

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию

Поданова Вадима Олеговича «Разработка и исследование жаропрочных сплавов на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv i spлавов

### **1. Актуальность темы диссертационного исследования**

Тема диссертационного исследования, безусловно актуальна, поскольку реновация высоколегированных сплавов, в том числе и жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, будет способствовать ресурсосбережению, импортозамещению и обеспечению технологического суверенитета РФ. Помимо того, актуальность работы подтверждается ее выполнением в рамках гранта Президента РФ (НШ-596.2022.4).

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 металлургических исследований.

### **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе**

Общие выводы по диссертации доказывают положения, выносимые на защиту.

В первом выводе работы отмечен разработанный 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).

Во втором выводе работы отмечена 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).

В третьем выводе работы представлены установленные 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.

В четвертом выводе работы представлены установленные 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.

В пятом выводе работы отмечено, что 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»).

В шестом выводе работы отмечены перспективы дальнейшего использования полученных результатов является широкое применение в промышленности новых сплавов, полученных искровым плазменным спеканием электроэрозионных частиц сплава ЖС6У.

### **3. Научная новизна и достоверность**

Научная новизна работы состоит в следующем:

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 диспергированные 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 электрического тока 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 ЖСБУ. Это достигается за счет получения практически беспористой структуры жаропрочного сплава с субмикронным зерном и соответствующим фазовым составом.

Достоверность научной новизны обеспечивается тем, что при решении поставленных задач использовались современные методы испытаний и исследований, в том числе: гранулометрический состав и средний размер частиц исследован на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес»; форма и морфология поверхности частиц исследованы на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG»; рентгеноспектральный микроанализ частиц и сплавов проведен на энерго-дисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы «EDAX»; рентгеноструктурный (фазовый) анализ частиц и сплавов выполнен на рентгеновском дифрактометре «Rigaku Ultima IV»; сплавление частиц осуществлено на установке SPS 25-10 ThermalTechnology; микроструктуру, пористость, размер зерна сплавов исследованы с помощью оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51», оснащенного системой автоматизированного анализа изображений «SIAMSPhotolab»; микротвердость сплавов определена на микротвердомере DM-8; термический анализ сплавов проведен на приборе синхронного термоанализа STA 449 C JupiterNETZSCH; жаропрочность определена при помощи испытательной машины ATS 2330 CC-230 и др.

#### **4. Оценка содержания 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.

Автореферат диссертации представлен на 24 страницах и включает в себя общую характеристику работы, содержание работы, основные результаты работы и список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации.

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.

В первой главе представлен анализ областей применения жаропрочных сплавов, анализ технологии производства и анализ состояния проблемы переработки отходов жаропрочных сплавов, в том числе сплава ЖСБУ.

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.

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

### **Замечания по работе:**

1. В работе перерабатываются металлоотходы сплава ЖС6У, но не указана их предельная масса.

2. В тексте диссертации не представлены результаты исследования влияния расстояния между электродами на скорость электродиспергирования отходов жаропрочного сплава марки ЖС6У и свойства электроэрозионной шихты.

3. В работе не представлены расчетные данные об экономической эффективности от использования предложенного метода измельчения металлоотходов.

Отмеченные замечания не снижают научную новизну и практическую ценность диссертационной работы.

## **5. Заключение**

Диссертационная работа «Разработка и исследование жаропрочных сплавов на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава ЖС6У» по тематике, содержанию и результатам соответствует области исследования по 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, а также п. 9...11, 13, 14 «Положение о порядке присуждения учёных степеней» Постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (в ред. от 26.10.2023 г.), а ее автор, Поданов Вадим Олегович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент  Овчинников Виктор Васильевич

Ученая степень Доктор технических наук

Ученое звание Профессор

Шифр

специальности, по  
которой защищена  
диссертация

05.03.06 «Технологии и машины сварочного  
производства»

Основное место  
работы (полное  
наименование  
организации)

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский политехнический университет»

Наименование  
структурного  
подразделения

Кафедра материаловедения

Должность

Заведующий кафедрой

Почтовый адрес

107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38

Адрес электронной  
почты

[vikov1956@mail.ru](mailto:vikov1956@mail.ru)

Телефон

8(962)967-55-11

Подпись Овчинникова Виктора Васильевича удостоверяю

24.11.2023г.

ДЕЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬ  
ПОГОРЕЛОВА А.В.

