

На правах рукописи



Поданов Вадим Олегович

**Разработка и исследование жаропрочных сплавов на основе
диспергированных электроэрозией частиц
сплава ЖС6У**

Специальность 2.6.1. Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Курск – 2023

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

Научный

руководитель: доктор технических наук, профессор
Агеев Евгений Викторович

**Официальные
оппоненты:**

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 «28» декабря 2023 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 «__» _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Алтухов Александр Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время жаропрочные никелевые сплавы получили широкое применение в авиа- и космической отраслях для изготовления термонагруженных деталей газотурбинных двигателей, таких как сопла, лопатки, диски и др. Одной из основных проблем использования жаропрочного никелевого сплава ЖС6У связана с наличием в его составе дорогостоящих компонентов, таких как Cr, Co, Ni, Nb, Mo, Ti, W и необходимостью его повторного использования. Одним из эффективных, но недостаточно изученных металлургических способов измельчения металлоотходов является электродиспергирование (ЭД). Для разработки технологических рекомендаций по переработке металлоотходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У методом ЭД в мелкодисперсные частицы с целью их повторного использования требуется проведение комплексных металлографических исследований.

Реновация высоколегированных сплавов, в том числе и жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, будет способствовать ресурсосбережению, импортозамещению и обеспечению технологического суверенитета РФ. Актуальность работы подтверждается ее выполнением в рамках гранта Президента РФ (НШ-596.2022.4).

Степень разработанности темы. Работы в области исследования жаропрочных сплавов и покрытий на их основе ведутся в научных и высших образовательных учреждениях, таких как: Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва, Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов, Московский авиационный институт, Московский политехнический университет, Московский государственный технический университет гражданской авиации, НИТУ «МИСиС», институт материаловедения Хабаровского научного центра ДОРАН, Томский политех, АО «Научно-производственный центр газотурбостроения «Салют», ЮЗГУ и др. Значительный вклад в исследование жаропрочных сплавов внесли такие ученые как: Шатульский А.А., Каблов Е.Н., Овчинников В.В., Фарнасов Г.А., Изотов В.А., Самойленко В.М., Монастырский В.П., Фадеев А.В., Гурьянов Д.А., Масс А.В., Седых Д.А., Новикова О.В., Добрынин Д.А., Алексеева М.С., Даниленко В.Н., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Arash Khakzadshahandashti, Mohammad Reza Rahimiour (Индия) и др. Однако, в трудах этих ученых не рассматриваются вопросы, касающиеся реновации жаропрочного никелевого сплава ЖС6У путем электродиспергирования и последующего искрового плазменного сплавления полученных мелкодисперсных частиц. Целесообразность решения этих вопросов определила выбор темы, формулировку цели, постановку задач и основные направления исследования.

Целью работы являлась разработка и исследование новых жаропрочных сплавов, пригодных к промышленному применению, на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У, полученных в воде дистиллиро-

ванной и в керосине осветительном.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие **задачи**:

1. Разработан способ измельчения металлоотходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в мелкодисперсные частицы путем электроэрозии в жидких рабочих средах.
2. Измельчены металлоотходы жаропрочного никелевого сплава ЖС6У электроэрозией в двух средах (дистиллированной воде и осветительном керосине) в мелкодисперсные частицы.
3. Исследовано влияние свойств рабочих жидкостей на состав, структуру и свойства диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У.
4. Исследовано влияние электрических параметров (напряжения, ёмкости и частоты следования импульсов) электродиспергирования сплава ЖС6У на технологические свойства диспергированных электроэрозией частиц.
5. Оптимизирован процесс измельчения металлоотходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в двух средах (дистиллированной воде и осветительном керосине) и проведены металлографические исследования полученных частиц: формы и морфологии; гранулометрического состава и среднего размера; элементного и фазового составов.
6. Из диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в двух рабочих средах получены заготовки новых жаропрочных сплавов искровым плазменным сплавлением.
7. Исследовано влияние состава, структуры и свойств диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У на свойства заготовок новых жаропрочных сплавов.
8. Исследовано влияние технологических параметров искрового плазменного сплавления (температуры, давления, времени выдержки) на свойства заготовок новых жаропрочных сплавов.
9. Оптимизирован процесс искрового плазменного сплавления диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У и проведены исследования состава, структуры и свойств заготовок новых жаропрочных сплавов: микроструктуры, размера зерна, элементного и фазового составов, пористости, микротвердости, температуры плавления и жаропрочности.
10. Выполнена апробация и патентование полученных результатов.

Научная новизна

1. Применительно к процессу измельчения отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У электроэрозией установлено влияние свойств рабочих жидкостей на состав, структуру и свойства диспергированных частиц, позволяющее управлять их дисперсностью, элементным и фазовым составами. В частности, анализ гранулометрического состава показал, что диспергирован-

ные электроэрозией частицы сплава ЖС6У имеют средний размер 51,67 мкм и 59,72 мкм в воде дистиллированной и керосине осветительном, соответственно, что связано с большими потерями энергии электрического разряда на пробой рабочей жидкости ввиду разности диэлектрической проницаемости воды и керосина, 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. Отмечено, что диспергирование электроэрозией сплава ЖС6У в дистиллированной воде приводит к образованию в частицах оксидных фаз WO_3 и NiO , а диспергирование в осветительном керосине способствует образованию карбидных фаз WC , TiC , Mo_2C и Cr_7C_3 , а также интерметаллида Ni_3Al , что связано с различием химического состава рабочих жидкостей.

2. Установлено влияние электрических параметров (напряжения, ёмкости и частоты следования импульсов) электродиспергирования жаропрочного никелевого сплава ЖС6У на технологические свойства диспергированных электроэрозией частиц, позволяющее управлять их средним размером. Отмечено, что увеличение ёмкости разрядных конденсаторов и в большей степени напряжения на электродах при электроэрозионном диспергировании жаропрочного никелевого сплава ЖС6У способствует увеличению среднего размера диспергированных частиц.

3. Установлена зависимость свойств заготовок новых жаропрочных сплавов от состава, структуры и свойств диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, позволяющая оказывать влияние на его физико-механические свойства. Отмечено, что физико-механические и эксплуатационные свойства новых жаропрочных сплавов из диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, такие как температура плавления, пористость, размер зерна, жаропрочность и микротвердость, зависят от формы и дисперсности диспергированных электроэрозией частиц и их фазового состава.

4. Установлены зависимости свойств новых жаропрочных сплавов от технологических параметров искрового плазменного сплавления (температуры, давления, времени выдержки) диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, позволяющие управлять качеством изделий. Отмечено, что новые жаропрочные сплавы из диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, 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 промышленными сплавами ЖС6У. Это достигается за счет получения практически беспористой структуры жаропрочного сплава с субмикронным зерном и соответствующим фазовым составом.

Теоретическая и практическая значимость состоит в исследовании, разработке и апробации новых жаропрочных сплавов на основе диспергированных частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, пригодных к промышленному применению, включая:

– разработку и патентование шихты для производства жаропрочных сплавов, содержащую частицы никеля и молибдена, отличающуюся тем, что она содержит упомянутые частицы, полученные электроэрозией отходов сплава ЖС6У в дистиллированной воде (патент РФ №2779730);

– разработку шихты для производства жаропрочных сплавов, содержащую частицы никеля и молибдена, отличающуюся тем, что она содержит упомянутые частицы, полученные электроэрозией отходов сплава ЖС6У в керосине осветительном (патент РФ № 2784145);

– разработку и патентование способа получения жаропрочного сплава, отличающегося тем, что он получен искровым плазменным сплавлением шихты из диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в воде дистиллированной (решение о выдаче патента на изобретение РФ от 16.10.2023 по заявке №2022129595);

– разработку способа получения жаропрочного сплава, отличающегося тем, что он получен искровым плазменным сплавлением шихты из диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в керосине осветительном (заявка на изобретение РФ №2023103776).

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 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались современные методы испытаний и исследований, в том числе: гранулометрический состав и средний размер частиц исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес»; форму и морфологию поверхности частиц исследовали на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG»; рентгеноспектральный микроанализ частиц и сплавов проводили на энерго-дисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы «EDAX»; рентгеноструктурный (фазовый) анализ частиц и сплавов выполня-

лина рентгеновском дифрактометре «Rigaku Ultima IV»; сплавление частиц осуществляли на установке SPS 25-10 ThermalTechnology; механическую обработку образцов сплавов проводили на автоматическом высокоточном настольном отрезном станке «Accutom-5» и шлифовально-полировальном станке «LaboPol-5»; микроструктуру, пористость, размер зерна сплавов исследовали с помощью оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51», оснащенного системой автоматизированного анализа изображений «SIAMSPhotolab»; микротвердость сплавов определяли на микротвердомере DM-8; термический анализ сплавов проводили на приборе синхронного термоанализа STA 449 C JupiterNETZSCH; жаропрочность определяли при помощи испытательной машины ATS 2330 CC-230 и др.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ измельчения металлоотходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У путем электроэрозии в жидких рабочих средах.
2. Результаты исследования влияния свойств рабочих жидкостей на состав, структуру и свойства диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У.
3. Результаты исследования влияния электрических параметров (напряжения, ёмкости и частоты следования импульсов) электродиспергирования сплава ЖС6У на технологические свойства диспергированных электроэрозией частиц.
4. Результаты оптимизации процесса измельчения жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в двух средах (дистиллированной воде и осветительном керосине) и металлографических исследований полученных частиц.
5. Способ получения заготовок новых жаропрочных сплавов искровым плазменным сплавлением диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У.
6. Результаты исследования влияния состава, структуры и свойств диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У на свойства заготовок новых жаропрочных сплавов.
7. Результаты исследования влияния технологических параметров искрового плазменного сплавления (температуры, давления, времени выдержки) на свойства заготовок новых жаропрочных сплавов.
8. Результаты оптимизации процесса искрового плазменного сплавления диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У и металлографических исследований состава, структуры и свойств заготовок новых жаропрочных сплавов.
9. Результаты апробации и патентования полученных результатов.

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 конфе-

ренциях. 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 новые жаропрочные сплавы апробированы и внедрены в ООО «РУ 46» г. Курска.

Материалы исследований используются в образовательном процессе ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» при изучении дисциплины «Теория и технологии новых материалов» (3 курс направления подготовки аспирантов 22.06.01 «Технологии материалов» направленность «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»).

Личный вклад автора. Автором лично выполнен весь объем экспериментальных исследований, обработка результатов и их анализ, выбран комплекс методик для аттестации диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У и новых жаропрочных сплавов. Автор принимал участие в методике проведения эксперимента.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на конференциях в Москве, Воронеже, Брянске, Новокузнецке, Курске и др.: Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов (Курск, 2019-2023 гг.), Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (Воронеж, 2023 г.), Современные автомобильные материалы и технологии (Курск, 2019-2023 гг.); Современные материалы, техника и технология (Курск, 2019-2023 гг.); Технологии и техника: пути инновационного развития (Воронеж, 2023 г.) и др.

Публикации. Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 37 работах, в том числе: 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ; 5 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и WoS; 2 монографии; 2 патента на изобретения РФ; 1 решение о выдаче патента на изобретение РФ; 1 заявка на изобретение РФ; 20 статей в сборниках РИНЦ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 174 страницы, в том числе 23 таблицы, 51 рисунок, 4 страницы приложений. Список литературы включает в себя 149 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решения важной научно-практической задачи, направленной на разработку и исследование новых жаропрочных сплавов, пригодных к промышленному применению, на основе

диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У, полученных в воде дистиллированной и в керосине осветительном, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ областей применения жаропрочных сплавов, анализ технологии производства и анализ состояния проблемы переработки отходов жаропрочных сплавов, в том числе сплава ЖС6У. Установлено, что в настоящее время промышленно применяемые технологии переработки отходов жаропрочных сплавов отличаются крупнотоннажностью, энергоёмкостью, многооперационностью, большими производственными площадями, а также, зачастую, экологическими проблемами (загрязнение окружающей среды). Отмечено также, что одним из наиболее перспективных способов переработки любого электропроводного материала, в том числе и жаропрочного сплава ЖС6У, является электроэрозионный способ, который отличается относительно невысокими энергетическими затратами, безвредностью и экологической чистотой процесса, отсутствием механического износа оборудования, получением шихты непосредственно из отходов жаропрочного сплава различной формы за одну операцию, получением частиц преимущественно сферической и эллиптической формы размером от нескольких до сотен микрон. Показано, что к настоящему времени уровень разработки электроэрозионного способа достиг опытно-промышленного производства. Сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе представлены металлургические особенности электроэрозии металлоотходов, обоснована возможность применения метода электроэрозии для измельчения отходов жаропрочного сплава марки ЖС6У, описаны теоретические и технологические особенности процесса, показаны его преимущества, рассмотрены свойства рабочих жидкостей, основные технологические параметры и исходные материалы.

В третьей главе описаны используемые материалы, оборудование и методики исследований. Для выполнения намеченных исследований выбраны некондиционные лопатки газотурбинного двигателя из жаропрочного никелевого сплава ЖС6У. Для переработки металлоотходов сплава ЖС6У использовалась установка для измельчения токопроводящих материалов электрической эрозией. В качестве рабочих жидкостей применялись дистиллированная вода и осветительный керосин. При решении поставленных задач использовали современные методы испытаний и исследований, перечисленные в подразделе «Методология и методы исследования».

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований диспергированных электроэрозией частиц и жаропрочных сплавов на их основе.

Результаты предварительных исследований показали влияние электрических параметров электродиспергирования (напряжения, ёмкости и частоты следования импульсов) на технологические свойства электроэрозионных час-

тиц. Поскольку для частиц одним из основных технологических свойств является оптимальная дисперсность, то оптимизацию процесса электродиспергирования сплава ЖС6У проводили по среднему размеру частиц путем проведения полного факторного эксперимента типа 2^3 . Для оценки влияния основных факторов и математического описания процесса получения электроэрозионных частиц использована модель первого порядка вида:

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3, \quad (1)$$

где X_1, X_2, X_3 – факторы: напряжение U, В; частота следования импульсов ν , Гц и емкость разрядных конденсаторов C, мкФ, соответственно;

\hat{y} – исследуемая величина (средний размер электроэрозионных частиц).

После расчета всех коэффициентов уравнение (1) принимает вид для среднего размера частиц, полученных в дистиллированной воде (2), в осветительном керосине (3):

$$\hat{y} = 22,2 + 14,2X_1 + 3,47X_2 + 6,68X_3 + 1,69X_1X_2 + 3,43X_1X_3, \quad (2)$$

$$\hat{y} = 28,45 + 15,27X_1 + 3,87X_2 + 7,77X_3 + 2,04X_1X_2 + 3,44X_1X_3 - 1,12X_1X_2X_3. \quad (3)$$

Значения выбранных уровней варьируемых факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования

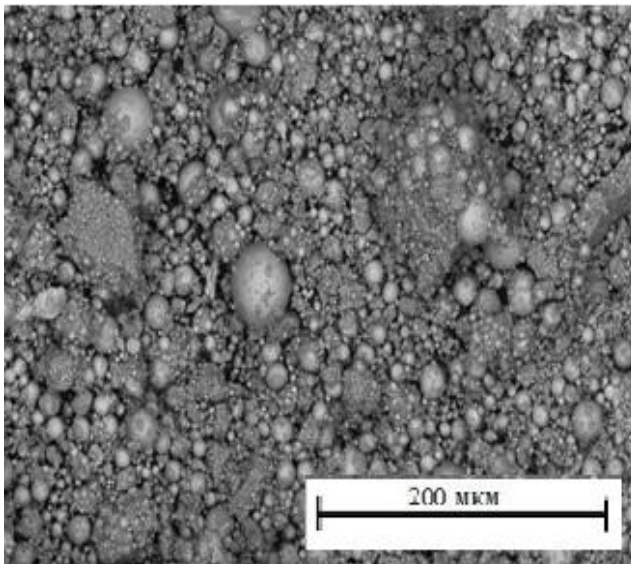
Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	U, В		ν , Гц		C, мкФ	
		X_1		X_2		X_3	
		вода	керосин	вода	керосин	вода	керосин
Основной уровень	0	150	150	150	150	45,5	45,5
Интервал варьирования	Δx_i	50	50	50	50	20	20
Верхний уровень	+1	200	200	200	200	65,5	65,5
Нижний уровень	-1	100	100	100	100	25,5	25,5

Все коэффициенты уравнений (2) и (3), моделирующих полный факторный эксперимент, являются статистически значимыми. Полученные уравнения были использованы для крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни): $X_1=100$ В, $X_2=50$ Гц, $X_3=45,5$ мкФ.

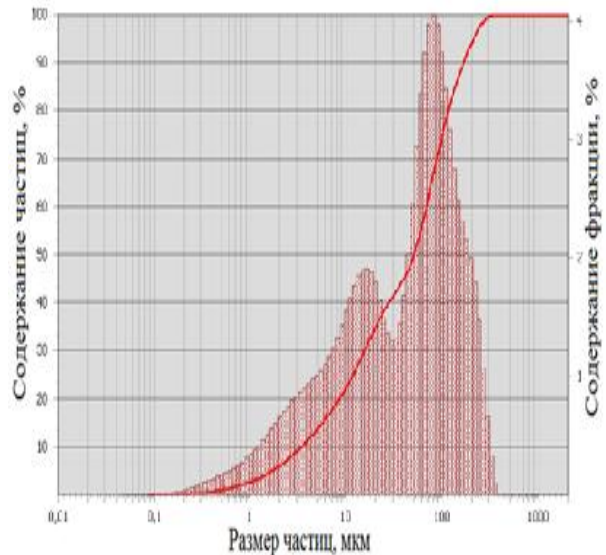
Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации Y (средний размер электроэрозионных частиц), которые составили: для воды – 51,67 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 50

Гц; для керосина – 59,72 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В и частоте следования импульсов 50 Гц.

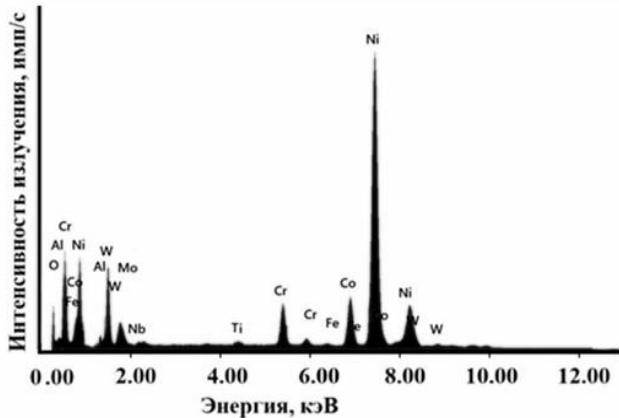
Результаты металлографических исследований состава, структуры и свойств диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в воде дистиллированной и керосине осветительном, полученных при оптимальных режимах, представлены на рис. 1 и 2.



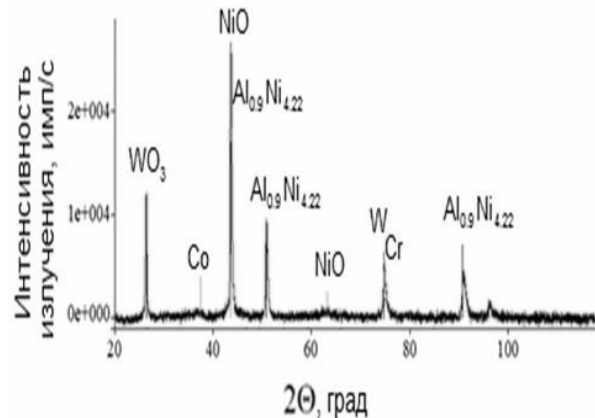
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Результаты исследований диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в дистиллированной воде:

- а) морфология; б) гранулометрический состав; в) элементный состав; г) фазовый состав

Экспериментально установлено, что частицы, полученные из отходов сплава ЖС6У, имеют размер частиц от 1,69 до 289,1 мкм. Отмечено, что на гранулометрический состав частиц существенное влияние оказывают свойства рабочей жидкости. Показано, что средний размер частиц, полученных в осветительном керосине, в 1,2 раза больше среднего размера частиц, полученных в воде дистиллированной, и составляет 51,67 мкм и 59,72 мкм соответственно. Видно, что в диспергированных

электроэрозией частицах ЖС6У, 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.

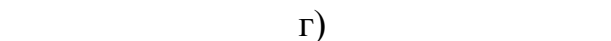
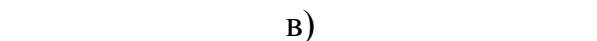
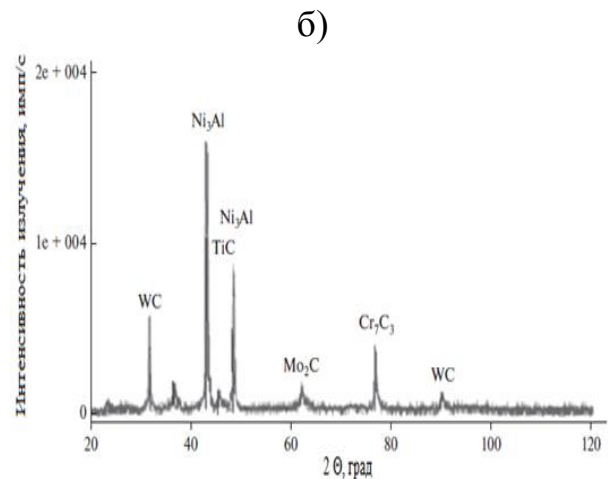
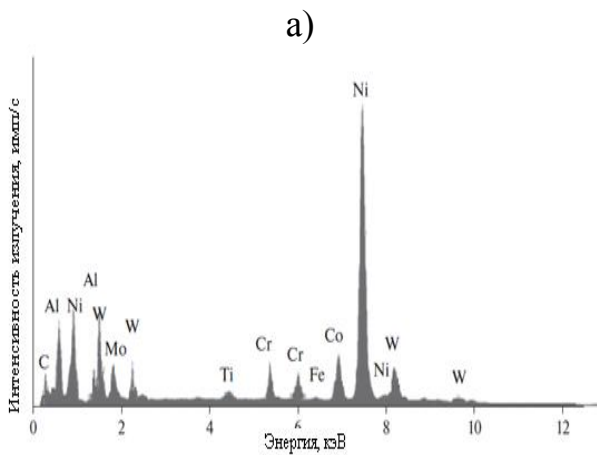
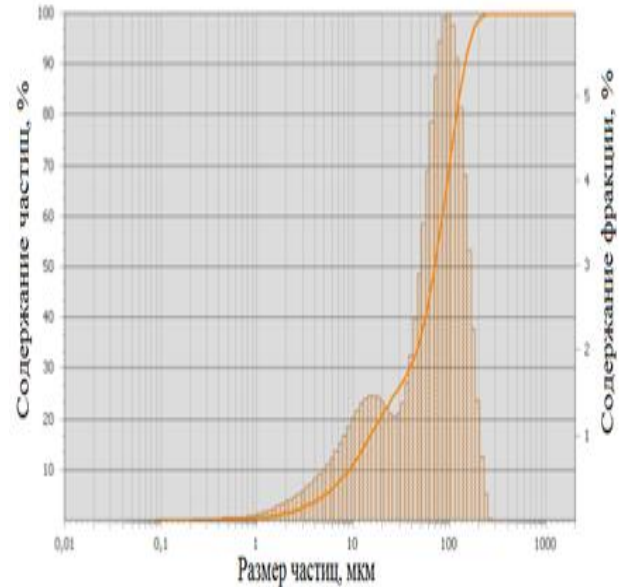
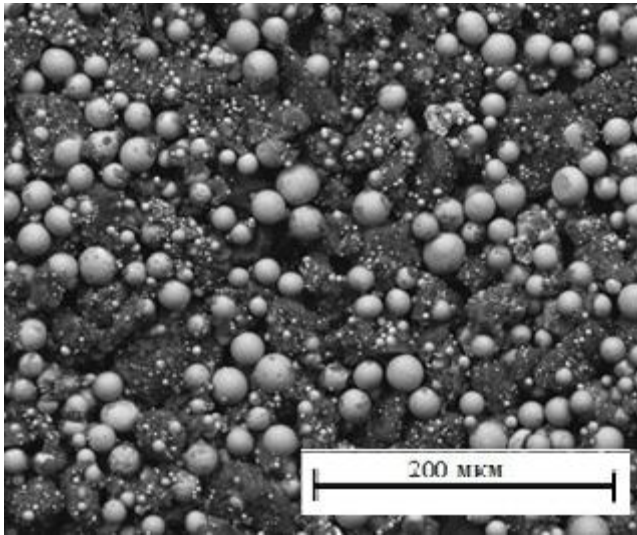


Рисунок 2 – Результаты исследований диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в осветительном керосине: а) морфология; б) гранулометрический состав; в) элементный состав; г) фазовый состав

Установлено, что основными элементами в диспергированных электроэрозией частицах сплава ЖС6У, как в керосине осветительном, так и в воде дистиллированной, являются Ni, Cr, Mo, Ti, W.

Отмечено, что диспергирование электроэрозией сплава ЖС6У в воде

дистиллированной приводит к образованию в частицах оксидных фаз WO_3 и NiO , а диспергирование в керосине осветительном способствует образованию карбидных фаз WC , TiC , Mo_2C и Cr_7C_3 , а также интерметаллида Ni_3Al , что связано с различием химического состава рабочих жидкостей.

Результаты предварительных исследований показали влияние технологических параметров искрового плазменного сплавления (температуры, давления, времени выдержки) на свойства заготовок новых жаропрочных сплавов.

Из наиболее информативных и коррелирующих с прочностными характеристиками сплава свойств, лимитирующих ресурс изделий, технологически просто определяется микротвердость, поэтому оптимизацию процесса получения жаропрочного сплава искровым плазменным сплавлением частиц проводили по данному параметру путем проведения полного факторного эксперимента типа 2^3 .

Для оценки влияния основных факторов и математического описания процесса получения новых сплавов искровым плазменным сплавлением частиц сплава ЖС6У использовалась модель первого порядка вида, представленная уравнением (1), в котором X_1 , X_2 , X_3 – факторы: температура T , °C; давление P , МПа и время выдержки t , мин. Соответственно, \hat{y} – исследуемая величина (микротвердость).

Значения выбранных уровней варьируемых факторов даны в табл. 2.

Таблица 2 – Уровни и интервалы варьирования

Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	Т, °C		P, МПа		t, мин.	
		X ₁		X ₂		X ₃	
		вода	керосин	вода	керосин	вода	керосин
Основной уровень	0	625	700	30	30	6	3,5
Интервал варьирования	Δx_i	400	500	10	10	4	1,5
Верхний уровень	+1	1500	1500	40	40	10	5
Нижний уровень	-1	200	200	20	20	2	2

После расчета всех коэффициентов уравнение (1) принимает вид (вода и керосин соответственно):

$$\hat{y} = 3291,37 + 763,3X_1 + 130,1X_2 + 277,7X_3 - 2,37X_1X_2 - 21,62X_1X_3 + 8,6X_2X_3 - 19,3X_1X_2X_3 \quad (4)$$

$$\hat{y} = 3249,25 + 830,25X_1 + 69X_2 + 213,5X_3 + 13X_1X_2 + 96,5X_1X_3 + 13,25X_2X_3 + 23,25X_1X_2X_3 \quad (5)$$

Полученные уравнения были использованы для крутого восхождения по поверхности отклика. По результатам расчетов процесса оптимизации искрового

плазменного сплавления электроэрозионных частиц крутое восхождение начинали из нулевых точек (основных уровней). Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации Y (микротвердость), которые составили: для образцов, полученных из частиц, диспергированных в воде – 4427 МПа при давлении 40 МПа, температуре 1400 °С и времени выдержки 10 мин.; для образцов, полученных из частиц, диспергированных в керосине – 4508 МПа при давлении 40 МПа, температуре 1380 °С и времени выдержки 5 мин.

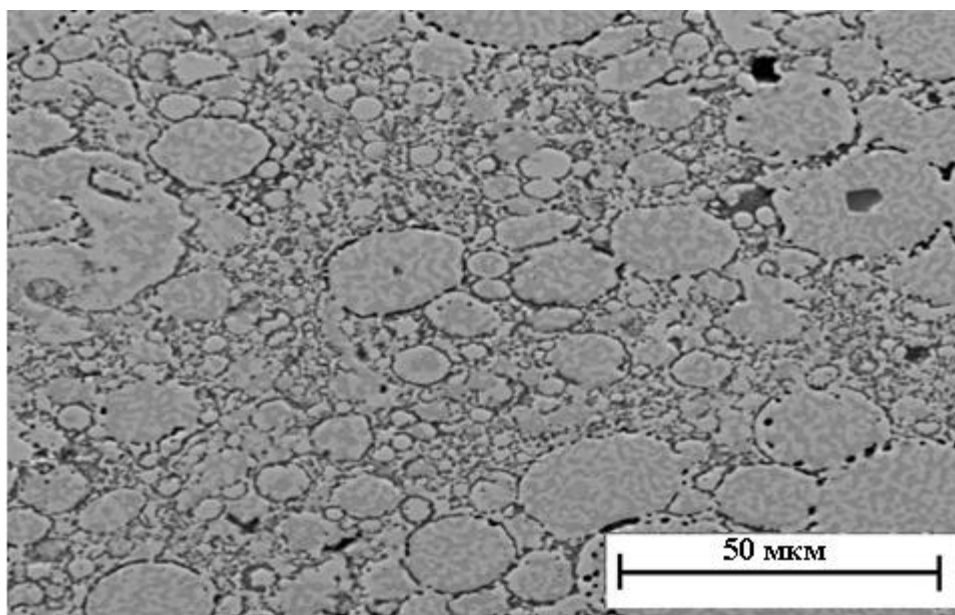
Результаты металлографических исследований новых жаропрочных сплавов, изготовленных на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в дистиллированной воде и осветительном керосине, полученных при оптимальных режимах представлены на рис. 3 и 4.

Экспериментально установлено, что в жаропрочных сплавах из диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в кислородсодержащей жидкости (воде дистиллированной) присутствует часть кислорода, а в жаропрочных сплавах из диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в углеродсодержащей жидкости (керосине осветительном) – углерода, а все остальные элементы распределены по объему относительно равномерно. Показано, что основными элементами в жаропрочных сплавах из диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У, как в керосине осветительном, так и в воде дистиллированной являются Ni, Cr, Mo, Ti, W.

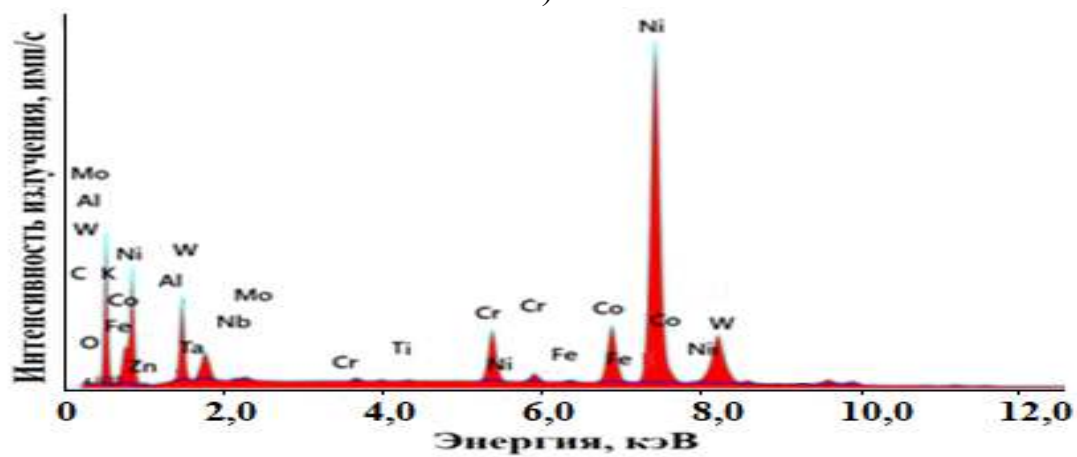
Отмечено, что основными фазами в жаропрочных сплавах из диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в воде дистиллированной являются фазы оксидов WO_3 , NiO и интерметаллидов, а в керосине осветительном – наличие в них карбидных фаз: WC, TiC, Mo_2C и Cr_7C_3 , а также интерметаллида Ni_3Al , что связано с различием фазового состава исходной шихты.

Отмечено, что состав, структура и свойства диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У, зависящие в основном от рабочей среды (при прочих равных условиях) влияют на пористость и размер зерна сплава, а они в свою очередь на механические свойства изделий.

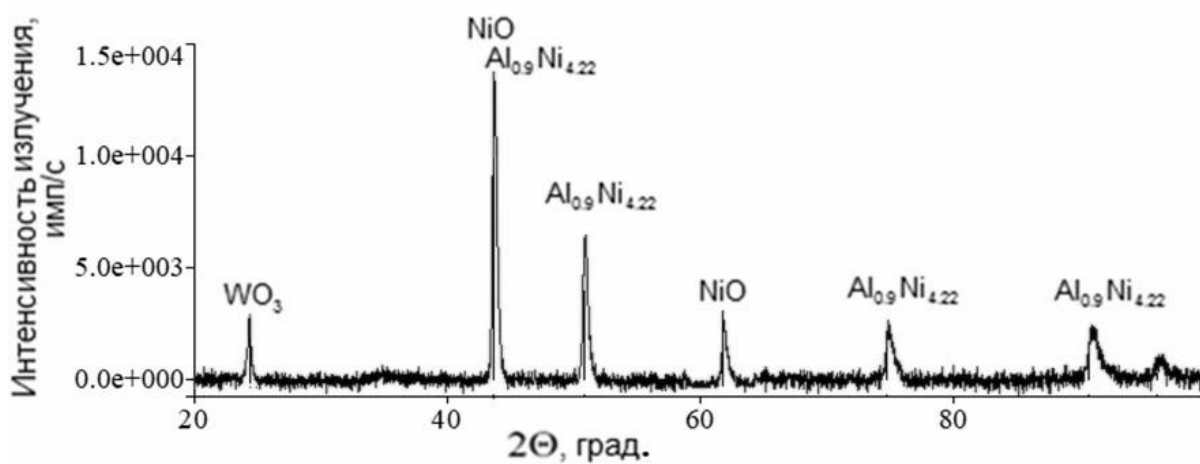
Результаты термического анализа новых жаропрочных сплавов, изготовленных на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в дистиллированной воде и керосине осветительном, полученных при оптимальных режимах представлены на рис. 5. На рисунке синим цветом обозначены кривая термографии (вес образца в % относительно начальной массы), черным пунктиром – дифференциальной термографии (скорость изменения веса, т.е. производная от кривой ТГ по времени), зеленым – кривая дифференциальной сканирующей калориметрии. На кривых ДСК имеют место отчетливые эндотермические пики, соответствующие температуре плавления сплава. Отмечено, что температура плавления исходного сплава ЖС6У составила 1301,7°С, в то время как температура плавления новых жаропрочных сплавов, изготовленных на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в воде дистиллированной и керосине осветительном составила 1363,8°С и 1375,5°С соответственно.



а)

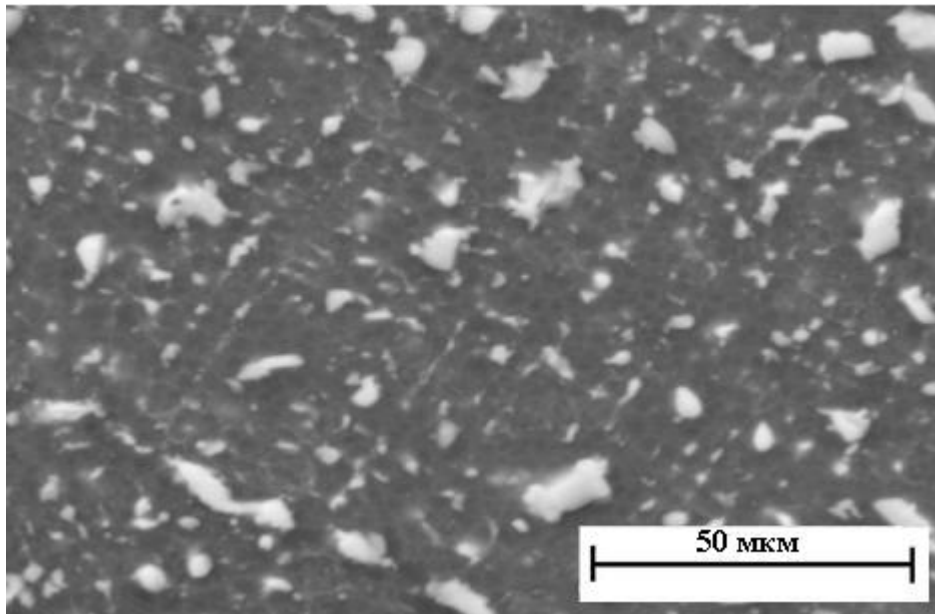


б)

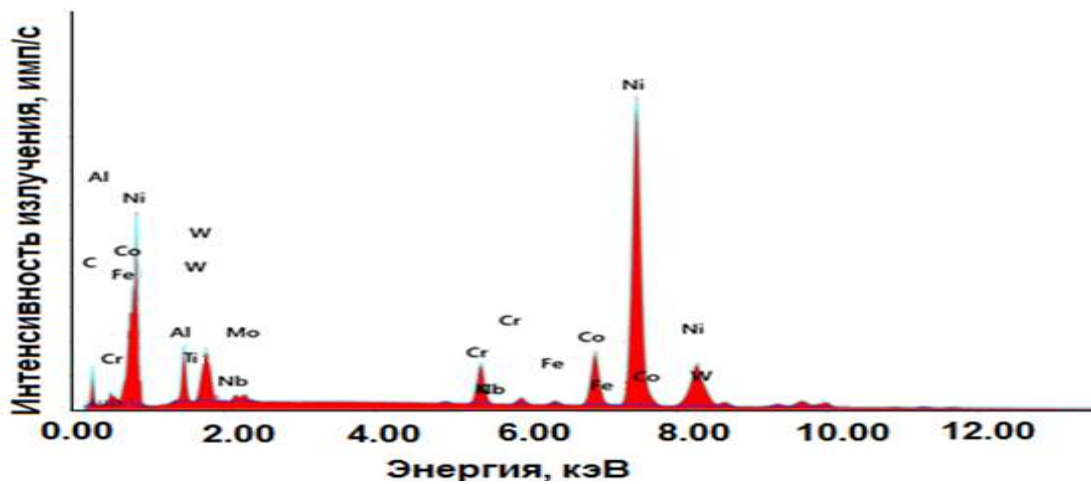


в)

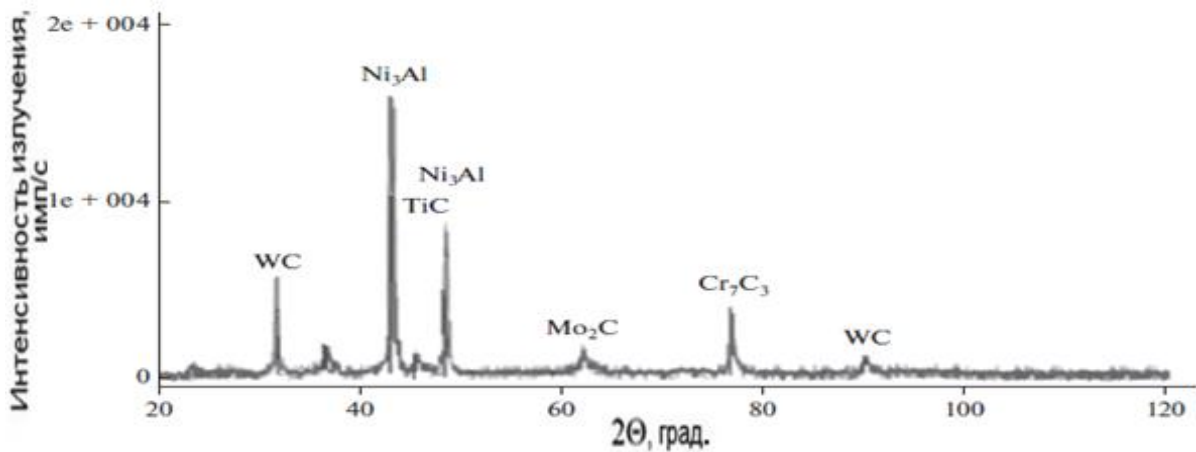
Рисунок 3 – Результаты металлографических исследований жаропрочного сплава из диспергированных электроэрозией частиц в дистиллированной воде:
а) микроструктура; б) элементный состав; в) фазовый состав



а)

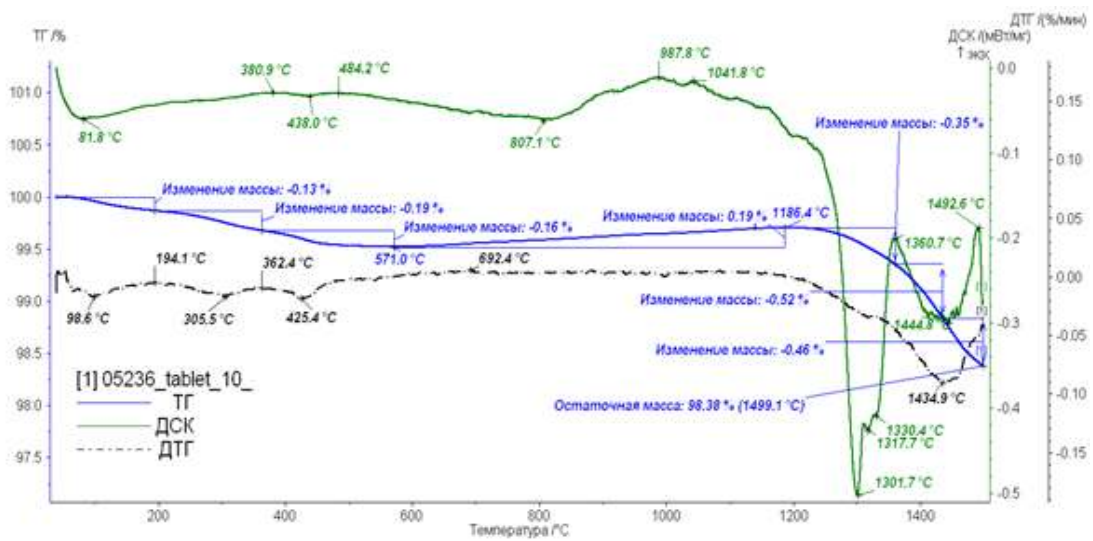


б)

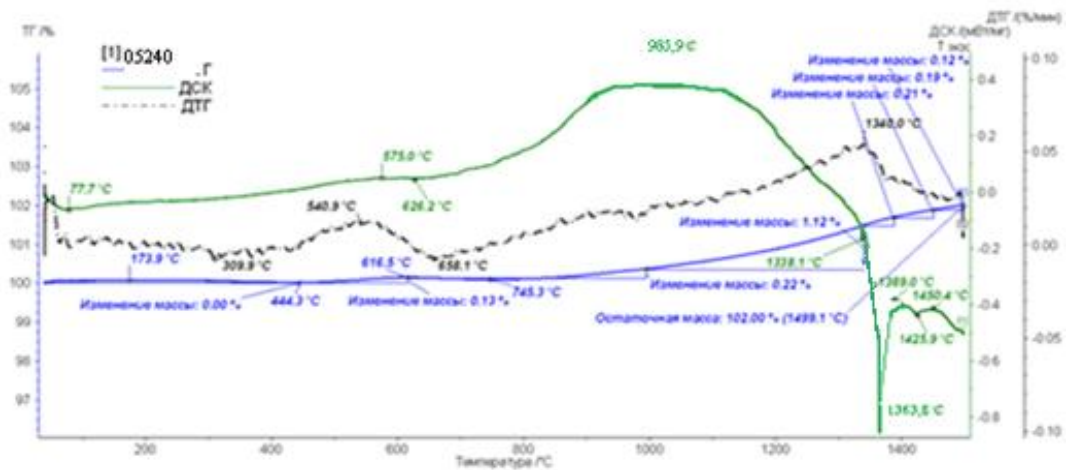


в)

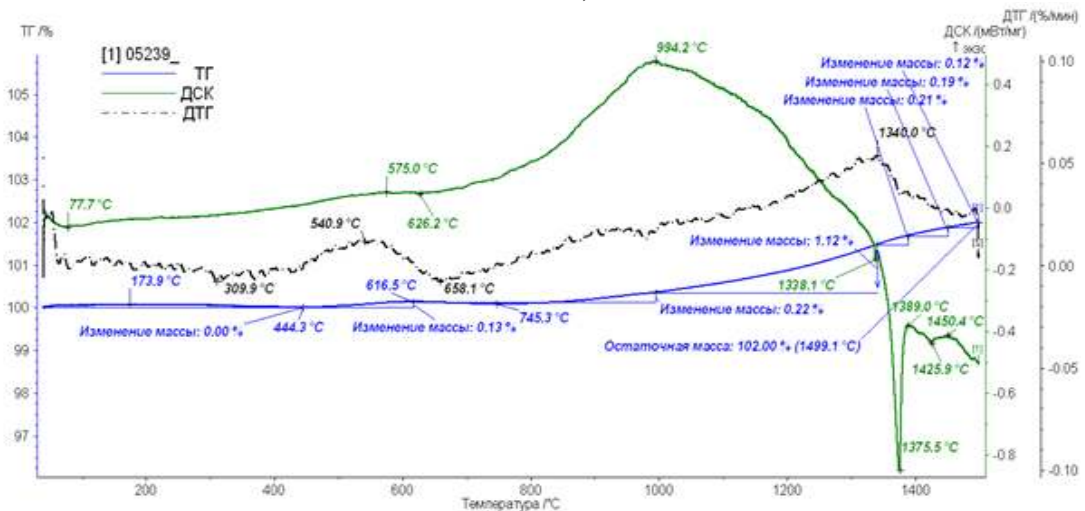
Рисунок 4 – Результаты металлографических исследований жаропрочного сплава из диспергированных электроэрозией частиц в дистиллированной воде:
а) микроструктура; б) элементный состав; в) фазовый состав



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Результаты термического анализа сплавов: а) исходного ЖС6У; б) нового сплава, полученного на основе диспергированных частиц сплава ЖС6У в воде дистиллированной; в) нового сплава, полученного на основе диспергированных частиц сплава ЖС6У в керосине осветительном

Обобщенные данные по результатам исследования свойств жаропрочных сплавов представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Обобщенные данные по результатам исследования свойств новых жаропрочных сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У в дистиллированной воде и осветительном керосине

Исследуемый параметр	Жаропрочные сплавы, полученные		
	Из диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У		Из промышленно применяемой шихты
	В воде дистиллированной	В керосине осветительном	
	Полученные искровым плазменным сплавлением		Литьем
Температура плавления, °С	1363,8	1375,5	1301,7
Размер зерна, мкм	0,45	0,43	3,5
Пористость, %	0,52	0,44	1
Плотность, г/см ³	8,5	8,6	8,4
Микротвердость, ГПа	4,42	4,508	3,40
Предел длительной прочности σ_{100}^{950} , МПа	261	294	238
Рекомендуемая область применения	При изготовлении сопел, турбинных лопаток, а также других термонагруженных элементов ГТД.		

Отмечено, что новые жаропрочные сплавы из диспергированных электроэрозией частиц жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, 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 промышленными сплавами ЖС6У. Это достигается за счет получения практически беспористой структуры жаропрочного сплава с субмикронным зерном и соответствующим фазовым составом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача, направленная на исследование, разработку и апробацию новых жаропрочных сплавов, полученных искровым плазменным спеканием электроэрозионных частиц сплава ЖС6У, имеющая важное значение для металловедения жаропрочных сплавов и развития страны в целом. Реновация высоколегированного сплава ЖС6У способствует ресурсосбережению, импортозамещению и обеспечению технологического суверенитета РФ.

1. Разработан способ получения жаропрочного сплава, отличающийся

тем, что он получается искровым плазменным спеканием диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У при температуре 1400 °С, давлении 40 МПа и времени выдержки 10 мин. в воде дистиллированной (решение о выдаче патента на изобретение РФ от 16.10.2023 по заявке 2022129595) и при температуре 1380 °С, давлении 40 МПа и времени выдержки 5 мин. в керосине осветительном (заявка на изобретение РФ 2023103776).

2. Разработана шихта для производства жаропрочных сплавов, содержащая частицы титана, никеля и молибдена, отличающаяся тем, что она содержит упомянутые частицы, полученные электроэрозией отходов сплава ЖС6У в дистиллированной воде (патент на изобретение РФ 2779730) и в керосине осветительном (патент на изобретение РФ 2784145).

3. Установлены сравнительные характеристики физико-механических свойств между сплавами из диспергированных электроэрозией частиц в воде дистиллированной, изготовленным искровым плазменным спеканием при температуре 1400 °С, давлении 40 МПа и времени выдержки 10 мин., и сплавом ЖС6У, изготовленным промышленным способом, показавшие:

- в 7,7 раза меньший размер зерна;
- в 1,9 раза меньшую пористость;
- в 1,3 раза большую микротвердость;
- в 1,04 раза большую температуру плавления;
- в 1,1 раза больший предел длительной прочности.

4. Установлены сравнительные характеристики физико-механических свойств между сплавами из диспергированных электроэрозией частиц в керосине осветительном, изготовленным искровым плазменным спеканием при температуре 1380 °С, давлении 40 МПа и времени выдержки 5 мин., и сплавом ЖС6У, изготовленным промышленным способом, показавшие:

- в 8,1 раза меньший размер зерна;
- в 2,2 раза меньшую пористость;
- в 1,32 раза большую микротвердость;
- в 1,05 раза большую температуру плавления;
- в 1,23 раза больший предел длительной прочности.

5. Разработанные технологии и жаропрочные сплавы апробированы и внедрены в ООО «РУ46» г. Курск. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составит более 0,5 млн. руб. в год. Материалы исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» при изучении дисциплины «Теория и технологии новых материалов» (3 курс направления подготовки аспирантов 22.06.01 «Технологии материалов» направленность «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»).

6. Перспективами дальнейшего использования полученных результатов является широкое применение в промышленности новых сплавов, полученных искровым плазменным спеканием электроэрозионных частиц сплава ЖС6У.

**Основные положения и результаты диссертации опубликованы
в следующих работах**

Монографии

1. Агеев, Е.В. Жаропрочные никелевые сплавы на основе электроэрозионного порошка, полученного из отходов сплава ЖС6У в воде: монография / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.О. Поданов. Курск: Планета+, 2023. – 212 с.

2. Агеев, Е.В. Состав, структура и свойства жаропрочных никелевых сплавов, изготовленных на основе электроэрозионного порошка, полученного из отходов сплава ЖС6У в керосине: монография / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.О. Поданов. Курск: Планета+, 2023. – 202 с.

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Агеев, Е.В. Микроструктура и элементный состав порошков, полученных в условиях электроэрозионной металлургии отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде / Е.В. Агеев, В.О. Поданов, А.Е. Агеева // Металлург. – 2022. – №5. – С. 72-77.

2. Агеев, Е.В. Размерные характеристики порошков, полученных электродиспергированием сплава ЖС6У в керосине / Е.В. Агеев, О.В. Кругляков, В.О. Поданов // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Металлургия. – 2022. – №7 (266). – С. 62-66.

3. Агеев, Е.В. Исследование влияния среды диспергирования на свойства жаропрочных порошков, полученных из отходов сплава ЖСУ6 / Е. В. Агеев, В. И. Серебровский, В. О. Поданов, А. Е. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. –2022. –Т. 12. – №3. –С. 39-56.

4. Агеев, Е.В. Оптимизация процесса изготовления жаропрочного никелевого сплава путем искрового плазменного спекания порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов ЖС6У в воде / Е. В. Агеев, В.О. Поданов, А. Е. Агеева // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – № 4. – С. 170-174.

5. Агеев, Е.В. Изучение микроструктуры, легирующих элементов и распределения фаз в образцах сплава ЖС6У, спеченных из порошков электроэрозионного диспергирования отходов / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.О. Поданов М.И. Силенский // Электрометаллургия. – 2023. – № 4. – С. 34-38.

6. Агеев, Е.В. Исследование микротвердости и износостойкости жаропрочных сплавов, полученных искровым плазменным спеканием электроэрозионных порошков сплава ЖС6У / Е.В. Агеев, О.В. Кругляков, В.О. Поданов // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Металлургия. – 2023. – № 7 (278). – С. 30-35.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования WoS и Scopus

1. Ageev, E.V. Dimensional analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U in water / E.V. Ageev, A.E. Gvozdev, E.A. Protopopov, V.O. Podanov, A.E. Ageeva // *Chebyshevskiiisbornik*. – 2022. – Vol. 23. – No. 1. – Pp. 197–207.
2. Ageev, E.V. Microstructure and elemental composition of powders obtained under conditions of electroerosive metallurgy of heat-resistant nickel alloy ZHS6U wastes in water / E.V. Ageev, V.O. Podanov, A.E. Ageeva // *Metallurgist*. – Vol. 66. – Nos. 5-6. – Pp. 578-585.
3. Ageev, E.V. Mathematical optimization of the average particle size of powders obtained by electroerosive dispersion of heatresistant nickel alloy ZHS6U / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, A.E. Gvozdev, E.A. Protopopov, V.O. Podanov // *Chebyshevskiiisbornik*. – 2022. – Vol. 23. – No. 3. – Pp. 178–193.
4. Ageeva, E.V. X-Ray Methods for Studying Powders Produced by Electrical Dispersion of the Waste Products of ZhS6U Heat-Resistant Nickel Alloy in Kerosene / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, V.O. Podanov // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2023. – Vol. 17. – No. 1. – Pp. 168–173.
5. Ageeva, E.V. Microstructure, Alloying Elements, and Phase Distribution in ZhS6U Alloy Samples Sintered from the Powders Fabricated by Electroerosion Dispersion of Waste / E.V. Ageeva, E.V. Ageeva, V.O. Podanov, M.I. Silenskii // *Russian Metallurgy (Metally)*. – Vol. 2023. – No. 6. – Pp. 847–850.

Публикации в изданиях РИНЦ

1. Агеев, Е.В. Исследование элементного состава частиц порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в воде / Агеева Е.В., Поданов В.О., Хорьякова Н.М., Пикалов С.В., Новиков Е.П., Сабельников Б.Н., Переверзев А.С., Королев М.С., Бридский А.В. // *Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. 7-й Всерос. науч.-техн. конф. Курск, 2022.* – С. 18-22.
2. Агеева, Е.В. Исследование фазового состава частиц порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в воде / Агеева Е.В., Поданов В.О., Хорьякова Н.М., Пикалов С.В., Новиков Е.П., Сабельников Б.Н., Королев М.С., Бридский А.В. // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. ст. 17-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2022.* – С. 50-54.
3. Агеева, Е.В. Гранулометрический состав порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в воде / Агеева Е.В., Поданов В.О., Хорьякова Н.М., Пикалов С.В., Новиков Е.П., Сабельников Б.Н., Королев М.С., Бридский А.В. // *Электроэнергетика сегодня и завтра: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2022.* – С. 25-29.
4. Агеева, Е.В. Форма и морфология частиц порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в воде / Агеева Е.В., Поданов В.О., Хорьякова

Н.М., Пикалов С.В., Новиков Е.П., Сабельников Б.Н., Королев М.С., Бридский А.В. // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. ст. 12-й Всерос. науч.-техн. конф. Курск, 2022. – С. 29-33.

5. Агеева, Е.В. Исследование фазового состава частиц порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в керосине / Агеева Е.В., Поданов В.О., Хорьякова Н.М., Пикалов С.В., Новиков Е.П., Сабельников Б.Н., Королев М.С., Бридский А.В. // Перспективные материалы науки, технологий и производства: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2022. – С. 28-32.

6. Агеева, Е.В. Рентгеноспектральный микроанализ частиц порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в керосине / Агеева Е.В., Поданов В.О., Хорьякова Н.М., Пикалов С.В., Новиков Е.П., Сабельников Б.Н., Королев М.С., Бридский А.В. // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. науч. тр. 11-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2022. – С. 36-40.

7. Агеева, Е.В. Гранулометрический состав порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в керосине / Агеева Е.В., Алтухов А.Ю., Поданов В.О., Гэн Я. // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов: сб. науч. ст. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. – С. 35-39.

8. Агеев, Е.В. Форма и морфология частиц порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в керосине / Е. В. Агеев, В. О. Поданов // Современные материалы, техника и технологии. – №4 (43). – С. 4-12.

9. Агеев, Е.В. Микроструктура и элементный состав порошков, полученных электродиспергированием отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в керосине / Агеев Е.В., Поданов В.О., Агеева А.Е. // Прогрессивные технологии и процессы: сб. науч. ст. 9-й Всерос. науч.-техн. конф. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. – С. 15-19.

10. Агеев, Е.В. Исследование коэффициента элонгации частиц никелевых порошков, полученных в условиях электроэрозионной металлургии отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в керосине/ Агеев Е.В., Поданов В.О., Агеева А.Е. // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сб. науч. ст. 12-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. – С. 19-23.

11. Агеев, Е.В. Исследование удельной площади поверхности частиц никелевых порошков, полученных в условиях электроэрозионной металлургии отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в керосине / Агеев Е.В., Поданов В.О., Агеева А.Е. // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2022): сб. науч. ст. 14-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. – С. 44-48.

12. Агеев, Е.В. Размер зерна жаропрочного сплава, изготовленного из никелевого порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в воде/ Е. В. Агеев, О.В. Кругляков, В. О. Поданов // Современные материалы, техника и технологии. 2023. – №1 (46). – С. 5-11.

13. Агеева, Е.В. Рентгеноспектральный микроанализ жаропрочного сплава, изготовленного из порошков, полученных электродиспергированием сплава

ЖС6У в керосине / Агеева Е.В., Поданов В.О., Хорьякова Н.М., Пикалов С.В., Новиков Е.П., Сабельников Б.Н., Королев М.С. // Электроэнергетика сегодня и завтра: сб. ст. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. в 2-х Томах. Курск, 2023. – Т.1. – С. 30-35.

14. Агеева, Е.В. Рентгеноструктурный анализ жаропрочного сплава, изготовленного из порошков, полученных электродиспергированием сплава ЖС6У в керосине / Агеева Е.В., Поданов В.О., Хорьякова Н.М., Пикалов С.В., Новиков Е.П., Сабельников Б.Н., Королев М.С. // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. Всерос. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2023. – С. 49-54.

15. Агеев, Е.В. Элементный состав жаропрочного сплава, изготовленного из никелевого порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в воде / Е. В. Агеев, О.В. Кругляков, В. О. Поданов // Современные материалы, техника и технологии. 2023. – №2 (47). – С. 5-11.

16. Агеева, Е. В. Исследование химсостава жаропрочных сплавов методом рентгенофлуоресцентного анализа на примере турбинной лопатки / Е. В. Агеева, В. О. Поданов, Ю. С. Воробьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2020. – Т. 10, № 4. – С. 35-47.

17. Агеев, Е.В. Твердость жаропрочного сплава, изготовленного из никелевого порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в воде / Е.В. Агеев, О.В. Кругляков, В.О. Поданов // Технологии и техника: пути инновационного развития: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2023. – С. 47-51.

18. Агеев, А.Е. Термический анализ сплава, изготовленного из никелевого порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У / Агеева А.Е., Поданов В.О., Агеев Е.В. // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов: сб. науч. ст. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2023. – С. 18-22.

19. Поданов, В.О. Оценка жаропрочности новых сплавов, полученных из отходов сплава ЖС6У электроэрозионным диспергированием / Поданов В.О., Агеев Е.В. // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов: сб. науч. ст. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2023. – С. 123-127.

20. Агеев, Е.В. Пористость жаропрочного сплава, изготовленного искровым плазменным спеканием никелевого порошка, полученного электродиспергированием сплава ЖС6У в воде / Е. В. Агеев, О.В. Кругляков, В. О. Поданов // Вестник СибГИУ. 2023. – №1 (43). – С. 98-103.

Патентные документы и заявки на изобретения

1. Пат. 2779730 Российская Федерация, МПК51 С1. Способ получения жаропрочного никелевого порошка из отходов сплава ЖС6У в воде дистиллированной / Е.В. Агеев, В.О. Поданов, А.Е. Агеева; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2021136462; заявл. 22.02.2022; опубл. 12.09.2022. Бюл. № 26.

2. Пат. 2784145 Российская Федерация, МПК51 С1. Способ получения жаропрочного никелевого порошка из отходов сплава ЖС6У в керосине осветительном / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.О. Поданов; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2022123600; заявл. 05.09.2022; опубл. 23.11.2022. Бюл. № 33.

3. Решение о выдаче патента на изобретение РФ от 16.10.2023 по заявке 2022129595 от 15.11.2022. Способ изготовления жаропрочного никелевого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов сплава ЖС6У в дистиллированной воде.

4. Заявка на изобретение РФ 2023103776 от 25.02.2023. Способ изготовления жаропрочного никелевого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов сплава ЖС6У в осветительном керосине.

Подписано в печать «__» _____ 2023 г. Формат 60x84 1/16.

Печ. л. _____. Тираж 100 экз. Заказ ____.

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