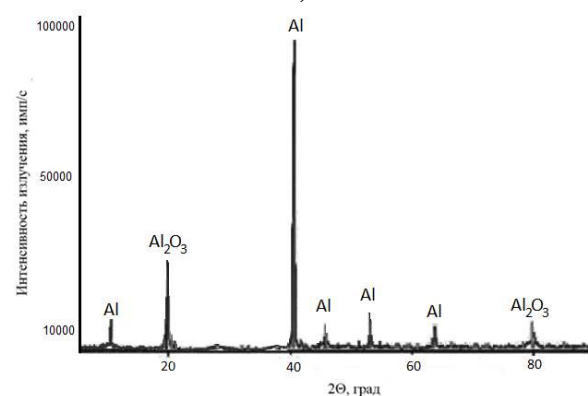
а)

б)



в)

г)



д)

е)

Рисунок 11 – Дифрактограммы фазового состава функциональных сплавов из электроэрозионной шихты, полученной в дистиллированной воде:

а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; г) Х15Н60; д) АД0Е; е) М1

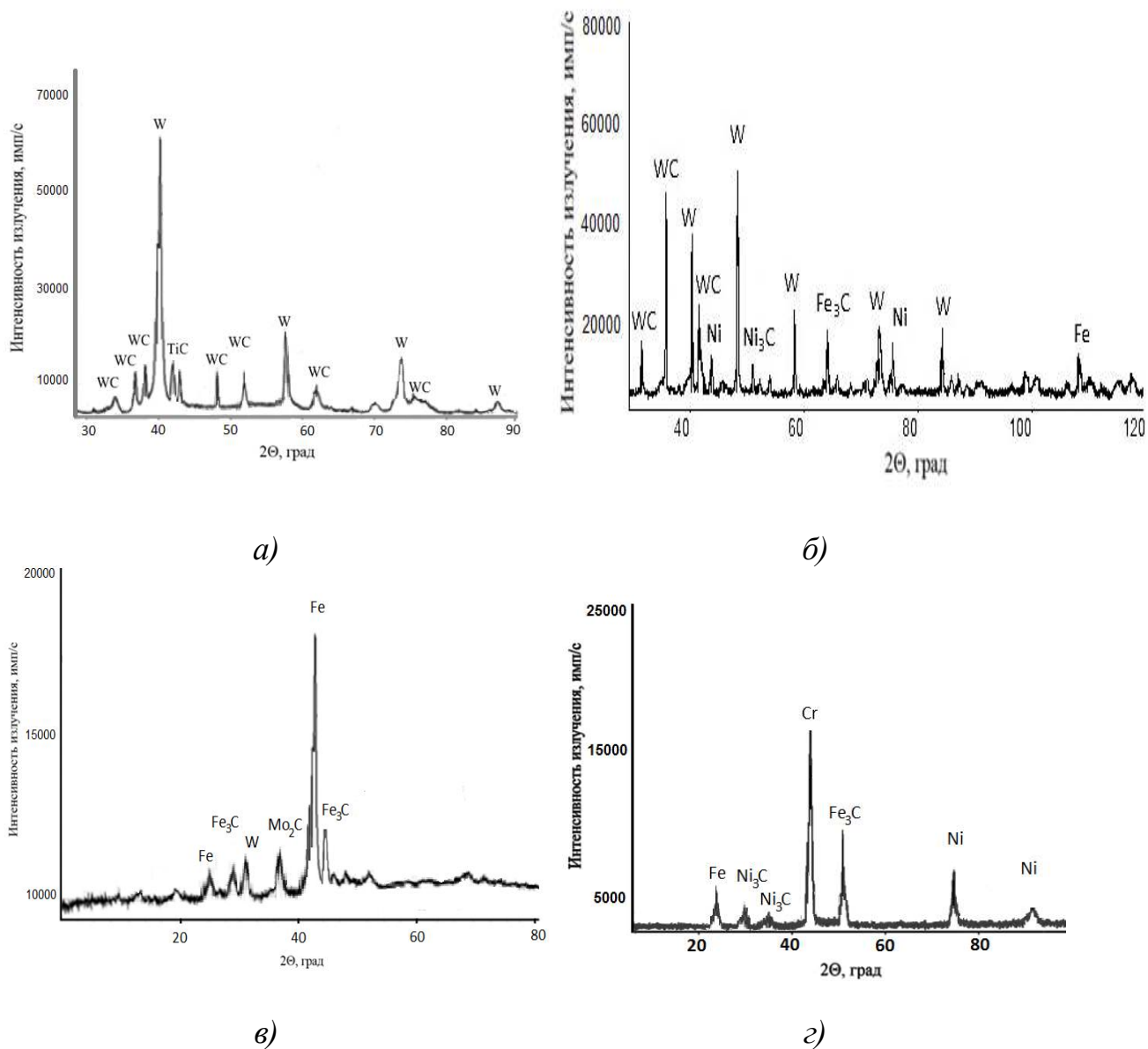


Рисунок 12 – Дифрактограммы фазового состава функциональных сплавов из электроэрозионной шихты, полученной в осветительном керосине:
 а) Т30К4; б) ВНЖ95; в) Р6М5; з) Х15Н60

Экспериментально установлено, что новые функциональные сплавы, полученные искровым плазменным сплавлением электроэрозионной шихты, обладают более высоким пределом прочности по сравнению с промышленными сплавами. Повышению прочности новых сплавов способствует высокая дисперсность и сферическая форма частиц, а также относительно мелкий размер зерна и беспористая бездефектная структура.

Отмечено также, что сплавы, полученные из электроэрозионной шихты, изготовленной в керосине, обладают большим пределом прочности при изгибе по сравнению со сплавами, полученными из шихты, изготовленной в воде. Данное различие обусловлено меньшим размером зерна, при этом различия в величине пористости исследуемых сплавов, полученных в разных рабочих жидкостях, незначительны и практически не отражаются на пределе прочности.

Таблица 1 – Основные характеристики функциональных сплавов из электроэрозионной шихты

Исследуемый параметр	Марка сплава									
	Т30К4		ВНЖ95		Р6М5		Х15Н60		АД0Е	М1
	В	К	В	К	В	К	В	К	В	В
Плотность, г/см ³	<u>11,2</u> 9,8	<u>12,4</u> 9,8	<u>19,1</u> 17,6	<u>18,6</u> 17,6	<u>8,4</u> 8,6	<u>8,6</u> 8,6	<u>8,4</u> 8,2	<u>8,5</u> 8,2	<u>2,8</u> 2,7	<u>9,1</u> 8,9
Размер зерна, мкм	<u>0,54</u> 2,0	<u>0,31</u> 2,0	<u>0,36</u> 3,0	<u>0,22</u> 3,0	<u>0,45</u> 4,0	<u>0,32</u> 4,0	<u>0,45</u> 3,5	<u>0,32</u> 3,5	<u>0,25</u> 4,0	<u>0,93</u> 4,0
Пористость, %	<u>0,32</u> 1,0	<u>0,64</u> 1,0	<u>0,41</u> 1,0	<u>0,88</u> 1,0	<u>0,52</u> 1,0	<u>0,78</u> 1,0	<u>0,48</u> 1,0	<u>0,84</u> 1,0	<u>0,46</u> 1,0	<u>0,57</u> 1,0
Микротвердость HV, МПа	<u>4316</u> 3400	<u>4729</u> 3400	<u>2898</u> 2780	<u>3449</u> 2780	<u>1540</u> 1220	<u>2449</u> 1220	<u>1540</u> 867	<u>2449</u> 867	<u>1340</u> 95	<u>156</u> 112
Твердость, МПа	<u>94HRA</u> <u>92HRA</u>	<u>95HRA</u> <u>92HRA</u>	<u>30HRC</u> <u>29HRC</u>	<u>36HRC</u> <u>29HRC</u>	<u>265HB</u> <u>255HB</u>	<u>269HB</u> <u>255HB</u>	<u>152HB</u> <u>150HB</u>	<u>164HB</u> <u>150HB</u>	<u>227HB</u> <u>30HB</u>	<u>95HB</u> <u>37HB</u>
Предел прочности при сжатии, МПа	<u>8156</u> 6000	<u>9284</u> 6000	<u>5968</u> 4500	<u>6342</u> 4500	<u>4228</u> 3750	<u>5912</u> 3750	<u>4093</u> 3500	<u>5324</u> 3500	<u>3720</u> 2900	<u>4200</u> 3500
Предел прочности при изгибе, МПа	<u>2893</u> 2300	<u>3876</u> 2300	<u>1368</u> 1000	<u>2342</u> 1000	<u>3228</u> 3000	<u>4912</u> 3000	<u>3193</u> 2600	<u>4324</u> 2600	<u>720</u> 600	<u>1540</u> 800
Объемный износ, мм ³ ×10 ⁻⁵	<u>0,328</u> 0,885	<u>0,243</u> 0,885	<u>1,026</u> 1,255	<u>0,872</u> 1,255	<u>0,956</u> 1,448	<u>0,828</u> 1,448	<u>1,286</u> 1,788	<u>1,076</u> 1,788	<u>0,321</u> 5,343	<u>0,624</u> 4,326
Функциональное назначение	Режущий инструмент для обработки металлов и сплавов, электроды для электроискрового легирования, КТП		Детали с высокой плотностью и температурой плавления		Режущий инструмент для обработки металлов и сплавов, упрочняющая фаза гальванических электрохимических покрытий		Нагревательные элементы, работающие в условиях интенсивной нагрузки и повышенных температур		Шлифинструмент	Детали электротехнического назначения, КТП

Примечание: В – вода дистиллированная; К – керосин осветительный. В знаменателе представлены значения параметров промышленных металлов и сплавов.

Экспериментально установлено, что новые функциональные сплавы имеют меньший объемный износ по сравнению с промышленными сплавами. Повышению износостойкости функциональных сплавов, полученных искровым плазменным сплавлением электроэрозионной шихты, способствует высокая микротвердость, твердость, а также относительно мелкий размер зерна и беспористая бездефектная структура.

Исследование коэффициента трения поверхности образцов исследуемых сплавов после многократных проходов показало, что его величина на пути трения 500 м составляет от 0,38 до 0,92. Отмечено также, что сплавы, полученные из шихты, изготовленной в керосине, обладают меньшими значениями коэффициента трения по

сравнению со сплавами, полученными из шихты, изготовленной в воде. Данное различие обусловлено наличием свободного углерода в сплавах, полученных из шихты, изготовленной в керосине.

В шестой главе представлена совокупность результатов экспериментальных исследований состава, структуры и свойств функциональных электрохимических покрытий с добавлением электроэрозионной шихты, полученной из металлоотходов марок Т30К4 и М1 в дистиллированной воде.

Результаты предварительных исследований показали влияние технологических параметров электроосаждения (времени осаждения, концентрации электроэрозионных частиц в электролите-суспензии и плотности тока) электроэрозионных частиц на состав, структуру и свойства полученных композиционных электрохимических покрытий.

Из свойств, лимитирующих ресурс функциональных покрытий, технологически просто и информативно определяется микротвердость, поэтому оптимизацию процесса осаждения электроэрозионных частиц проводили по данному параметру путем проведения полного факторного эксперимента. В результате были получены уравнения регрессии, моделирующее полный факторный эксперимент, а также определены предельные значения параметра оптимизации: для железнения с Т30К4 – 0,726 ГПа при плотности тока 20 А/дм², времени осаждения 60 минут и концентрации 5 г/л; для меднения с электроэрозионными частицами Си – 0,228 ГПа при плотности тока 10 А/дм², времени осаждения 2,5 минуты и концентрации 0,05 г/л. Далее представлены результаты исследования состава, структуры и свойств функциональных покрытий, полученных при оптимальных режимах.

Анализ микроструктур поперечных шлифов образцов с композиционными электрохимическими покрытиями с добавлением электроэрозионной шихты (М1 и Т30К4), полученной в воде дистиллированной, показал, что покрытия не имеют видимых дефектов на границе «покрытие – подложка», имеют плотную беспористую структуру, а также имеет место равномерное заполнение пор подложки композиционным покрытием с добавлением электроэрозионных частиц, что связано с наличием мелких фракций частиц электроэрозионной шихты в электролите-суспензии (рисунок 13). На основе анализа спектрограмм элементного состава композиционных электрохимических покрытий с добавлением электроэрозионных частиц Т30К4 установлено, что в данных покрытиях основными элементами являются Fe, W, Ti, Co и небольшое количество C и O. Также экспериментально установлено, что в композиционных электрохимических покрытиях на основе электролита-суспензии меди с добавлением электроэрозионных частиц Си основными элементами являются Си и O. На основе анализа дифрактограмм фазового состава композиционных электрохимических покрытий с добавлением электроэрозионных частиц Т30К4 установлено, что в данных покрытиях основными фазами являются Fe, W₂C, WO₂, TiC и W. Также экспериментально установлено, что в композиционных электрохимических покрытиях на основе электролита-суспензии меди с добавлением электроэрозионных частиц Си основными фазами являются Си и Си₂O.

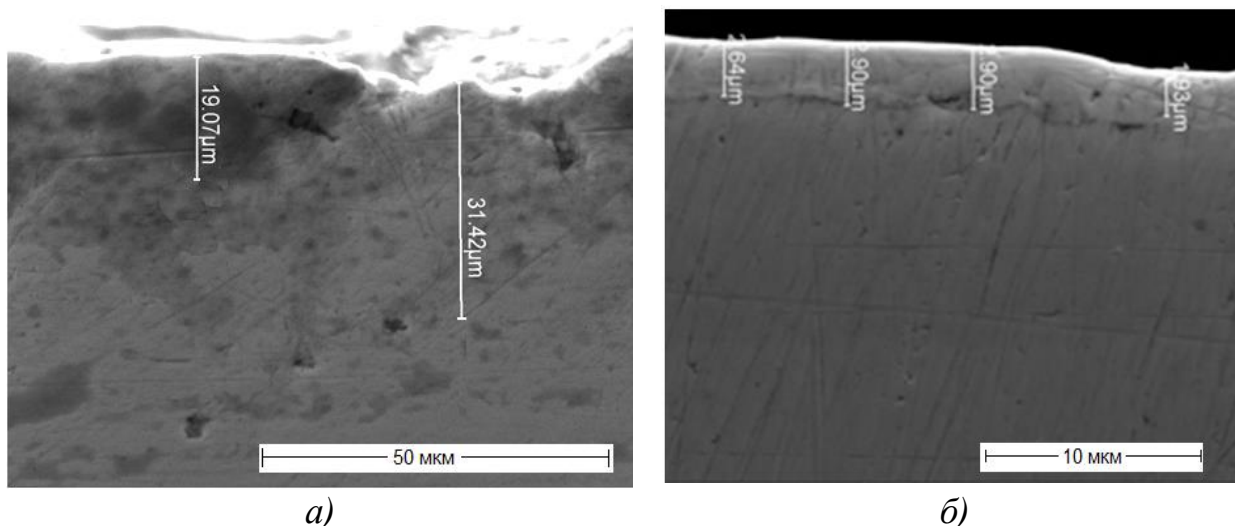


Рисунок 13 – Микроструктура КЭП с добавлением электроэрозионной шихты: а) Т30К4; б) М1

На основе анализа зависимостей изменения акустической эмиссии и коэффициента трения от приложенной нагрузки на композиционные электрохимические покрытия с добавлением электроэрозионных частиц как Т30К4, так и М1 установлено, что отслаивания и разрушения покрытия не происходит. Адгезионная прочность композиционных электрохимических покрытий с добавлением электроэрозионной шихты выше 190 Н. Отмечено, что добавление электроэрозионных частиц в электролит как железнения, так и меднения приводит к увеличению микротвердости покрытий в среднем на 32%, что связано с наличием в электролите-сuspензии высокотвердых частиц, образующихся при закалке паров металла в рабочей жидкости при диспергировании. Изменения значений коэффициентов трения поверхностей композиционных электрохимических покрытий с добавлением электроэрозионной шихты связаны с наличием высокотвердых фаз в их составе, таких как: W_2C , WO_2 , TiC и Cu_2O . Отмечено, что введение высокотвердых частиц электроэрозионной шихты в электролит способствует повышению износостойкости композиционных электрохимических покрытий. Установлено, что параметр шероховатости поверхности Ra композиционных электрохимических покрытий на основе электролита-сuspензии железа с добавлением электроэрозионных частиц Т30К4 составляет 2,14 мкм, а для покрытий на основе электролита-сuspензии меди с добавлением электроэрозионных частиц Cu – 0,73 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, связанные с получением новых многофункциональных сплавов и покрытий, полученных на основе шихты, изготовленной электродиспергированием в кислород- и углеродсодержащих рабочих жидкостях легковесных металлоотходов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1, внедрение которых вносит значительный вклад в металловедение сплавов и в металлургию легковесных металлоотходов в целом.

1. Установлены механизмы структурообразования частиц сплавов в процессе электроэрозионной металлургии металлоотходов сплавов (Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1). С использованием электроконтактной теории объяснено наличие двух экстремумов наиболее вероятных размеров частиц в экспериментально определенном фракционном составе: мелкая фракция (0,25 ... 25,0 мкм) образуется за счет конденсации паровой фазы и крупная фракция (25,0 ... 100 мкм) образуется за счет конденсации жидкой фазы. Отмечено, что соотношение объемов, образуемых при диспергировании паровой и жидкой фаз, определяется теплофизическими свойствами диспергируемого материала. Установлена зависимость, показывающая, что средний размер диспергируемых частиц увеличивается с повышением энергии импульса. Получены зависимости, позволяющие выполнить расчетную оценку фракционного состава диспергируемого материала, получаемого в условиях действия электроконтактных тепловых источников.

2. Установлены корреляционные зависимости дисперсного, элементного и фазового составов продуктов электродиспергирования сплавов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 от состава и свойств рабочей жидкости, позволяющие управлять их свойствами. В частности, экспериментально установлено, что на элементный и фазовый составы продуктов электродиспергирования легированных сплавов оказывает влияние химический состав рабочей жидкости, а на гранулометрический состав – диэлектрическая проницаемость. При этом показано, что электродиспергирование металлоотходов в кислородсодержащей жидкости приводит к наличию кислорода на поверхности частиц и потере углерода вплоть до появления в них чистых металлов Cu, Ni, Cr, W, Fe в результате диссоциации оксидов, а электродиспергирование в углеродсодержащей жидкости приводит к наличию углерода и образованию фаз карбидов, таких как WC, TiC, Ni₃C, Fe₃C, Mo₂C и Cr₃C₂ в результате взаимодействия углерода с расплавленным металлом при температурах, соответствующих той или иной модификации карбидов. Показано также, что с повышением диэлектрической проницаемости рабочей среды средний размер частиц диспергируемого материала уменьшается. Это связано с потерями энергии электрического разряда на пробой рабочей жидкости ввиду большой разности диэлектрической проницаемости воды и керосина, а также различием в охлаждающей способности этих жидкостей.

3. Найдены закономерности влияния технологии электродиспергирования легированных сплавов на частицы металлоотходов сплавов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 с установлением взаимосвязи между составляющими системы «состав – структура – технология электродиспергирования – свойства». Разработаны модели процесса электродиспергирования металлоотходов сплавов марок Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1, использование которых позволит управлять процессом получения диспергированных частиц. Установлены корреляционные зависимости дисперсного состава продуктов электродиспергирования сплавов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 от энергетических характеристик (напряжения на электродах, емкости разрядных конденсаторов и частоты следования импульсов) самого процесса электродиспергирования, позволяющие обеспечить требуемые для практического применения характеристики.

4. Установлена зависимость состава, структуры и свойств новых легированных сплавов от состава, структуры и свойств шихты из диспергированных электроэрозией частиц металлоотходов сплавов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1, позволяющая оказывать влияние на их физико-механические свойства. Разработаны модели процессов получения

новых легированных сплавов искровым плазменным сплавлением из полученных металлопорошковых композиций, использование которых позволит управлять процессом сплавления с целью повышения физико-механических и эксплуатационных свойств новых легированных сплавов. Отмечено, что состав, структура и свойства диспергированных электроэрозией частиц легированных сплавов (Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1), зависящие от состава и свойств рабочей среды влияют в том числе и на пористость и размер зерна легированных сплавов, а они в свою очередь на их физико-механические свойства, такие как микротвердость, износостойкость, предел прочности при сжатии и изгибе и др.

5. Показано влияние технологии производства легированных сплавов из диспергированных электроэрозией частиц металлоотходов сплавов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1 на их свойства, позволяющая управлять качеством изделий. Научно обоснована и апробирована новая технология синтеза легированных электроэрозионных частиц сплавов Т30К4, ВНЖ95, Р6М5, Х15Н60, АД0Е, М1, с установлением взаимосвязи между составляющими системы «состав – структура – технология искрового плазменного сплавления – свойства».

6. Установлена зависимость состава, структуры и свойств функциональных покрытий от состава, структуры и свойств диспергированных частиц из металлоотходов марок Т30К4 и М1, позволяющая оказывать влияние на их физико-механические свойства. Разработаны модели процессов получения функциональных покрытий, использование которых позволит управлять их физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

7. Разработаны и запатентованы новые технические и технологические решения, включающие способы получения: титано-вольфрамо-кобальтовых частиц электродиспергированием отходов сплава Т30К4; вольфрамо-никелевых частиц электродиспергированием отходов псевдосплава ВНЖ95; металлических наночастиц из металлоотходов быстрорежущей стали Р6М5; нихромовых частиц электроэрозионным диспергированием отходов сплава Х15Н60; металлических наночастиц меди из отходов меди марки М1; медных частиц из металлоотходов электротехнической медной проволоки; алюминиевых частиц электродиспергированием отходов АД0Е; заготовок вольфрамо-титанового твердого сплава, на основе частиц, изготовленных электродиспергированием отходов твердых сплавов; шихты для производства вольфрамо-титановых твердых сплавов на основе электроэрозионных частиц карбида вольфрама и карбида титана; быстрорежущей стали на основе частиц, изготовленных электродиспергированием быстрорежущей стали Р6М5; медных гальванических покрытий, модифицированных наночастицами электроэрозионной меди; шихты для использования в композициях для плазменно-порошковой наплавки износостойких покрытий на детали машин на основе электроэрозионных частиц карбида вольфрама и карбид титана; шихты электродного материала для электроискрового легирования деталей машин на основе электроэрозионных частиц карбида вольфрама и карбид титана; мелкокристаллического корунда на основе частиц, изготовленных электродиспергированием отходов электротехнической алюминиевой проволоки; вольфрамсодержащих сплавов на основе частиц, изготовленных электродиспергированием отходов стали Р6М5 и твердого сплава; алюмосодержащих частиц для газодинамического напыления дефектных головок блоков цилиндров, изготовленных электродиспергированием отходов АД0Е.

8. Разработанные технологии и новые легированные функциональные сплавы апробированы и внедрены в: ООО «Инжиниринговый центр двигателестроения

«ТрансМашХолдинг» г. Коломна Московская обл.; ООО НПП «ТЕЛАР» г. Тула; ООО ПП «МехМаш» г. Тула; ООО «Ремпаир Ко Механикс» г. Тула; ООО «РосУтилизация 46» г. Курск; ООО «Краснополянская сельхозтехника» г. Курск. Материалы диссертационных исследований используются в образовательном процессе ЮЗГУ, СПбПУ имени Петра Великого, ВУЦ ТулГУ и ОГУ им. И.С. Тургенева.

9. Перспективами дальнейшего использования полученных результатов является широкое применение в промышленности новых многофункциональных сплавов и покрытий, полученных на основе частиц, изготовленных электродиспергированием легковесных металлоотходов, а также применение электроэрозионной шихты в аддитивных технологиях, плазменно-порошковой наплавке, газодинамическом напылении, электроискровом легировании и др.

Основные публикации по теме диссертационной работы Монографии

1. Агеева, Е.В. Материаловедческие аспекты твердосплавных электроэрозионных материалов / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев. – Курск: Университетская книга, 2013. – 204 с.

2. Агеева, Е.В. Состав и свойства порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов быстрорежущей стали в керосине / Р.А. Латыпов, Е.А. Воробьев, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева. – Курск: Университетская книга, 2014. – 108 с.

3 Агеева, Е.В. Состав и свойства медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова. – Курск: Университетская книга, 2014. – 144 с.

4. Агеева, Е.В. Получение и исследование композиционных медных гальванических покрытий, модифицированных медными электроэрозионными порошками микро- и нанодисперсий / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев. – Курск: Университетская книга, 2016. – 131 с.

5. Агеева, Е.В. Состав и свойства порошков, полученных электроэрозионным диспергированием хромсодержащих отходов / Е.В. Агеева, С.В. Хардинов, А.В. Щербаков, Е.В. Агеев. – Курск: Университетская книга, 2016. – 152 с.

6. Агеева, Е.В. Псевдосплав ВНЖ, полученный на основе электроэрозионных материалов, продиспергированных в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Н.М. Хорьякова. – Курск: Университетская книга, 2021. – 201 с.

Статьи, опубликованные в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Агеева, Е.В. Исследование производительности процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Н.А. Пивовар // Известия Курского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (33). – С. 76-82.

2. Агеева, Е.В. Оценка эффективности применения твердосплавных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов, при восстановлении и упрочнении деталей композиционными гальваническими покрытиями / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 9 (81). – С. 14-16.

3. Агеева, Е.В. Разработка оборудования и технологии получения порошков из отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов для промышленного использования / Е.В. Агеев,

Е.В. Агеева // Вестник машиностроения. – 2013. – № 11. – С. 51-56.

4. Агеева, Е.В. Исследование свойств электроэрозионных порошков и твердого сплава, полученного из них изостатическим прессованием и спеканием / Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеева // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2014. – № 6. – С. 51-55.

5. 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.

6. Агеева, Е.В. Рентгеноспектральный микроанализ порошка, полученного из отходов быстрорежущей стали электроэрозионным диспергированием в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 11. – С. 71-72.

7. Агеева, Е.В. Рентгеноструктурный анализ порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в водной среде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко // Вестник машиностроения. – 2014. – № 12. – С. 64-65.

8. 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.

9. 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. 63-64.

10. Агеева, Е.В. Гранулометрический и фазовый составы порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в керосине / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.А. Воробьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 11-14.

11. Агеева, Е.В. Изучение формы и элементного состава порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в водной среде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 14-17.

12. Агеева, Е.В. Электроэрозионные медные порошки для гальванических покрытий / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 18-20.

13. Агеева, Е.В. Получение износостойких покрытий с использованием электродов из твердосплавных электроэрозионных порошков и их исследование / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев, А.С. Осьминина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 21-23.

14. Агеева, Е.В. Получение заготовок твердого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.Ю. Карпенко, А.С. Осьминина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. № 4 (112). – С. 24-27.

15. 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 // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 10 (40). – С. 10-13.

16. Агеева, Е.В. Размерный анализ частиц порошка, полученного из вольфрамсодер-

жащих отходов электроэрозионным диспергированием в воде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко // Вестник машиностроения. – 2015. – № 3. – С. 45-46

17. Агеева, Е.В. Анализ формы и морфологии частиц порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев // Вестник машиностроения. – 2015. – № 7. – С. 72-73.

18. Агеева, Е.В. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, В.Ю. Карпенко // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 1. – С. 71-76.

19. Агеева, Е.В. Характеристики электроискровых покрытий, полученных электродами из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, В.Ю. Карпенко // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 2. – С. 62-65.

20. Агеева, Е.В. Влияние технологии получения электродного материала из отходов быстрорежущей стали на износостойкость электроискровых покрытий [Текст] / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко, А.Ю. Алтухов // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 1 (43). – С. 36-41.

21. 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 высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 4. – С. 4-8.

22. Агеева, Е.В. Исследование влияния технологии электроэрозионного диспергирования на элементный состав нихромовых порошковых материалов / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.В. Щербаков, А.С. Осьминина // Научные технологии в машиностроении. – 2015. № 4 (46). – С. 3-8.

23. Агеева, Е.В. Порошковые материалы для восстановления деталей машин, полученные электроэрозионным диспергированием в бутаноле / Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеева, А.С. Угримов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2016. – № 3. – С. 20-21.

24. Агеева, Е.В. Электроэрозионные порошки микро- и нанометрических фракций для производства твердых сплавов / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, Г.Р. Латыпова // Электрометаллургия. – 2016. – № 1. – С. 16-20.

25. 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 высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2016. – № 1. – С. 35-43.

26. Агеева, Е.В. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Агеева Е.В., Е.П. Новиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 4. – С. 19-22.

27. Агеева, Е.В. Элементный состав частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов твердого сплава марки ВК8 / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеева // Электрометаллургия. – 2017. – № 11. – С. 26-31.

28. Агеева, Е.В. Сравнительный рентгеноспектральный микроанализ медного порош-

ка, полученного электроэрозионным диспергированием, и медного порошка ПМС-1 / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова // *Электromеталлургия*. – 2017. – № 4. – С. 36-39.

29. Агеева, Е.В. Установка для получения порошковых материалов, пригодных для технологических процессов восстановления и упрочнения деталей / Е.В. Агеева, М.В. Зубарев // *Труды ГОСНИТИ*. – 2017. – Т. 129. – С. 169-173.

30. Агеева, Е.В. Свойства покрытий, полученных плазменной наплавкой диспергированных отходов машиностроения / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеева // *Электromеталлургия*. – 2018. – № 3. – С. 34-40.

31. Агеева, Е.В. Получение кобальтохромовых порошков электроэрозионным диспергированием отходов и их исследование / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеева // *Электromеталлургия*. – 2018. – № 5. – С. 36-40.

32. Агеева, Е.В. Свойства композиционных гальванических покрытий, полученных с использованием диспергированных отходов стали ШХ15 / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеева, Г.Р. Латыпова // *Электromеталлургия*. – 2019. – № 3. – С. 14-18.

33. Агеева, Е.В. Влияние температуры на пористость аддитивных изделий из диспергированных отходов кобальтохромовых сплавов / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеева // *Электromеталлургия*. – 2019. – № 8. – С. 30-34.

34. Агеева, Е.В. Состав и свойства порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов инструментальной быстрорежущей стали Р18 / Г.Р. Латыпова, Н.Н. Карпенко, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеева // *Электromеталлургия*. – 2020. – № 3. – С. 25-29.

35. Агеева, Е.В. Исследование влияния параметров электроэрозионного диспергирования сплава ВНЖ на средний размер получаемых частиц / Е.В. Агеева, В.Л. Селютин, Л.П. Андреева // *Электromеталлургия*. – 2020. – № 6. – С. 32-40.

36. Агеева, Е.В. Свойства спеченного псевдосплава ВНЖ из электроэрозионных порошков, полученных в дистиллированной воде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов // *Электromеталлургия*. – 2021. – № 2. – С. 35-40.

37. Агеева, Е.В. Свойства псевдосплава ВНЖ, спеченного из электроэрозионных порошков, полученных в керосине / Е.В. Агеева // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2021. – Т.17. – № 3 (195). – С. 117-121.

38. Агеева, Е.В. Структура и свойства безвольфрамового твердого сплава на основе карбонитрида титана, спеченного из электроэрозионных порошков, полученных в углеродсодержащей среде / Е.В. Агеева, Б.Н. Сабельников // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2021. – Т.17. – № 4 (196). – С. 158-161.

39. Агеева, Е.В. Исследование структуры и свойств упрочненных аддитивных изделий, полученных из электроэрозионного кобальтохромового порошка / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов // *Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов*. – 2021. – № 4 (790). – С. 42-45.

40. Агеева, Е.В. Оценка износостойкости упрочненных аддитивных изделий из электроэрозионного кобальтохромового порошка / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов // *Вестник машиностроения*. – 2021. – Т.17. – № 5. – С. 73-75.

41. Агеева, Е.В. Структура и свойства порошков, полученных электродиспергированием коррозионно-стойких металлических отходов в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.А. Сысоев // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2021. – Т.17. – № 6 (198). – С. 276-281.

42. Агеева, Е.В. Оценка износостойкости образцов, спеченных из электроэрозионных высокохромистых порошков, полученных в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.А. Сысоев // *Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов*. – 2021. – № 7 (793). – С. 53-58.

43. Агеева, Е.В. Структура и свойства порошковых материалов, полученных электродиспергированием нихромовых металлоотходов / Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, А.В. Щербаков // *Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Metallургия*. – 2021. – № 7 (254). – С. 27-31.

44. Агеева, Е.В. Исследование структуры и свойств порошков, полученных электродиспергированием отходов алюминия, для аддитивных технологий / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, Е.В. Агеева // *Электрометаллургия*. – 2021. – № 7. – С. 25-31.

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования
Scopus и Web of Science**

1. Ageeva, E.V. Properties and characterizations of powders produced from waste carbides / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, A.S. Osminina // *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2013. – Vol. 5(4). – P. 04038.

2. Ageeva, E.V. Hard alloy synthesis from tungsten-containing electroerosion powders of micro- and nanometric fractions / E.V. Ageev, A.V. Kirichek, A.Y. Altuhov, E.V. Ageeva // *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2014. – Vol. 6(3). – P. 03001.

3. Ageeva, E.V. Studing tungsten-containing electroerosion powders and alloys synthesized from them / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, V.Y. Karpenko, A.S. Osminina // *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2014. – Vol. 6(3). – P. 03049.

4. 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). – P. 03011.

5. Ageeva, E.V. Morphology of copper powder produced by electrospark dispersion from waste / E.V. Ageeva, N.M. Khor'yakova, E.V. Ageev // *Russian Engineering Research*, 2014. – Vol. 34(11). – Pp. 694-696.

6. Ageeva, E.V. Wear-resistant coatings from electroerosive micro- and nanofraction powders / E.V. Ageeva, L.P. Kuznetsova, E.V. Ageev // *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2015. – Vol. 7(4). – P. 04038.

7. Ageeva, E.V. X-ray analysis of the powder of micro- and nanometer fractions, obtained from wastes of alloy T15K6 in aqueous medium / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, S.V. Pikalov, E.A. Vorobiev, A.N. Novikov // *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2015. – Vol. 7(4). – P. 04058.

8. Ageeva, E.V. Morphology and composition of copper electrospark powder suitable for sintering / E.V. Ageeva, N.M. Khor'yakova, E.V. Ageev // *Russian Engineering Research*, 2015. – Vol. 35(1). – Pp. 33-35.

9. Ageeva, E.V. Investigation into the properties of electroerosive powders and hard alloy fabricated from them by isostatic pressing and sintering / E.V. Ageev, R.A. Latypov, E.V. Ageeva // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015. – Vol. 56(1). – Pp. 52-62.

10. Ageeva, E.V. Nanopowder produced from high-speed steel waste by electrospark dispersion in water / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, V.Y. Karpenko // *Russian Engineering Research*, 2015. –

Vol. 35(3). – Pp. 189-190.

11. Ageeva, E.V. Electroerosion micro- and nanopowders for the production of hard alloys / R.A. Latypov, E.V. Ageeva, O.V. Kruglyakov, G.R. Latypova // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016. – Vol. 2016(6). – Pp. 547-549.

12. Ageeva, E.V. Insight into physicomechanical 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(2). – Pp. 161-167.

13. Ageeva, E.V. Elemental Composition of the Powder Particles Produced by Electric Discharge Dispersion of the Wastes of a VK8 Hard Alloy / R.A. Latypov, E.V. Ageev, G.R. Latypova, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2017. – Vol. 2017(12). – Pp. 1083-1085.

14. Ageeva, E.V. Properties of the Coatings Fabricated by Plasma-Jet Hard-Facing by Dispersed Mechanical Engineering Wastes / R.A. Latypov, E.V. Ageev, G.R. Latypova, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2018. – Vol. 2018(6). – Pp. 573-575

15. Ageeva, E.V. Manufacture of Cobalt–Chromium Powders by the Electric Discharge Dispersion of Wastes and Their Investigation / R.A. Latypov, E.V. Ageev, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2018. – Vol. 2018(12). – Pp. 1177-1180.

16. Ageeva, E.V. Properties of the Composite Galvanic Coatings Fabricated Using the Dispersed Wastes of ShKh15 Steel / R.A. Latypov, E.V. Ageeva, G.R. Latypova // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019. – Vol. 2019(6). – Pp. 632-635.

17. Ageeva, E.V. Effect of Temperature on the Porosity of the Additive Products Made of the Dispersed Wastes of Cobalt–Chromium Alloys / R.A. Latypov, E.V. Ageev, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019. – Vol. 2019(12). – Pp. 1300-1303.

18. Ageeva, E.V. Composition and Properties of the Powder Fabricated from the Waste of High-Speed R18 Tool Steel by Electroerosion Dispersion / G.R. Latypova, N.N. Karpenko, R.A. Latypov, E.V. Ageeva // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020. – Vol. 2020(6). – Pp. 698-701.

19. Ageev, E.V. Structure and mechanical properties of powders obtained by electrodispersing cobalt-chromium alloy / E.V. Ageev, A.Yu. Altukhov, E.V. Ageeva, A.I. Pykhtin // *Journal of Applied Engineering Science*, 2021. – Vol. 19(1). – Pp. 230–236.

20. Ageeva, E.V. Properties of the VNZH Pseudoalloy Sintered from Spark Erosion Powders Fabricated in Distilled Water / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, R.A. Latypov // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021. – Vol. 6. – Pp. 119–123.

21. Ageeva, E.V. Mathematical optimization of the process of electrodispersion of the waste of the alloy of the residence permit / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, O.V. Kuzovleva, A.E. Gvozdev // *Chebyshevskii Sbornik*, 2021. – Vol. 22(2). – Pp. 389-401.

22. Ageeva, E.V. Development of scientific and technological foundations for a new environmentally friendly and waste-free process for grinding conductive waste into micro- and nanofractions powders / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, O.V. Kuzovleva, A.E. Gvozdev // *Chebyshevskii Sbornik*, 2021. – Vol. 21(4). – Pp. 314-326.

23. Ageeva, E.V. X-Ray methods for studying the surface of powder obtained by electroerosion dispersion of the waste of W–Ni–Fe 95 pseudoalloy in kerosene / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, N.M. Khoryakova // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2021. – Vol. 15. – No. 4. – Pp. 723–727.

24. Ageeva, E.V. Wear Resistance of Hardened Components Produced from Electrospark Cobalt–Chromium Powder by Additive Manufacturing / E.V. Ageev, E.V. Ageeva // Russian Engineering Research, 2021. – Vol. 41. – No. 8. – Pp. 731–733.

25. Ageeva, E.V. A Study of the Structure and Properties of Hardened Additive Articles Obtained from Electroerosion Cobalt-Chromium Powder / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, A.Y. Altukhov // Metal Science and Heat Treatment, 2021. – Vol. 63. – No. 3. – Pp. 210–213.

Патенты на изобретения РФ

1. Пат. 2364482 РФ, МПК51 С2. Композиция для плазменно-порошковой наплавки износостойких покрытий на детали машин, включающая порошок карбида вольфрама и карбида титана / А.В. Петридис, А.А. Толкушев, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева; заявитель и патентообладатель Курск. гос. техн. ун-т. – №2006128665/02; заявл. 07.08.2006; опубл. 20.08.2009. Бюл. № 23.

2. Пат. 2563609 РФ, МПК51 С1. Способ получения заготовок из порошковой быстрорежущей стали / Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеева; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2014137211/02; заявл. 16.09.2014; опубл. 20.09.2015. Бюл. № 26.

3. Пат. 2597443 РФ, МПК51 С1. Способ получения стальных порошков электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в воде / Е.В. Агеева, С.В. Хардигов, Е.В. Агеев, А.С. Осьминина; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2015109483/02; заявл. 19.03.2015; опубл. 10.09.2016. Бюл. № 25.

4. Пат. 2590045 РФ, МПК51 С2. Способ получения металлического нанопорошка из отходов быстрорежущей стали в керосине / Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеева; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2014135667/02; заявл. 03.09.2014; опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19.

5. Пат. 2597445 РФ, МПК51 С2. Способ получения нанопорошка меди из отходов / Е.В. Агеев, Н.М. Хорьякова, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеева, В.С. Малюхов; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2014135539/02; заявл. 27.03.2016; опубл. 10.09.2016. Бюл. № 25.

6. Пат. 2599476 РФ, МПК51 С2. Способ получения медного порошка из отходов / Е.В. Агеев, Н.М. Хорьякова, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеева; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2014135563/02; заявл. 02.09.2014; опубл. 10.10.2016. Бюл. № 28.

7. Пат. 2612117 РФ, МПК51 С2. Способ получения алюминиевого нанопорошка / Е.В. Агеев, Е.П. Новиков, Е.В. Агеева; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2015144702; заявл. 19.10.2015; опубл. 02.03.2017. Бюл. № 7.

8. Пат. 2631549 РФ, МПК51 С2. Способ получения порошка титана методом электроэрозионного диспергирования / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2016110017; заявл. 11.11.2016; опубл. 25.09.2017. Бюл. № 27.

9. Пат. 2612119 РФ, МПК51 С2. Способ получения медных гальванических покрытий, модифицированных наночастицами электроэрозионной меди / Е.В. Агеев, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеева; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2015131035; заявл. 27.07.2015; опубл. 02.03.2017. Бюл. № 7.

10. Пат. 2612886 РФ, МПК51 С2. Шихта для производства вольфрамотитановых

твердых сплавов / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, С.В. Хардииков, Е.В. Агеев, А.С. Осьминина; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2015119805; заявл. 09.09.2017; опубл. 13.03.2017. Бюл. № 8.

11. Пат. 2613240 РФ, МПК51 С2. Способ получения заготовок вольфрамо-титанового твердого сплава / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, С.В. Хардииков, Е.В. Агеев, А.С. Осьминина; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2015119823; заявл. 27.05.2015; опубл. 15.03.2017. Бюл. № 8.

12. Пат. 2664149 РФ, МПК51 С2. Способ получения мелкокристаллического корунда / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2016110004; заявл. 21.03.2016; опубл. 15.08.2018. Бюл. № 23.

13. Пат. 2680536 РФ, МПК51 С1. Способ получения спеченного изделия из порошка кобальтохромового сплава / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, Е.П. Новиков, С.В. Хардииков; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2018105134; заявл. 12.02.2018; опубл. 22.02.2019. Бюл. № 6.

14. Пат. 2681237 РФ, МПК51 С1. Способ получения кобальто-хромовых порошков электроэрозионным диспергированием / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, Е.П. Новиков, С.В. Хардииков; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2018105138; заявл. 12.02.2018; опубл. 05.03.2019. Бюл. № 7.

15. Пат. 2681238 РФ, МПК51 С1. Способ получения спеченных изделий из электроэрозионных вольфрамсодержащих нанокпозиционных порошков / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, Е.П. Новиков, А.С. Переверзев; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2018112280; заявл. 05.04.2018; опубл. 05.03.2019. Бюл. № 7.

16. Пат. 2688025 РФ, МПК51 С1. Порошковый материал для газодинамического напыления дефектных головок блоков цилиндров / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2018112261; заявл. 05.04.2018; опубл. 17.05.2019. Бюл. № 14.

17. Пат. 2699479 РФ, МПК51 С1. Способ получения нихромовых порошков электроэрозионным диспергированием в воде дистиллированной / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, С.В. Хардииков, А.В. Щербаков; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2019110706; заявл. 10.04.2019; опубл. 05.09.2019. Бюл. № 25.

18. Пат. 2683162 РФ, МПК51 С2. Способ получения порошка псевдосплава W-Ni-Fe методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / В.Л. Селютин, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.П. Новиков; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2017131573; заявл. 09.09.2017; опубл. 26.03.2019. Бюл. № 9.

19. Пат. 2705837 РФ, МПК51 С1. Состав шихты для производства аддитивных изделий / Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеева, С.В. Хардииков; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2018142564; заявл. 03.12.2018; опубл. 12.11.2019. Бюл. № 32.

20. Пат. 2709561 РФ, МПК51 С1. Способ получения вольфрамтитанокобальтовых порошков из отходов сплава Т30К4 в спирте / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, С.В. Хардииков; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2019130315; заявл. 26.09.2019; опубл. 18.12.2019. Бюл. № 35.

21. Пат. 2710707 РФ, МПК51 С1. Способ получения металлического нанопорошка из отходов свинцовой бронзы в дистиллированной воде / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Переверзев; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2016110004; заявл.

03.05.2018; опубл. 09.01.2020. Бюл. № 1.

22. Пат. 2713900 РФ, МПК51 С2. Способ получения спеченных изделий из изостатически спрессованных электроэрозионных нанокomпозиционных порошков свинцовой бронзы / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Переверзев; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2018120632; заявл. 05.06.2018; опубл. 10.02.2020. Бюл. № 4.

23. Пат. 2735 844 РФ, МПК51 С1. Способ получения коррозионностойких порошков из стали X17 в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.А. Сысоев, С.В. Хардииков; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2020114207; заявл. 20.04.2020; опубл. 09.11.2020. Бюл. № 31.

24. Пат. 2747 197 РФ, МПК51 С2. Способ получения безвольфрамовых твердосплавных порошков из отходов сплава марки КНТ16 в спирте этиловом / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Б.Н. Сабельников; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2019137722; заявл. 22.11.2019; опубл. 29.04.2021. Бюл. № 13.

25. Пат. 2747 205 РФ, МПК51 С2. Способ получения порошка тяжелых вольфрамовых псевдосплавов электроэрозионным диспергированием отходов сплава ВНЖ в керосине / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.Л. Селютин; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2020117688; заявл. 28.05.2020; опубл. 29.04.2021. Бюл. № 13.

26. Пат. 2748 659 РФ, МПК51 С2. Способ получения спеченных изделий из одноосно спрессованных электроэрозионных нанодисперсных порошков свинцовой бронзы / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.С. Переверзев; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2019131552; заявл. 07.10.2019; опубл. 28.05.2021. Бюл. № 16.

27. Пат. 2750720 РФ, МПК51 С1. Способ получения спеченного изделия из порошковой коррозионной стали / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.А. Сысоев, С.В. Хардииков; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2020113899; заявл. 18.04.2020; опубл. 01.07.2021. Бюл. № 19.

Подписано в печать 23.09.2021 г. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 2,5. Тираж 150 экз. Заказ 46.
Юго-Западный государственный университет
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.