

На правах рукописи



Кругляков Олег Викторович

**Разработка и исследование вольфрамо-титано-кобальтовых
сплавов на основе диспергированных электроэрозией частиц
сплава Т15К6**

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Курск – 2019

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

Научный

руководитель:

Агеева Екатерина Владимировна
кандидат технических наук, доцент.

**Официальные
оппоненты:**

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

Задорожний Роман Николаевич
кандидат технических наук, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ,
ведущий научный сотрудник – руководитель Центра
коллективного пользования «Нано-Центр», г. Москва.

Ведущая

организация:

ФГБОУ ВО «Московский политехнический
университет», г. Москва.

Защита состоится «26» декабря 2019 г. в 14-00 на заседании
диссертационного совета Д 212.105.13 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 «__» _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Алтухов Александр Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Вольфрамо-титано-кобальтовые сплавы обладают рядом весьма ценных свойств, благодаря которым их эффективно используют во многих областях промышленности. В настоящее время одной из основных проблем использования вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов является переработка их отходов и повторное использование. Существующие промышленные технологии измельчения таких сплавов отличаются крупнотоннажностью, высокими затратами энергии и экологическими проблемами. Одним из перспективных и промышленно неприменяемых способов измельчения любого электропроводного материала является электроэрозионный способ. К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения об использовании диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в качестве шихты для производства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и режущего инструмента из них. Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и повторное их использование при изготовлении режущего инструмента.

Актуальность работы подтверждается выполнением ее в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (№14.В37.21.1845), гранта Президента РФ (МД-1123.2014.8), госзадания (№11.6682.2017/БЧ) и соответствует одному из приоритетов Стратегии научно-технологического развития РФ (Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642), в части обеспечения перехода к передовым производственным технологиям и новым материалам.

Степень разработанности темы. Работы в области исследования новых вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов ведутся в научных и высших образовательных учреждениях, таких как: НИТУ МИСиС, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, МПУ, ЮЗГУ, Институт материаловедения Хабаровского НЦ ДВО РАН, ФНАЦ ВИМ, ГОСНИТИ, ДГТУ, БГИТА, ОГУ, СибАДИ и других организациях. Этим направлением занимались такие ученые как: В.И. Третьяков, В.И. Романова, Г.В. Самсонов, В.С. Панов, А.Д. Верхотуров, Т.Б. Ершова, М.И. Дворник, Р.А. Латыпов, В.А. Денисов, С.Н. Кульков, В.П. Сивоха, А.А. Рыжкин, В.В. Акимов, Г.И. Сильман, С.И. Богодухов, Е.В. Агеев и др. Однако в трудах этих ученых не рассматриваются вопросы, касающиеся использования диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в качестве шихты для производства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и режущего инструмента из них. Целесообразность решения этих вопросов определила выбор темы, формулировку цели, постановку задач и основные направления исследования.

Целью работы являлось разработка и исследование вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов, пригодных к промышленному применению, на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать экологически чистый, малотоннажный и безотходный способ измельчения сплава марки Т15К6 до частиц микро- и нанодисперсий.
2. Измельчить сплав Т15К6 электроэрозией в двух рабочих средах (воде дистиллированной и керосине осветительном) и провести исследования состава, структуры и свойств диспергированных частиц:
 - гранулометрического состава;
 - среднего размера частиц;
 - удельной площади поверхности;
 - морфологии и элементного состава;
 - фазового состава.
3. Из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 получить заготовки вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов по двум технологиям:
 - изостатическим прессованием и спеканием в вакууме;
 - горячим прессованием путем пропуска высокоамперного тока.
4. Провести исследования состава, структуры и свойств вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6:
 - морфологии и элементного состава;
 - пористости;
 - размера зерна;
 - плотности;
 - предела прочности при изгибе;
 - предела прочности при сжатии;
 - микротвердости.
5. Исследовать влияние рабочих жидкостей на свойства диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6.
6. Исследовать влияние состава, структуры и свойств шихты из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 на состав, структуру и свойства спеченного из нее вольфрамо-титано-кобальтового сплава.
7. Исследовать влияние технологии производства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 на его свойства.
8. Выполнить апробацию и патентование полученных результатов.

Научная новизна

1. Применительно к диспергированию электроэрозией сплава Т15К6 установлено влияние рабочих жидкостей на свойства диспергированных частиц, позволяющее управлять их дисперсностью, элементным и фазовым составами.

В частности, анализ гранулометрического состава показал, что диспергированные электроэрозией частицы сплава Т15К6 имеют средний размер 19,692 мкм и 5,118 мкм, в керосине осветительном и воде дистиллированной соответственно. По удельной площади поверхности результат аналогичный 13401,22 см²/см³ против 30738,5 см²/см³. 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. Рентгеноспектральный микроанализ показал, что на поверхности частиц, полученных в воде дистиллированной, присутствует часть кислорода, а в керосине осветительном – углерода. Рентгеноструктурный анализ показал, что диспергирование электроэрозией сплава Т15К6 в воде дистиллированной приводит к потере углерода в частицах вплоть чистого W, Ti и фаз W₂C, Ti₂C, а диспергирование в керосине осветительном способствует образованию фаз WC и TiC. Это связано с различием химического состава рабочих жидкостей, обеспечивающих поставку активного углерода в реакционную зону при температурах, соответствующих той или иной модификации карбидов.

2. Установлена зависимость состава, структуры и свойств спеченного вольфрамо-титано-кобальтового сплава от состава, структуры и свойств шихты из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6, позволяющая оказывать влияние на его физико-механические свойства. Отмечено, что состав, структура и свойства диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6, зависящие в основном от свойств рабочей среды влияют на пористость и размер зерна спеченных заготовок, а они в свою очередь на его физико-механические свойства, такие как микротвердость, предел прочности при сжатии и изгибе.

3. Установлена зависимость влияния технологии производства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 на его свойства, позволяющая управлять качеством изделий.

Отмечено, что вольфрамо-титано-кобальтовые сплавы из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6, полученные с помощью импульсного электротока и так называемого «эффекта плазмы искрового разряда» в условиях очень быстрого нагрева и малой продолжительности рабочего цикла обладают лучшими физико-механическими свойствами, по сравнению с вольфрамо-титано-кобальтовыми сплавами из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6, полученными холодным изостатическим прессованием при давлении и спеканием в вакууме, а также по сравнению с вольфрамо-титано-кобальтовыми сплавами, полученными в заводских условиях. Это

достигается за счет подавления роста зерна и получения равновесного состояния с субмикронным и наномасштабным зерном.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в исследовании, разработке и апробации вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов на основе диспергированных частиц сплава Т15К6, пригодных к промышленному применению, включая:

- разработку и патентование шихты для производства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов (патент на изобретение РФ № 2612886);
- разработку и патентование способа получения заготовок вольфрамо-титано-кобальтового сплава (патент на изобретение РФ № 2613240).

Диссертационная работа по тематике, содержанию и результатам соответствует 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» и п.9 «Разработка новых принципов создания сплавов, обладающих заданным комплексом свойств, в том числе для работы в экстремальных условиях» паспорта научной специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались современные методы испытаний и исследований, в том числе: на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec» исследовали гранулометрический состав и средний размер частиц; на газоадсорбционном анализаторе «TriStar II 3020» определяли удельную площадь поверхности частиц по одно- и пятиточечному методу БЭТ; на атомно-эмиссионном спектрометре фирмы «HORIBA Jobin Yvon» модель «ULTIMA 2» определяли содержание вольфрама, титана и кобальта с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой; на анализаторе углерода и серы «Leco CS-400» определяли содержание общего углерода методом сжигания в потоке кислорода; потенциометрическим методом по ГОСТ 25599.2–83 «Сплавы твёрдые спечённые. Методы определения свободного углерода» определяли содержание свободного углерода; на анализаторе кислорода и азота «Leco TC-600» определяли содержание кислорода методом восстановительного плавления (графитовый тигель) в импульсной печи сопротивления в токе инертного газа (гелий); на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» и энерго-дисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы «EDAX» определяли форму и морфологию поверхности частиц, выполняли рентгеноспектральный микроанализ, исследовали элементный состав; на рент-

геновском дифрактометре «Rigaku Ultima IV» проводили рентгеноструктурный (фазовый) анализ; с помощью прибора «Instron 402 MVD» определяли микротвёрдость; на прессе «EPSI» проводили изостатическое прессование при давлении 300 МПа, а спекание – в высокотемпературной печи «Nabertherm» в вакууме при температуре 1500 °С и в устройстве для горячего прессования порошков путем прямого пропускания электрического тока (Система искрового плазменного спекания SPS 10-3); на автоматическом высокоточном настольном отрезном станке «Accutom-5» и шлифовально-полировальном станке «LaboPol-5» проводили механическую обработку спеченных образцов; на гелиевом пикнометре Micromeritics AccuPic II 1340; на универсальной напольной электромеханической испытательной машине «Instron 300LX-B1-C3-J1C» определяли плотность; предел прочности при изгибе и сжатии; с помощью оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51», оснащенного системой автоматизированного анализа изображений «SIMAGIS Photolab», проводили металлографические исследования (микроструктура, пористость, размер зерна) и др.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические и технологические решения, позволяющие получать пригодные к промышленному применению вольфросто-титано-кобальтовые частицы электроэрозией сплава Т15К6 в двух рабочих средах (воде дистиллированной и керосине осветительном).

2. Совокупность результатов экспериментальных исследований состава, структуры и свойств вольфросто-титано-кобальтовых частиц, полученных электроэрозией сплава Т15К6.

3. Совокупность результатов экспериментальных исследований свойств вольфросто-титано-кобальтовых сплавов, полученных по двум технологиям на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в воде дистиллированной и керосине осветительном.

Степень достоверности полученных результатов

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

Реализация результатов работы

Разработанные технологии и вольфрамо-титано-кобальтовые сплавы апробированы и внедрены в ООО «Инжиниринговый центр двигателестроения ТрансМашХолдинга» г. Коломна Московская обл.

Материалы исследований внедрены в учебный процесс при чтении лекций, выполнении лабораторных работ, курсовых и выпускных квалификационных работ со студентами и аспирантами в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Личный вклад автора. Автором лично выполнен весь объем экспериментальных исследований, обработка результатов и их анализ, выбран комплекс методик для аттестации диспергированных частиц и твердосплавных изделий. Автор принимал участие в методике проведения эксперимента.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: Международной научно-практической конференции «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях (Курск, 2014-2018 гг.); Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2014-2017 гг.); Международной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2014-2019 гг.); Международной научно-технической конференции «Современные автомобильные материалы и технологии» (Курск, 2014-2019 гг.); 5-й Международной научно-технической конференции «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 2014-2019 гг.) и др. (всего 15 конференций).

Публикации. Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 26 работах, в том числе: 2 монографии, 2 патента на изобретения РФ, 7 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в рецензируемом научном издании, входящем в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и WoS, и 16 статей в сборниках конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 143 страницы, в том числе 9 таблиц, 33 рисунка, 4 страницы приложений. Список литературы включает в себя 121 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен анализ состояния проблемы переработки отходов вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов. Установлено, что в настоящее время промышленно применяемые технологии переработки отходов вольфрамо-титано-кобальтовых твердых сплавов отличаются крупнотоннажностью, энергоёмкостью, большими производственными площадями, а также,

зачастую, экологическими проблемами (сточные воды, вредные выбросы). Отмечено также, что одним из наиболее перспективных способов переработки любого электропроводного материала, в том числе и вольфрамо-титано-кобальтового сплава, является электроэрозионный способ, который отличается относительно невысокими энергетическими затратами, безвредностью и экологической чистотой процесса, отсутствием механического износа оборудования, получением частиц преимущественно сферической формы размером от нескольких нанометров до сотен микрон. Показано, что к настоящему времени уровень разработки электроэрозионный способ достиг опытно-промышленного производства. Сформулированы цель и задачи работы в соответствии блок-схемой научных исследований, представленной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Блок-схема научных исследований

Во второй главе обоснована возможность применения электроэрозии для измельчения отходов твердого сплава Т15К6, описаны металлургические особенности электроэрозии электропроводных материалов, показаны преимущества электроэрозионного способа, обоснован выбор рабочих жидкостей и исходных материалов.

В третьей главе описаны используемые материалы и методики исследований. Для выполнения намеченных исследований выбраны отходы сплавов марки Т15К6. В качестве рабочих жидкостей – вода дистиллированная и керо-

син осветительный. При решении поставленных задач использовали современные методы испытаний и исследований, перечисленные в подразделе «Методология и методы исследования».

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований состава, структуры и свойств диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в керосине осветительном и воде дистиллированной.

Результаты исследования гранулометрического состава диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в воде дистиллированной и керосине осветительном при напряжении 120 В, емкости разрядных конденсаторов 20 мкФ и частоте следования импульсов 200 Гц, представлены на рисунке 2. Экспериментально установлено, что частицы имеют размер частиц от 0,25 до 100 мкм. Отмечено, что на гранулометрический состав частиц существенное влияние оказывают свойства рабочей жидкости. Показано, что средний размер частиц, полученных в керосине осветительном, в 3,9 раза больше среднего размера частиц, полученных в воде дистиллированной, и составляет 19,692 мкм и 5,118 мкм соответственно. Также установлено, что удельная площадь поверхности частиц, полученных в керосине осветительном, в 2,3 раза больше среднего размера частиц, полученных в воде дистиллированной, и составляет $13401,22 \text{ см}^2/\text{см}^3$ и $30738,5 \text{ см}^2/\text{см}^3$ соответственно.

Результаты исследования рентгеноструктурного (фазового) состава диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в воде дистиллированной и керосине осветительном при напряжении 120 В, емкости разрядных конденсаторов 20 мкФ и частоте следования импульсов 200 Гц, представлены на рисунке 3. Отмечено, что диспергирование электроэрозией сплава Т15К6 в воде дистиллированной приводит к потере углерода в частицах вплоть до чистого W, Ti и фаз W_2C , Ti_2C , а диспергирование в керосине осветительном способствует образованию фаз WC и TiC. Это связано с различием химического состава рабочих жидкостей, обеспечивающих поставку активного углерода в реакционную зону при температурах, соответствующих той или иной модификации карбидов.

Результаты исследования морфологии и элементного состава диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 представлены на рисунках 4 и 5. Видно, что в диспергированных электроэрозией частицах сплава Т15К6, как в воде, так и в керосине, присутствуют частицы, имеющие правильную сферическую, эллиптическую форму и агломераты.

Рентгеноспектральный анализ показал, что на поверхности частиц, полученных в воде дистиллированной, присутствует часть кислорода, а в керосине осветительном – углерода. Установлено, что основными элементами в диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 как в керосине осветительном, так и в воде дистиллированной, являются W, Ti и Co.

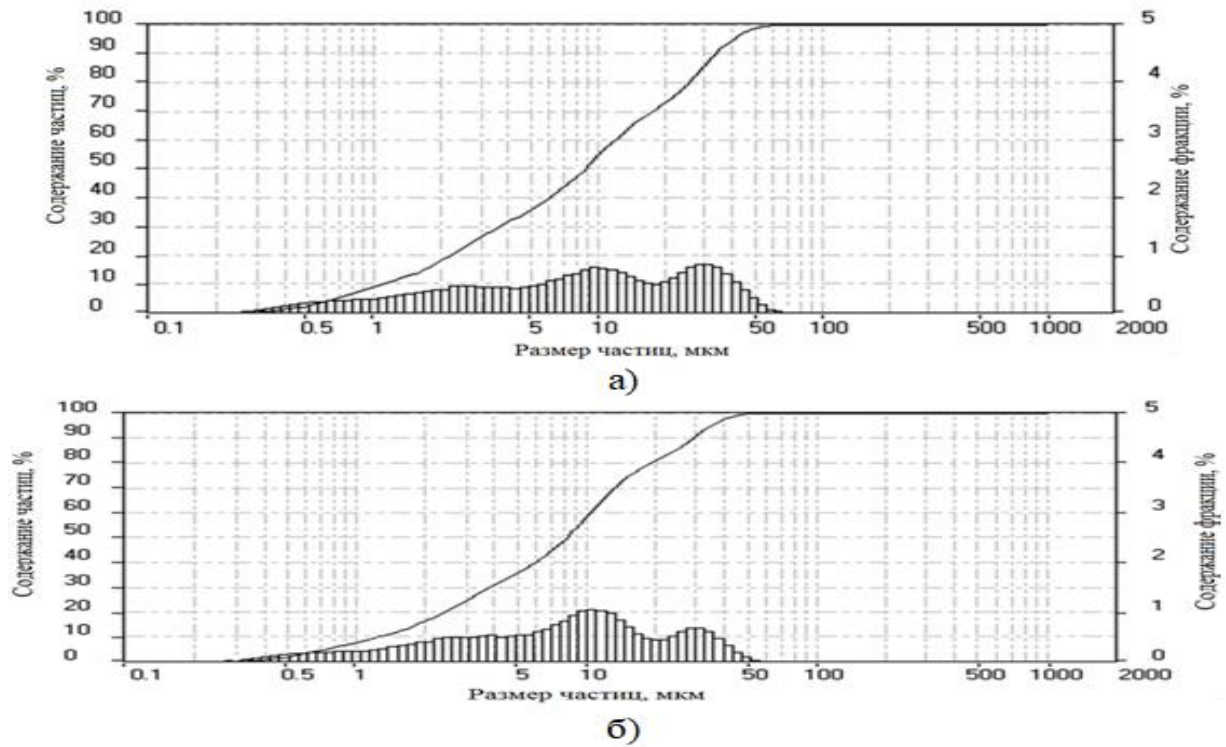


Рисунок 2 – Интегральная кривая и гистограмма распределения частиц по размерам: *а)* в воде; *б)* в керосине

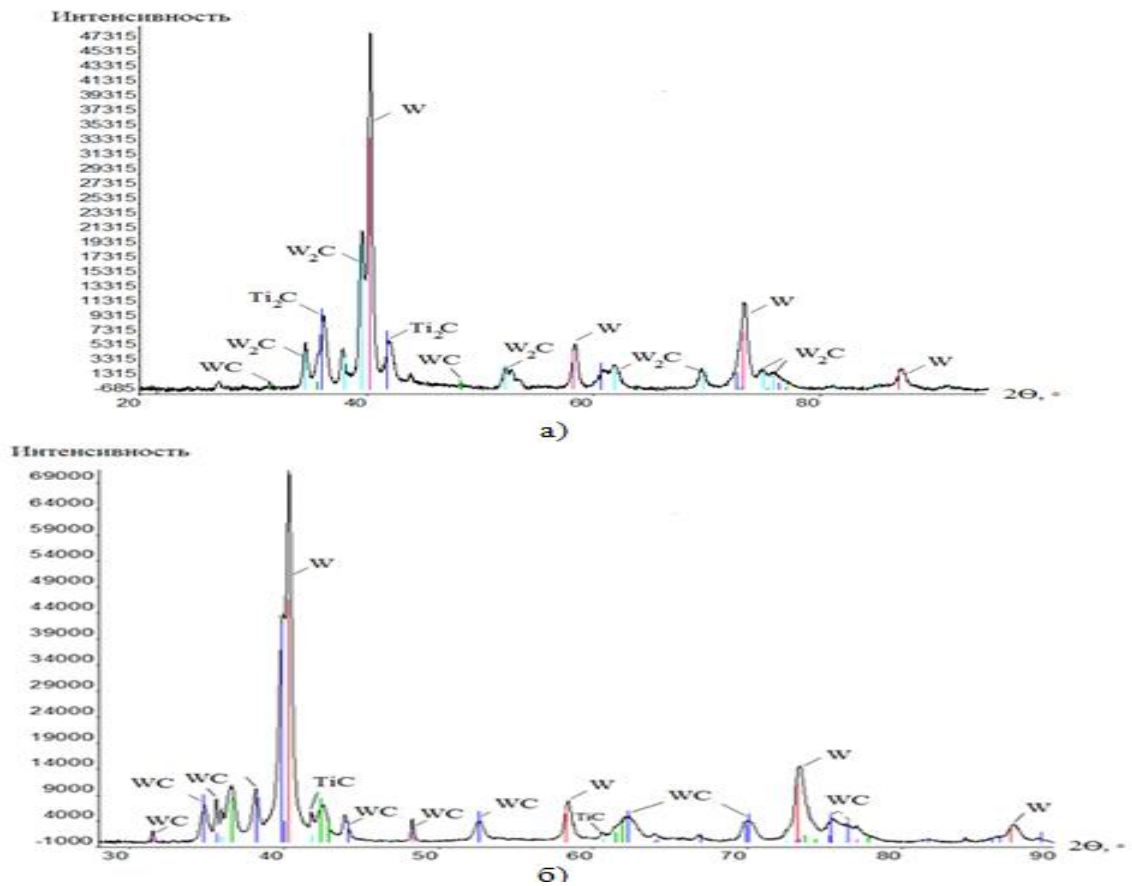


Рисунок 3 – Дифрактограмма диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6: *а)* в воде; *б)* в керосине

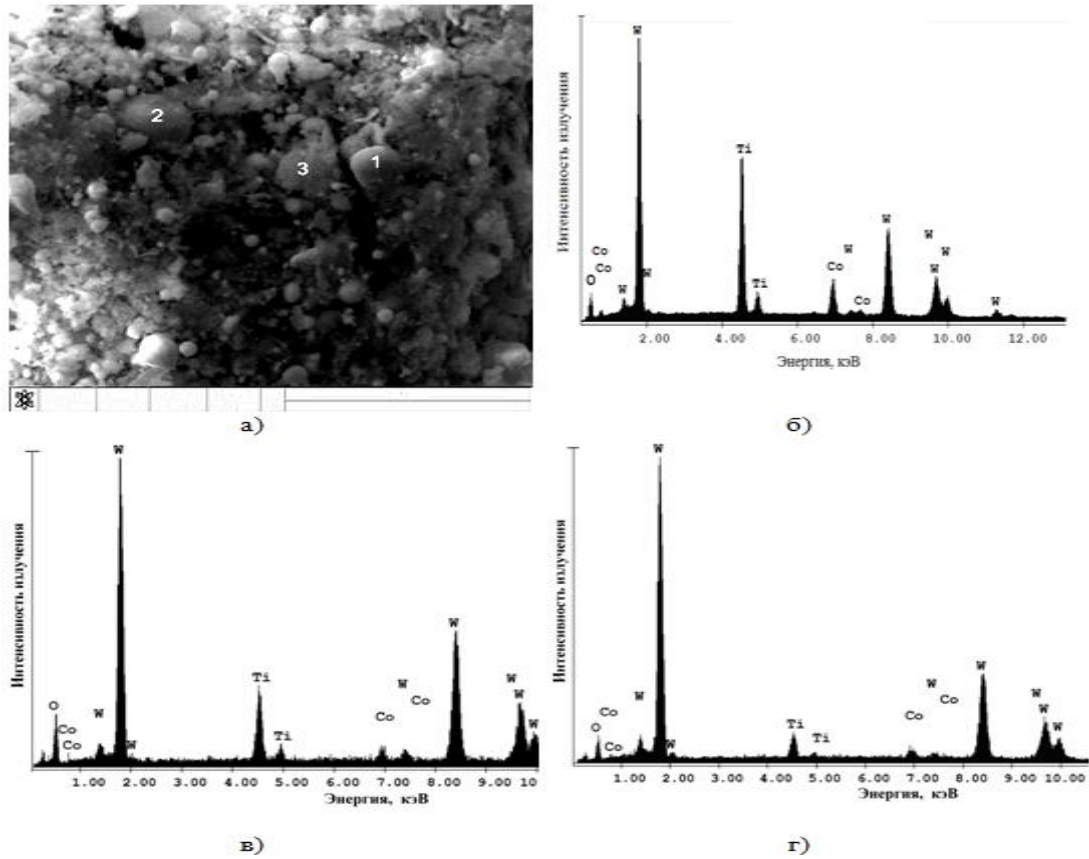


Рисунок 4 – Морфология *а)* и элементный состав диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в воде дистиллированной в точке: *б)* 1; *в)* 2; *г)* 3

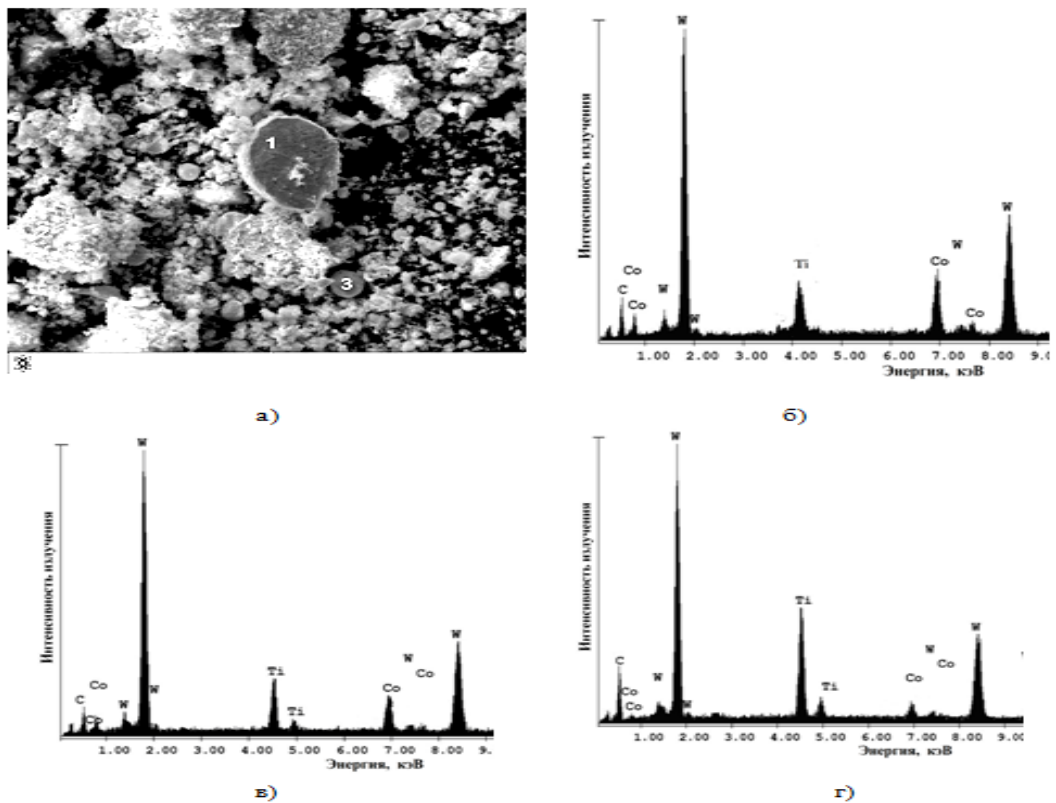


Рисунок 5 – Морфология *а)* и элементный состав диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в керосине осветительном в точке: *б)* 1; *в)* 2; *г)* 3

В пятой главе представлены результаты исследования заготовок вольфрам-титано-кобальтовых сплавов, полученным по двум технологиям:

- изостатическим прессованием и спеканием в вакууме;
- горячим прессованием путем пропускания высокоамперного тока.

В соответствии с первой технологией заготовки получали из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в воде дистиллированной и керосине осветительном изостатическим прессованием на прессе «EPSI» при давлении 300 МПа и последующим спеканием в высокотемпературной печи «Nabertherm» в вакууме при температуре 1500 °С в течение 2 часов.

В соответствии со второй технологией заготовки получали из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в керосине осветительном методом горячего прессования с пропусканием высокоамперного тока в вакууме при температуре 1320 °С в течение 3 минут. В основе процесса лежит модифицированный метод горячего прессования, при котором электрический ток пропускается непосредственно через пресс-форму и прессуемую заготовку, а не через внешний нагреватель.

Обобщенные данные по результатам исследования микроструктуры и рентгеноспектрального микроанализа вольфрам-титано-кобальтовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в воде дистиллированной и керосине осветительном представлены в таблице 1 и на рисунках 6-8. Точкам 1, 2, 3, на рисунках соответствуют спектры характеристического рентгеновского излучения. На спектрах каждому химическому элементу соответствует пик определенной высоты. Обобщенные данные по результатам исследования физико-механических свойств вольфрам-титано-кобальтовых сплавов представлены в таблице 2.

Экспериментально установлено, что в вольфрам-титано-кобальтовом сплаве из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в кислородсодержащей жидкости (воде дистиллированной) присутствует часть кислорода, а в вольфрам-титано-кобальтовых сплавах из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в углеродсодержащей жидкости (керосине осветительном) – углерода, а все остальные элементы распределены по объему относительно равномерно. Показано, что основными элементами в вольфрам-титано-кобальтовых сплавах из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6, как в керосине осветительном, так и в воде дистиллированной, являются W, Ti и Co.

Отмечено, что состав, структура и свойства диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6, зависящие в основном от рабочей среды (при прочих равных условиях) влияют на пористость и размер зерна спеченных заготовок, а они в свою очередь на механические свойства изделий.

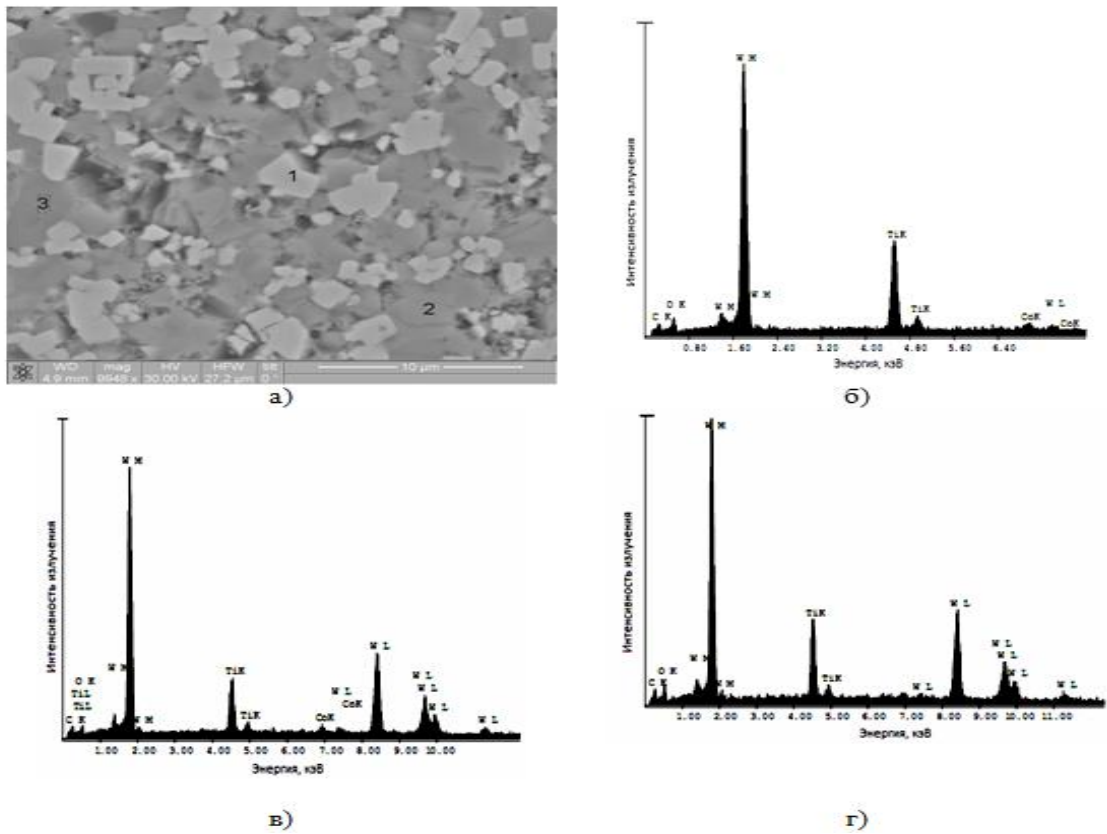


Рисунок 6 – Микроструктура (а) и рентгенограммы вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в воде дистиллированной, в точках: б) 1; в) 2; г) 3

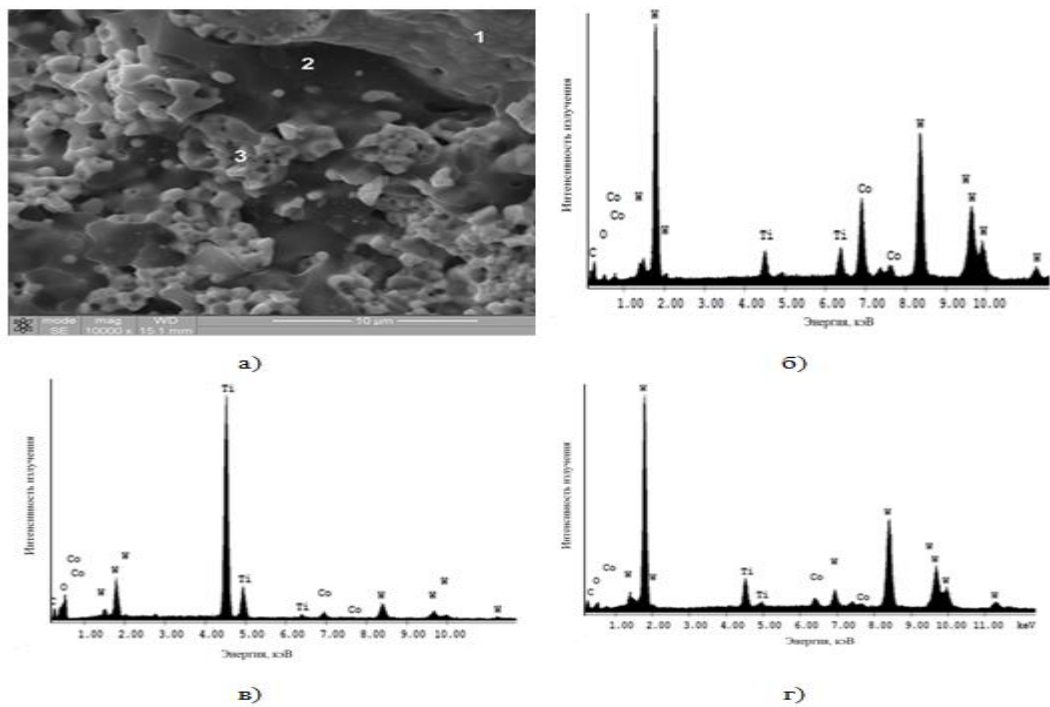
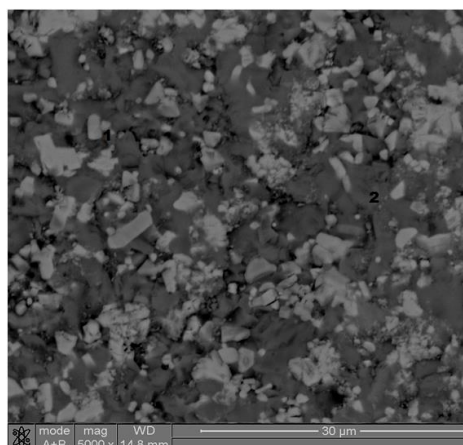
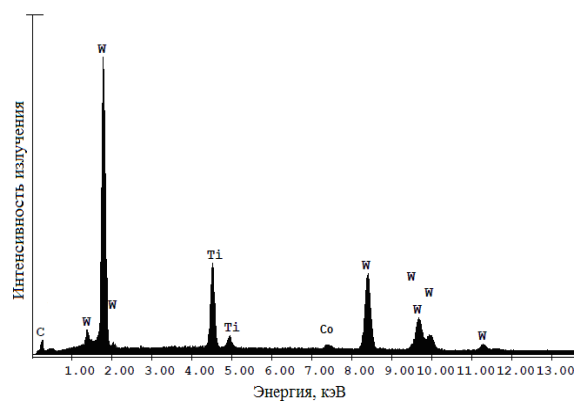


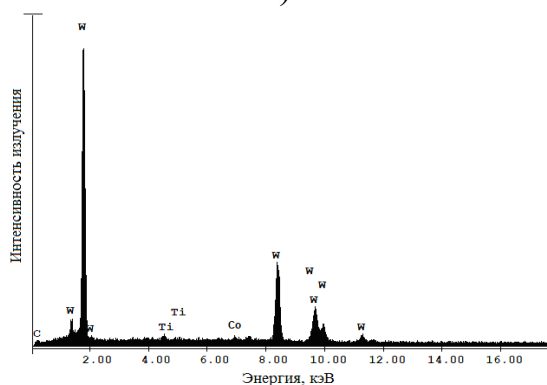
Рисунок 7 – Микроструктура а) и рентгенограммы вольфрамо-титано-кобальтовых сплавах из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в керосине б) в точке 1; в) в точке 2; г) в точке 3



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Микроструктура (а) и рентгенограммы вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в керосине осветительном, в точках: б) 1; в) 2

Таблица 1 – Обобщенные данные по результатам рентгеноспектрального микроанализа вольфрамо-титано-кобальтового сплава из диспергированных электроэрозией частиц

Точка	Содержание элемента, %				
	W	Ti	Co	C	O
1	<u>78,8</u>	<u>12,4</u>	<u>5,0</u>	<u>1,7</u>	<u>2,1</u>
	<u>86,2</u>	<u>8,1</u>	<u>3,0</u>	<u>2,7</u>	—
	87,3	7,4	3,5	1,8	—
2	<u>76,6</u>	<u>14,4</u>	<u>5,7</u>	<u>1,6</u>	<u>1,7</u>
	<u>91,0</u>	<u>4,2</u>	<u>2,7</u>	<u>2,1</u>	—
	15,4	76,3	5,9	2,4	—
3	<u>77,8</u>	<u>13,8</u>	<u>5,3</u>	<u>1,2</u>	<u>1,9</u>
	—	—	—	—	—
	81,7	10,4	5,5	2,4	—

Примечание: приведены значения массовых долей элементов в точках в последовательности в соответствие с рисунками 6-8.

Таблица 2 – Обобщенные данные по результатам исследования физико-механических свойств вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов

Исследуемый параметр	Вольфрамо-титано-кобальтовые сплавы			
	из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6			из промышленно применяемой шихты
	в воде дистиллированной	в керосине осветительном		
	изготовленные холодным изостатическим прессованием при давлении 300 МПа и спеканием в вакууме при температуре 1500 °С в течение 2 ч	изготовленные горячим прессования с пропуском высокоамперного тока в вакууме при температуре 1320 °С в течение 3 мин.	изготовленные по заводской технологии	
Пористость, %	9,92	4,22	0,1	1,0
Размер зерна, мкм	1,26	0,94	0,71	2,25
Плотность, г/см ³	11,2	12,1	12,4	11,5
Предел прочности при сжатии, МПа	188,46	470,36	987,92	600
Предел прочности при изгибе, МПа	357,92	893,31	1876,27	1150
Микротвердость HV при нагрузке 50 Н, МПа	710	1316	1729	1140
Рекомендуемая область применения	Электроды для электроискрового легирования	Режущий инструмент для обработки дерева	Режущий инструмент для обработки металлов и сплавов	

Показано, что механические свойства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 (предел прочности при сжатии, предел прочности при изгибе, микротвердость) понижаются с увеличением пористости. Такое снижение объясняется концентрацией напряжений в порах, являющихся местами зарождения и распространения трещины при нагружении. Отмечено также, что с уменьшением размера зерна вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 микротвердость возрастает.

Отмечено, что вольфрамо-титано-кобальтовые сплавы из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6, полученные с помощью импульсного электротока и так называемого «эффекта плазмы искрового разряда» («spark plasma effect») в условиях очень быстрого нагрева и малой продолжительности рабочего цикла обладают лучшими физико-механическими свойствами, даже по сравнению со сплавами, полученными в заводских условиях. Это достигается за счет подавления роста зерна и получения равновесного состояния с субмикронным и наномасштабным зерном.

Прочность вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6, изготовленных холодным изостатическим прессованием при давлении 300 МПа и спеканием в вакууме при температуре 1500 °С в течение 2 часов, является недостаточной для резания металлов и бурения горных пород, но вполне достаточной для обработки дерева и использования их в качестве электродов при электроискровом упрочнении режущего инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача, направленная на создания прогрессивной, экологически чистой, малотоннажной и безотходной технологии получения новых вольфрамо-титано-кобальтовых частиц, пригодных к промышленному применению, и сплавов на их основе.

1. Разработана шихта для производства вольфрамо-титано-кобальтовых твердых сплавов, содержащая частицы карбида вольфрама и карбида титана, отличающаяся тем, что она содержит упомянутые частицы в виде продукта диспергирования электроэрозией отходов вольфрамо-титано-кобальтового сплава Т15К6 в осветительном керосине и дистиллированной воде и имеет средний размер частиц 19,692 мкм и 5,118 мкм соответственно (патент на изобретение РФ № 2612886).

2. Разработан способ получения заготовок вольфрамо-титано-кобальтового сплава, включающий горячее прессование частиц в пресс-форме, отличающийся тем, что в качестве шихты используется диспергированные электроэрозией частицы сплава Т15К6, при этом горячее прессование ведется в вакууме с пропусканием высокоамперного тока через пресс-форму и прессуемые частицы при температуре 1320°С в течение 3 минут (патент на

изобретение РФ № 2613240).

3. Установлено, что в вольфрамо-титано-кобальтовом сплаве из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в кислородсодержащей жидкости (воде дистиллированной) присутствует часть кислорода, а в вольфрамо-титано-кобальтовом сплаве из диспергированных частиц, полученных в углеродсодержащей жидкости (керосине осветительном) – углерода, а все остальные элементы распределены по объему частиц относительно равномерно. Показано, что основными элементами в вольфрамо-титано-кобальтовом сплаве из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6, как в керосине осветительном, так и в воде дистиллированной, являются W, Ti и Co.

4. Установлены сравнительные характеристики физико-механических свойств между заготовками вольфрамо-титано-кобальтового сплава из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в керосине осветительном, изготовленного методом горячего прессования с пропусканием высокоамперного тока в вакууме при температуре 1320 °С в течение 3 минут, и вольфрамо-титано-кобальтовым сплавом, изготовленным из промышленно применяемой шихты по заводской технологии, показавшие:

- на порядок меньшую пористость;
- меньший в 3,2 раза размер зерна;
- большую в 1,1 раза плотность;
- больший в 1,7 раза предел прочности при сжатии;
- больший в 1,6 раза предел прочности при изгибе;
- большую в 1,5 раза микротвердость.

Это позволило рекомендовать данный сплав в качестве режущего инструмента для обработки металлов и сплавов.

5. Установлены сравнительные характеристики физико-механических свойств между заготовками вольфрамо-титано-кобальтового сплава из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в керосине осветительном, изготовленными холодным изостатическим прессованием при давлении 300 МПа и спеканием в вакууме при температуре 1500 °С в течение 2 часов, и вольфрамо-титано-кобальтовым сплавом, изготовленным из промышленно применяемой шихты по заводской технологии, показавшие:

- большую в 9,9 раза пористость;
- меньший в 1,8 раза размер зерна;
- меньшую в 1,05 раза плотность;
- меньший в 3,3 раза предел прочности при сжатии;
- меньший в 3,2 раза предел прочности при изгибе;
- большую в 1,15 раза микротвердость.

Это позволило рекомендовать данный сплав в качестве режущего инструмента для обработки дерева.

6. Установлены сравнительные характеристики физико-механических свойств между заготовками вольфрамо-титано-кобальтового сплава из диспергированных электроэрозией частиц сплава Т15К6 в воде дистиллирован-

ной, изготовленными холодным изостатическим прессованием при давлении 300 МПа и спеканием в вакууме при температуре 1500 °С в течение 2 часов, и вольфрамо-титано-кобальтовым сплавом, изготовленным из промышленно применяемой шихты по заводской технологии, показавшие:

- большую в 4,2 раза пористость;
- меньший в 2,4 раза размер зерна;
- большую в 1,05 раза плотность;
- меньший в 1,2 раза предел прочности при сжатии;
- меньший в 1,3 раза предел прочности при изгибе;
- меньшую в 1,6 раза микротвердость.

Это позволило рекомендовать данный сплав в качестве электродов для электроискрового легирования.

7. Разработанные технологии и оборудование апробированы и внедрены в ООО «Инжиниринговый центр двигателестроения ТрансМашХолдинга» г. Коломна Московская обл. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составит свыше 2000000 руб. в год.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. Агеева, Е.В. Твердые сплавы, полученные из электроэрозионных порошков: монография / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев. – Курск: Университетская книга, 2015. – 164 с.

2. Алтухов, А.Ю. Порошковые композиционные электроэрозионные материалы: получение и свойства / А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, А.В. Щербаков, Е.П. Новиков. – Курск: Университетская книга, 2016. – 144 с.

3. Агеев, Е.В. Рентгеноспектральный микроанализ твердого сплава, полученного из электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, О.В. Кругляков, Р.А. Латыпов, П.И. Бурак // Международный технико-экономический журнал – 2014. – № 3. – С. 89–93.

4. Агеев, Е.В. Упрочнение ножей куттера электроискровым легированием электродами из твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, О.В. Кругляков // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – т. 116. – С. 156–160.

5. Кругляков, О.В. Разработка и исследование твердосплавных изделий из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрам-содержащих отходов / О.В. Кругляков, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – № 2. – С. 8-20.

6. Агеев, Е.В. Получение твердосплавных пластин с высокими эксплуатационными свойствами из электроэрозионных порошков микро- и нанометрических фракций / Е.В. Агеев, А.В. Киричек, А.Ю. Алтухов, О.В. Кругляков // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 12 (213). – С. 3–7.

7. Агеева Е.В. Исследование микроструктуры и элементного состава твердосплавных пластин, полученных из электроэрозионных порошков микро- и нанодробей / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, Е.В. Агеев, М.А. Зубарев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – № 2 (15). – С. 9-16.

8. Кругляков, О.В. Свойства заготовок твердого сплава, полученных изостатическим прессованием и спеканием электроэрозионных порошков / О.В. Кругляков, А.С. Угримов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Осьминина // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015. – № 2 (59). – С. 15-22.

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

10. Latypov, R.A. Electroerosion micro- and nanopowders for the production of hard alloys / R.A. Latypov, G.R. Latypova, E.V. Ageeva, O.V. Kruglyakov // Russian metallurgy (Metally). – 2016. – Т. 2016. – № 6. – P. 547-549.

11. Кругляков, О.В. Исследование микротвердости покрытий, полученных с использованием вольфрамсодержащих электроэрозионных порошков / О.В. Кругляков, А.Д. Сытченко, С.В. Хардилов, Е.В. Агеева // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2014. – С. 173–176.

12. Кругляков, О.В. Микроанализ твердосплавных электроэрозионных порошков и спеченного из них сплава / О.В. Кругляков, С.В. Хардилов, Е.В. Агеев // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2014. – С. 176–179.

13. Агеев, Е.В. Исследование микротвердости заготовок твердого сплава, полученных холодным изостатическим прессованием и спеканием вольфрамсодержащих электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, О.В. Кругляков, А.С. Осьминина // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф: в 3 т. – Т. 1. – Курск, 2014. – С. 22–24.

14. Агеев, Е.В. Исследование пористости твердосплавных изделий заготовок твердого сплава, полученных холодным изостатическим прессованием и спеканием вольфрамсодержащих электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, О.В. Кругляков, А.С. Осьминина // Прогрессивные технологии и процессы: сб. науч. ст. Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. в 2-х томах / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2014. – Т. 1. – С. 31–34.

15. Кругляков, О.В. Получение наноразмерного вольфрамсодержащего порошка, пригодного для восстановления деталей автомобилей / О.В. Кругляков, Н.Н. Карпенко, Е.В. Агеева // Современные автомобильные материалы и технологии: сб. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2014. – С. 212–218.

16. Кругляков, О.В. Механические свойства твердосплавных заготовок, полученных из электроэрозионных порошков / О.В. Кругляков, А.С. Осьминина, Е.В. Агеев // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. в 4 т. / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015. – Т. 2. – С. 293–298.

17. Кругляков, О.В. Свойства электроэрозионных порошков, используемых в производстве твердосплавных заготовок / О.В. Кругляков, А.С. Угримов, А.С. Осьминина, Е.В. Агеев // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 1. – С. 118–127.

18. Кругляков, О.В. Повышение качества переработки отходов вольфрамсодержащих спеченных твердых сплавов / О.В. Кругляков, Е.В. Агеев, А.С. Осьминина, М.А. Зубарев // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 3-ой Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2015. – С. 6–16.

19. Агеева, Е.В. Определение плотности твердосплавных пластин, полученных из электроэрозионных порошков микро- и нанометрических фракций / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, Е.И. Никифоров // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. тр. 5-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2015. – С. 10–14.

20. Агеева, Е.В. Определение пористости твердосплавных пластин, полученных из электроэрозионных порошков микро- и нанометрических фракций / Агеева Е.В., Кругляков О.В., Осьминина А.С., Зубарев М.А. // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. тр. 5-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2015. – С. 2–18.

21. Агеева, Е.В. Определение твердости твердосплавных пластин, полученных из электроэрозионных порошков микро- и нанометрических фракций / Агеева Е.В., Агеев Е.В., Кругляков О.В. // Инновации в металлообработке: взгляд молодых специалистов: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2015. – С. 13–17.

22. Агеева, Е.В. Определение прочности при изгибе твердосплавных пластин, полученных из электроэрозионных порошков микро- и нанометрических фракций / Агеева Е.В., Кругляков О.В., Осьминина А.С. // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2015): сб. ст. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2015. – С. 7–10.

23. Агеева Е.В. Исследование плотности твердосплавных заготовок, полученных из электроэрозионных порошков / Агеева Е.В., Кругляков О.В., Угримов А.С., Осьминина А.С. // Молодежь и XXI век - 2015: матер. V Междунар. молодеж. науч. конф.: в 3-х томах. – Курск, 2015. – С. 58–60.

24. Агеева, Е.В. Определение размера зерна твердосплавных пластин, полученных из электроэрозионных порошков микро- и нанометрических фракций / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, А.С. Осьминина, М.А. Зубарев // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых

и специалистов: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2015. – С. 22–26.

25. Зубарев, М.А. Изучение динамики накопления электроэрозионных вольфрамсодержащих порошков, полученных в водной среде / М.А. Зубарев, А.С. Осьминина, О.В. Кругляков // Прогрессивные технологии и процессы: сб. научн. ст. 2-й Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. в 3 т. Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015. – Т. 1. – С. 365–369.

26. Пат. 2612886 Российская федерация, МПК51 С22С 29/06, В22F 1/00(2006.01), С22В 7/00 (2006.01). Шихта для производства вольфрамтитановых твердых сплавов / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, С.В. Хардилов, Е.В. Агеев, А.С. Осьминина; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – №2015119805; заявл. 27.05.2015; опубл. 13.03.2017. Бюл. № 8.

27. Пат. 2613240 Российская федерация, МПК51 С22С 29/06, В22F 1/00(2006.01), С22В 7/00 (2006.01). Способ получения заготовок вольфрамтитанового твердого сплава / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, С.В. Хардилов, 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.

Подписано в печать . . . 2019 г. Формат 60x84 1/16.
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 046.
Юго-Западный государственный университет
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.