

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 23. Выпуск 1.

УДК 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-1-197-208

Математический размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде¹

Е. В. Агеев, А. Е. Гвоздев, Е. А. Протопопов, В. О. Поданов, А. Е. Агеева

Агеев Евгений Викторович — доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Протопопов Евгений Александрович — кандидат технических наук, старший преподаватель, Тульский государственный университет (г. Тула).

e-mail: pea_12@mail.ru

Поданов Вадим Олегович — аспирант, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

e-mail: vadim.podanov@yandex.ru

Агеева Анна Евгеньевна — Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru

Аннотация

В настоящее время одна из основных проблем использования сплава ЖС6У связана с наличием в его составе дорогостоящих компонентов, таких как Ni, Ti, Mo, Co и др. и необходимостью его повторного использования путем измельчения. Одним из эффективных, но недостаточно изученных металлургических способов измельчения металлоотходов является электродиспергирование. К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения о составе, структуре и свойствах частиц сплава ЖС6У, полученных в условиях электроэрозионной металлургии.

Целью настоящей работы являлось проведение размерного анализа частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде.

Электродиспергирование отходов сплава жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в виде некондиционных «рабочих» лопаток турбины реактивного двигателя самолета осуществляли в воде дистиллированной на оригинальной установке. В результате воздействия кратковременных электрических разрядов в воде образовывались частицы порошка жаропрочного никелевого сплава ЖС6У различного размера. Размерные характеристики частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде, исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec».

На основании проведенных экспериментальных исследований и их математической обработки, установлено, что частицы порошка, полученного электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде, имеют размеры от 0,1 до 285 мкм со средним объемным диаметром 67,1 мкм. Отмечены особенности формирования

¹Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (НШ-596.2022.4).

фракционного состава частиц порошка в процессе электроэрозионной металлургии металлоотходов марки ЖС6У, а именно наличие двух экстремумов размеров частиц 10 мкм и 100 мкм: мелкая фракция (0,1 ... 25,0 мкм) образуется за счет конденсации парообразной фазы и крупная фракция (25,0 ... 300 мкм) образуется за счет конденсации жидкой фазы. Отмечено, что смещение экстремумов размеров частиц, образующихся при кристаллизации парообразной и жидкой фаз, определяется электрическими параметрами работы установки: напряжением на электродах, емкостью разрядных конденсаторов и частотой следования импульсов. Показано, что в порошке, полученном электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде, содержится: 5% частиц с размером до 1,69 мкм; 10% частиц с размером до 3,36 мкм; 25% частиц с размером до 11,71 мкм; 50% частиц с размером до 50,07 мкм; 75% частиц с размером до 99,02 мкм; 90% частиц с размером до 165,74 мкм; 95% частиц с размером до 210,72 мкм; 99% частиц с размером до 281,09 мкм включительно. При этом удельная площадь поверхности порошка составляет $7994 \text{ см}^2/\text{см}^3$.

Ключевые слова: отходы жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, электроэрозионное диспергирование, частицы порошка, размерные характеристики.

Библиография: 25 названий.

Для цитирования:

Е. В. Агеев, А. Е. Гвоздев, Е. А. Протопопов, В. О. Поданов, А. Е. Агеева. Математический размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде // Чебышевский сборник, 2022, т. 23, вып. 1, с. 197–208.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 23. No. 1.

UDC 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-1-197-208

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

Ageev Yevgeniy Viktorovich — doctor of technical sciences, professor, Southwestern State University (Kursk).

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Gvozdev Aleksander Evgenyevich — doctor of technical sciences, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Protopopov Yevgeniy Aleksandrovich — candidate of technical sciences, Tula State University (Tula).

e-mail: pea_12@mail.ru

Podanov Vadim Olegovich — postgraduate student, Southwest State University (Kursk)

e-mail: vadim.podanov@yandex.ru

Ageeva Anna Evgenievna — Southwestern State University (Kursk)

e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru

Currently, one of the main problems of using the ZhS6U alloy is associated with the presence of expensive components in its composition, such as Ni, Ti, Mo, Co, etc. and the need to reuse it by grinding. One of the effective, but insufficiently studied metallurgical methods of grinding metal waste is electrodispersion. To date, in the modern scientific and technical literature there is no complete information about the composition, structure and properties of the particles of the ZhS6U alloy obtained in the conditions of electroerosive metallurgy.

The purpose of this work was to conduct a dimensional analysis of powder particles obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZhS6U in water.

Electrodispersion of the waste of the heat-resistant nickel alloy ZHS6U in the form of substandard "working" turbine blades of the jet engine of the aircraft was carried out in distilled water at the original installation. As a result of exposure to short-term electrical discharges, particles of heat-resistant nickel alloy ZHS6U powder of various sizes were formed in the water. The dimensional characteristics of the powder particles obtained by electroerosive dispersion of the heat-resistant nickel alloy ZHS6U in water were studied using a laser particle size analyzer "Analysette 22 NanoTec".

Based on the conducted experimental studies, it was found that the powder particles obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U in water have sizes from 0.1 to 285 microns with an average volumetric diameter of 67.1 microns. The features of the formation of the fractional composition of powder particles in the process of electroerosive metallurgy of metal waste of the ZhS6U brand are noted, namely, the presence of two extremes of particle sizes of 10 microns and 100 microns: a small fraction (0.1 ... 25.0 microns) is formed due to condensation of the vapor phase and a large fraction (25.0 ... 300 microns) is formed due to condensation of the liquid phase. It is noted that the displacement of the extremes of the particle sizes formed during the crystallization of the vapor and liquid phases is determined by the electrical parameters of the installation: the voltage on the electrodes, the capacity of the discharge capacitors and the pulse repetition frequency. It is shown that the powder obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U in water contains: 5% particles with a size up to 1.69 microns; 10% particles with a size up to 3.36 microns; 25% particles with a size up to 11.71 microns; 50% particles with a size up to 50.07 microns; 75% particles with a size up to 99.02 microns; 90% of particles with a size up to 165.74 microns; 95% of particles with a size up to 210.72 microns; 99% of particles with a size up to 281.09 microns inclusive. In this case, the specific surface area of the powder is $7994 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$.

Keywords: waste of heat-resistant nickel alloy ZhS6U, electroerosive dispersion, powder particles, dimensional characteristics.

Bibliography: 25 titles.

For citation:

E. V. Ageev, A. E. Gvozdev, E. A. Protopopov, V. O. Podanov, A. E. Ageeva, 2022, "Dimensional analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U in water", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 23, no. 1, pp. 197–208.

1. Введение

В настоящее время жаропрочные сплавы нашли широкое распространение для изготовления лопаток турбин, самым распространенным из них является сплав ЖС6У. Данный сплав имеет предел сточасовой прочности 170...180 МПа при 1000°C [1-4]. Верхний предел рабочих температур сплава ЖС6У составляет 1050...1100°C. Данный сплав обладает очень высокой жаропрочностью, что затрудняет процесс его переработки и повторного использования [5-8].

В настоящее время одна из основных проблем использования сплава ЖС6У связана с наличием в его составе дорогостоящих компонентов, таких как Ni, Ti, Mo, Co и др. и необходимостью его повторного использования путем измельчения [9-12]. Одним из эффективных, но недостаточно изученных металлургических способов измельчения металлоотходов является электродиспергирование [13-17].

К настоящему времени в промышленности данный способ практически не применяется, ввиду отсутствия полноценных комплексных сведений о составе, структуре и свойствах диспергированных электроэрозией частиц, а также сплавов, полученных на их основе. Для этого требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований.

К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения о составе, структуре и свойствах частиц сплава ЖС6У, полученных в условиях электроэрозионной металлургии.

Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему рециклинга отходов сплавов ЖС6У и дальнейшее их использование и, тем самым, снизить себестоимость производства конечного продукта. Помимо того, актуальность рециклинга данного сплава связана с наличием в его составе дорогостоящих компонентов, таких как Ni, Ti, Mo, Co и др.

Целью настоящей работы являлось проведение размерного анализа частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде.

2. Основной текст статьи

Электродиспергирование отходов сплава жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в виде некондиционных «рабочих» лопаток турбины реактивного двигателя самолета (рис. 1) осуществляли в дистиллированной воде на оригинальной установке [18-22, 25].



Рис. 1: Турбинная лопатка из жаропрочного сплава

Блок-схема процесса электроэрозионного диспергирования отходов сплава представлена на рис. 2.

В результате воздействия кратковременных электрических разрядов в воде образовывались частицы порошка жаропрочного никелевого сплава ЖС6У различного размера.

Размерные характеристики частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде, исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес» (Германия). Блок-схема методики исследования гранулометрического состава представлена на рис. 3.

Лазерный анализатор размеров частиц «Analysette 22 NanoТес plus» определяет распределение по размерам частиц в суспензиях и эмульсиях. По сравнению с «классическими» методами измерения – рассеивом, седиментацией либо анализом по изображению, лазерная дифракция обладает рядом важных преимуществ, таких как краткое время анализа, хорошая

воспроизводимость и точность, простая калибровка, большой диапазон измерений и высокая универсальность.

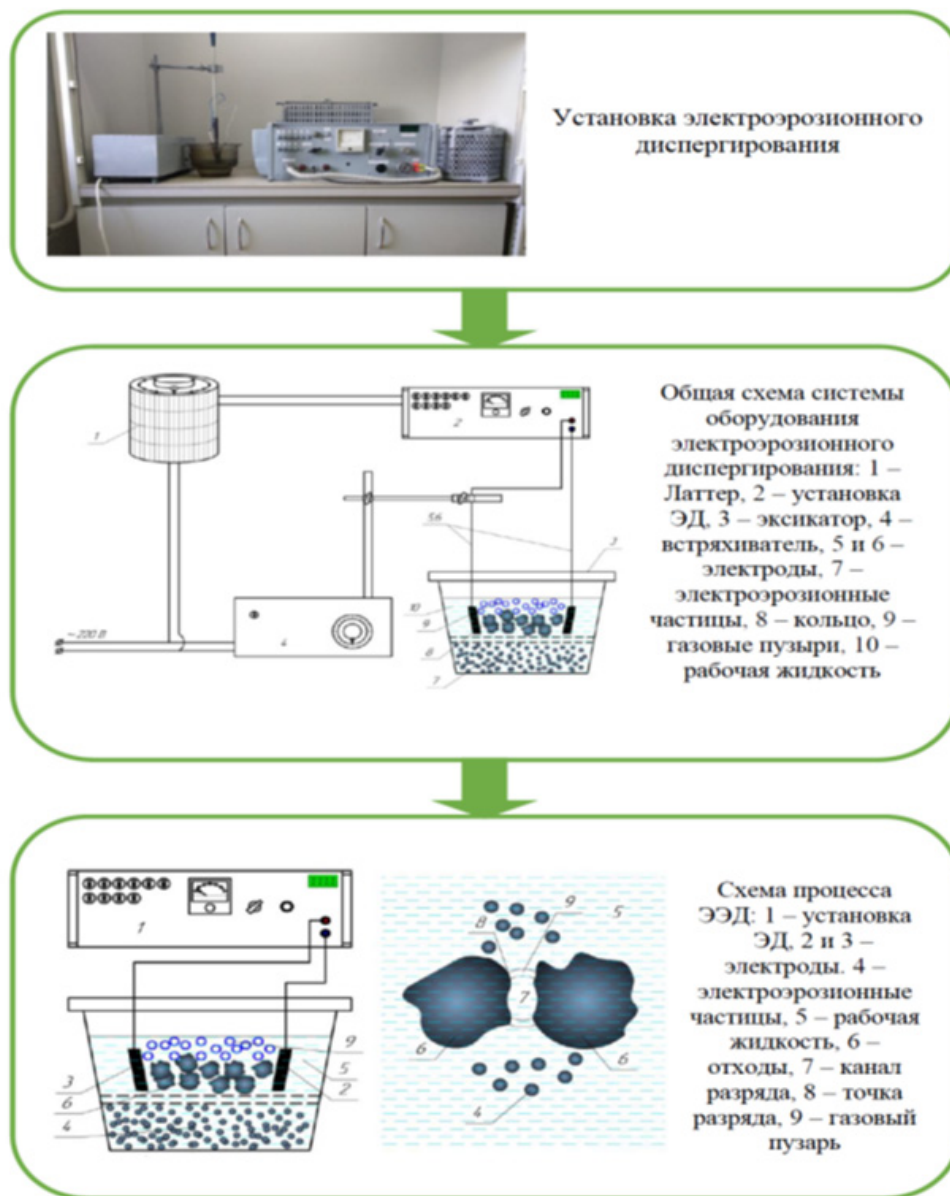


Рис. 2: Блок-схема процесса электродиспергирования металлоотходов

Диапазон измерений «Analysette 22 NanoTec plus» составляет от 0,01 до 2000 мкм. В анализаторах, определяющих распределение частиц по размерам посредством лазерной дифракции, используется физический принцип рассеяния электромагнитных волн. Конструкция состоит из лазера, через измерительную ячейку направленного на детектор. При помощи диспергирующего устройства частицы подаются в измерительную ячейку и проходят сквозь лазерный луч. Свет, рассеянный пропорционально размеру частиц, посредством линзы фокусируется на детектор. По распределению рассеянного света при помощи комплексной математики рассчитывают распределение частиц по их размерам. В результате получают объемные доли, соответствующие эквивалентным диаметрам при лазерной дифракции. Благодаря встроенной ультразвуковой ванне (объем около 500 мл, энергия и частота ультразвука 80 Вт/36 кГц), даже труднодиспергируемые пробы могут анализироваться без применения дополнительно-

го оборудования. Цифровой ультразвуковой генератор всегда поддерживает установленную мощность на оптимальном и постоянном уровне. Нижний предел чувствительности при малых количествах мелких и крупных частиц в распределениях их по размерам (в пределах диапазона измерений) – 3%. Воспроизводимость согласно ISO 13320-1 $d_{50} \leq 1\%$.

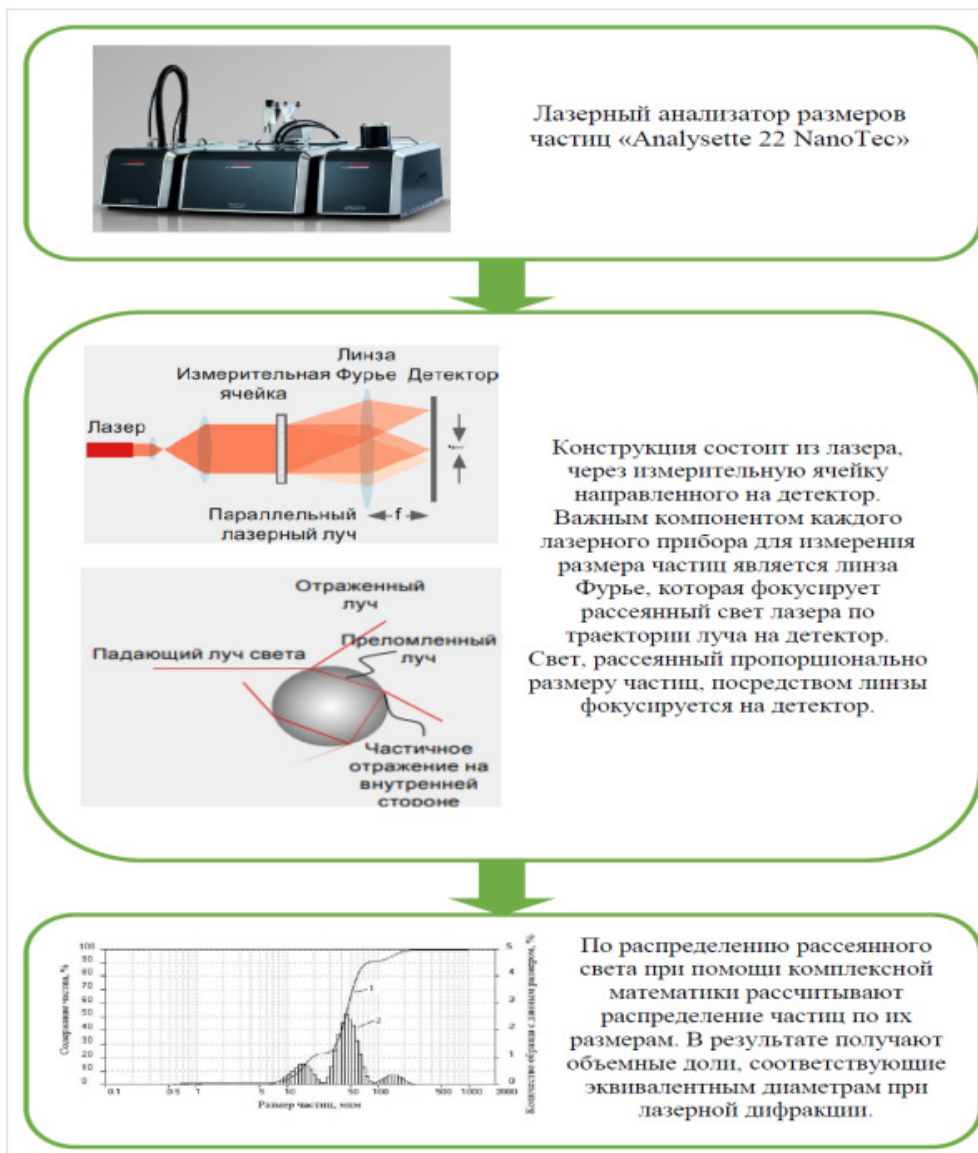


Рис. 3: Блок-схема методики определения среднего размера частиц

3. Результаты и их обсуждение

Экспериментально установлено, что частицы порошка, полученного электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде, имеют размеры от 0,1 до 285 мкм со средним объемным диаметром 67,1 мкм (рис. 4).

Отмечены особенности формирования фракционного состава частиц порошка в процессе электроэрозионной металлургии металлоотходов марки ЖС6У, а именно наличие двух экстремумов размеров частиц 10 мкм и 100 мкм: мелкая фракция (0,1 ... 25,0 мкм) образуется за счет конденсации парообразной фазы и крупная фракция (25,0 ... 300 мкм) образуется за

счет конденсации жидкой фазы.

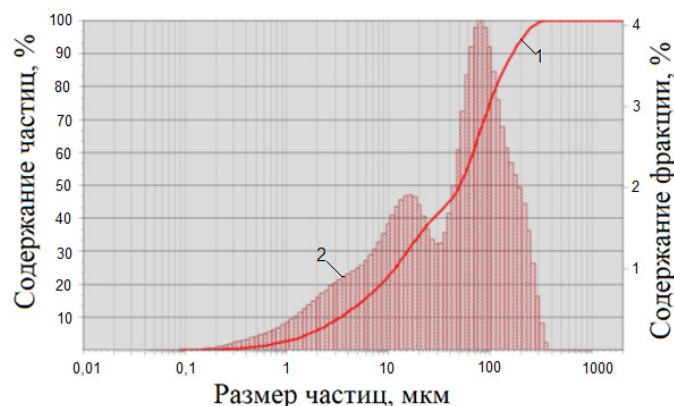


Рис. 4: Интегральная кривая (1) и гистограмма (2) распределения по размерам частиц твердосплавного порошка

Отмечено, что смещение экстремумов размеров частиц, образующихся при кристаллизации парообразной и жидкой фаз, определяется электрическими параметрами работы установки: напряжением на электродах, емкостью разрядных конденсаторов и частотой следования импульсов [23, 24].

Установлена зависимость, показывающая, что средний размер частиц увеличивается с повышением энергии импульса. Получены зависимости, позволяющие выполнить расчетную оценку фракционного состава диспергируемого материала, получаемого в условиях действия электроконтактных тепловых источников.

Размерные характеристики частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде, представлены в табл. 1.

Таблица 1: Размерные характеристики частиц порошка

Размерная характеристика	Величина
D5, мкм	1,69
D10, мкм	3,36
D25, мкм	11,71
D50, мкм	50,07
D75, мкм	99,02
D90, мкм	165,74
D95, мкм	210,72
D99, мкм	281,09
Средний объемный диаметр, мкм	1,69
Модальный диаметр, мкм	79,77
Размах (D90-D10)/D50	3,24
Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{см}^3$	7994

Из представленных данных в табл. 1 видно, что в порошке, полученном электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде, содержится: 5% частиц с размером до 1,69 мкм; 10% частиц с размером до 3,36 мкм; 25% частиц с размером до 11,71 мкм; 50% частиц с размером до 50,07 мкм; 75% частиц с размером до 99,02 мкм; 90% частиц

с размером до 165,74 мкм; 95% частиц с размером до 210,72 мкм; 99% частиц с размером до 281,09 мкм включительно.

При этом удельная поверхность полученного порошка, представляющая сумму наружных поверхностей всех частиц, составляющих единицу его объема, составляет $7994 \text{ см}^2/\text{см}^3$. Данная характеристика порошка, зависящая от размера и формы частиц, а также степени развитости их поверхности, возрастает с уменьшением размера, усложнением формы и увеличением шероховатости поверхности частиц и определяет его свойства и поведение при последующих операциях прессования и спекания.

4. Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на проведение размерного анализа частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде, показана высокая эффективность применения технологии электроэрозионного диспергирования, которая обеспечивает при низких затратах электроэнергии получение порошков, пригодных для практического применения. Отмечены особенности формирования фракционного состава частиц порошка в процессе электроэрозионной металлургии металлоотходов марки ЖС6У, а именно наличие двух экстремумов размеров частиц 10 мкм и 100 мкм: мелкая фракция (0,1 ... 25,0 мкм) образуется за счет конденсации парообразной фазы и крупная фракция (25,0 ... 300 мкм) образуется за счет конденсации жидкой фазы. Помимо того, установлено, что смещение экстремумов размеров частиц, образующихся при кристаллизации парообразной и жидкой фаз, определяется электрическими параметрами работы установки: напряжением на электродах, емкостью разрядных конденсаторов и частотой следования импульсов.

Экспериментально установлено, что частицы порошка, полученного электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде, имеют размеры от 0,1 до 285 мкм со средним объемным диаметром 67,1 мкм и содержат: 5% частиц с размером до 1,69 мкм; 10% частиц с размером до 3,36 мкм; 25% частиц с размером до 11,71 мкм; 50% частиц с размером до 50,07 мкм; 75% частиц с размером до 99,02 мкм; 90% частиц с размером до 165,74 мкм; 95% частиц с размером до 210,72 мкм; 99% частиц с размером до 281,09 мкм включительно. При этом удельная площадь поверхности порошка составляет $7994 \text{ см}^2/\text{см}^3$.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новикова О.В., Кочетков В.А., Виноградов А.И., Жуков А.А., Тихонов А.А., Маринин С.Ф. Применение газоиостатического прессования для повышения эксплуатационной надежности лопаток турбины из жаропрочного сплава типа ЖС6У // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 8. С. 54-56.
2. Курихина Т.В. Кинетика образования интерметаллида на основе Ni3Al в жаропрочном никелевом сплаве ЖС6У // Технология машиностроения. 2017. № 1. С. 5-8.
3. Добрынин Д.А., Алексеева М.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Ремонт деталей горячего тракта газотурбинного двигателя из жаропрочного никелевого сплава марки ЖС6У // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). С. 3-13.
4. Михайленко С.В., Настольная В.В., Бородихин А.С., Голубь Р.С. Исследование производительности обработки жаропрочной стали ЖС6У керамическими пластинами // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 12-1 (68). С. 128-131.

5. Быков Ю.Г., Логунов А.В., Разумовский И.М., Фролов В.С. Изменение плотности сплава ЖС6У в процессе эксплуатации // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. № 7 (625). С. 29-32.
6. Оспенникова О.Г., Орлов М.Р. Повышение свойств жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ путем горячего изостатического прессования и последующей термической обработки // *Материаловедение*. 2007. № 9. С. 32-37.
7. Ерёмин Е.Н., Филиппов Ю.О., Давлеткильдеев Н.А., Миннеханов Г.Н. Исследование структуры сплава ЖС6У методом атомно-силовой микроскопии // *Омский научный вестник*. 2011. № 1 (97). С. 24-29.
8. Еремин Е.Н., Филиппов Ю.О., Маталасова А.Е. Исследование карбидных фаз в сплаве ЖС6У // *Омский научный вестник*. 2014. № 3 (133). С. 59-63.
9. Ерёмин Е.Н., Филиппов Ю.О., Миннеханов Г.Н., Лопаев Б.Е. Исследование фазовых превращений в сплаве ЖС6У методами термического анализа // *Омский научный вестник*. 2013. № 1 (117). С. 63-68.
10. Равилов Р.Г., Петрова М.А., Древняк В.В., Саадатибаи М. Методика оценки долговечности покрытия на лопатках турбины из сплавов ЖС6У и ЖС26ВЧНК // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2015. № 222 (12). С. 201-206.
11. Ageeva E.V., Khor'yakova N.M., Ageev E.V. Morphology of copper powder produced by electrospark dispersion from waste // *Russian Engineering Research*. 2014. Vol. 34(11). P. 694-696.
12. Ageeva E.V., Khor'yakova N.M., Ageev E.V. Morphology and composition of copper electrospark powder suitable for sintering // *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35(1). P. 33-35.
13. Ageeva E.V., Ageev E.V., Latypov R.A. Investigation into the properties of electroerosive powders and hard alloy fabricated from them by isostatic pressing and sintering // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2015. Vol. 56(1). P. 52-62.
14. Ageeva E.V., Ageev E.V., Karpenko V.Y. Nanopowder produced from high-speed steel waste by electrospark dispersion in water // *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35(3). P. 189-190.
15. Latypov R.A., Ageeva E.V., Kruglyakov O.V., Latypova G.R. Electroerosion micro- and nanopowders for the production of hard alloys // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016. Vol. 2016(6). P. 547-549.
16. Latypov R.A., Ageev E.V., Latypova G.R., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. Elemental Composition of the Powder Particles Produced by Electric Discharge Dispersion of the Wastes of a VK8 Hard Alloy // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017. Vol. 2017(12). P. 1083-1085.
17. Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. Manufacture of Cobalt–Chromium Powders by the Electric Discharge Dispersion of Wastes and Their Investigation // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018. Vol. 2018(12). P. 1177-1180.
18. Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. Effect of Temperature on the Porosity of the Additive Products Made of the Dispersed Wastes of Cobalt–Chromium Alloys // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. Vol. 2019(12). P. 1300-1303.

19. Ageev E.V., Altukhov A.Yu., Ageeva E.V., Pykhtin A.I. Structure and mechanical properties of powders obtained by electrodispersing cobalt-chromium alloy // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19(1). P. 230-236.
20. Ageeva E.V., Ageev E.V., Latypov R.A. Properties of the VNZH Pseudoalloy Sintered from Spark Erosion Powders Fabricated in Distilled Water // Russian Metallurgy (Metally). 2021. Vol. 6. P. 119-123.
21. Ageeva E.V., Ageev E.V., Kuzovleva O.V., Gvozdev A.E. Mathematical optimization of the process of electrodispersion of the waste of the alloy of the residence permit // Chebyshevskii Sbornik. 2021. Vol. 22(2). P. 389-401.
22. Ageeva E.V., Ageev E.V., Kuzovleva O.V., Gvozdev A.E. Development of scientific and technological foundations for a new environmentally friendly and waste-free process for grinding conductive waste into micro- and nanofractions powders // Chebyshevskii Sbornik. 2021. Vol. 21(4). P. 314-326.
23. Ageev E.V., Ageeva E.V., Khoryakova N.M. X-Ray methods for studying the surface of powder obtained by electroerosion dispersion of the waste of W-Ni-Fe 95 pseudoalloy in kerosene // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2021. Vol. 15. No. 4. P. 723-727.
24. Ageev E.V., Ageeva E.V. Wear Resistance of Hardened Components Produced from Electro-spark Cobalt-Chromium Powder by Additive Manufacturing // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41. No. 8. P. 731-733.
25. Агеев Е.В., Гвоздев А.Е. Быстрорежущие стали: сверхпластичность и рециклинг: монография // Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2021. 386 с.

REFERENCES

1. Novikova, O.V., Kochetkov, V.A., Vinogradov, A.I., Zhukov, A.A., Tikhonov, A.A. & Marinin, S.F. 2007, "The use of gas-static pressing to improve the operational reliability of turbine blades made of heat-resistant alloy type ZHS6U", *Procurement production in mechanical engineering*, no. 8, pp. 54-56.
2. Kurikhina, T.V. 2017, "Kinetics of formation based on Ni3Al intermetallic compound in heat-resistant nickel alloy ZhS6U", *Technology of mechanical engineering*, no. 1, pp. 5-8.
3. Dobrynin, D.A., Alekseeva, M.S. & Afanasiev-The Khodykin, A.N. 2021, "Repair of the hot gas path of a gas turbine engine from heat-resistant Nickel alloy grade ZHS6U", *Trudy VIAM*, no. 5 (99), pp. 3-13.
4. Mikhailenko, S.V., Nastol'naya, V.V., Borodikhin, A.S. & Golub, R.S. 2020, "Investigation of the performance of processing heat-resistant steel ZhS6U with ceramic plates", *Actual scientific research in the modern world*, no. 12-1 (68), pp. 128-131.
5. Bykov, Yu.G., Logunov, A.V., Razumovsky, I.M. & Frolov, V.S. 2007, "The change in the density of alloy ZHS6U in the process of operation", *Metallurgy and heat treatment of metals*, no. 7 (625), pp. 29-32.
6. Ospennikova, O.G. & Orlov, M.R. 2007, "Improving the properties of the heat-resistant alloy ZhS6U-VI by hot isostatic pressing and subsequent heat treatment", *Materials science*, no. 9, pp. 32-37.

7. Eremin, E.N., Filippov, Yu.O., Davletkildeev, N.A. & Minnekhanov, G.N. 2011, "Investigation of the structure of the alloy ZhS6U by atomic force microscopy", *Omsk Scientific Bulletin*, no. 1 (97), pp. 24-29.
8. Eremin, E.N., Filippov, Yu.O. & Matalasova, A.E. 2014, "Investigation of carbide phases in the alloy ZhS6U", *Omsk Scientific Bulletin*, no. 3 (133), pp. 59-63.
9. Eremin, E.N., Filippov, Yu.O., Minnekhanov, G.N. & Lopaev, B.E. 2013, "Investigation of phase transformations in the alloy ZhS6U by methods of thermal analysis", *Omsk Scientific Bulletin*, no. 1 (117), pp. 63-68.
10. Ravilov, R.G., Petrova, M.A., Drevnyak, V.V. & Saadatibai, M. 2015, "Methodology for assessing the durability of the coating on turbine blades made of alloys ZhS6U and ZHS26VSNK", *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 222 (12), pp. 201-206.
11. Ageeva, E.V., Horyakova, N.M. & Ageev, E.V. 2014, "Morphology of copper powder obtained by electric spark dispersion from waste", *Russian Engineering Research*, vol. 34 (11), pp. 694-696.
12. Ageeva, E.V., Horyakova, N.M. & Ageev, E.V. 2015, "Morphology and composition of electric spark copper powder suitable for sintering", *Russian Engineering Research*, vol. 35 (1), pp. 33-35.
13. Ageeva, E.V., Ageev, E.V. & Latypov, R.A. 2015, "Investigation of the properties of electroerosive powders and hard alloys obtained from them by isostatic pressing and sintering", *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, vol. 56 (1), pp. 52-62.
14. Ageeva, E.V., Ageev, E.V. & Karpenko, V.Y. 2015, "Nanopowder obtained from the wastes of high speed steel by electro-spark dispersion in water", *Russian engineering research*, vol. 35 (3), pp. 189-190.
15. Latypov, R.A., Ageeva, E.V., Kruglyakov, O.V. & Latypova, G.R. 2016, "Electroerosion micro- and nanopowders for the production of hard alloys", *Russian metallurgy (Metal)*, vol. 2016 (6), pp. 547-549.
16. Latypov, R.A., Ageev, E.V., Latypova, G.R., Altukhov, A.Y. & Ageeva, E.V. 2017, "Elemental composition of the powder particles produced by electric discharge dispersion of the wastes of a VK8 hard alloy", *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2017 (12), pp. 1083-1085.
17. Latypov, R.A., Ageev, E.V., Altukhov, A.Y. & Ageeva, E.V. 2018, "Manufacture of cobalt–chromium powders by the electric discharge dispersion of wastes and their investigation", *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2018 (12), pp. 1177-1180.
18. Latypov, R.A., Ageev, E.V., Altukhov, A.Y. & Ageeva, E.V. 2019, "Effect of temperature on the porosity of the additive products made of the dispersed wastes of cobalt–chromium alloys", *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2019 (12), pp. 1300-1303.
19. Ageev, E.V., Altukhov, A.Yu., Ageeva, E.V. & Pykhtin, A.I. 2021 "Structure and mechanical properties of powders obtained by electrodispersing cobalt-chromium alloy", *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 19 (1), pp. 230-236.
20. Ageeva, E.V., Ageev, E.V. & Latypov, R.A. 2021, "Properties of the VNZH pseudoalloy sintered from spark erosion powders fabricated in distilled water", *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 6, pp. 119-123.

21. Ageeva, E.V., Ageev, E.V., Kuzovleva, O.V. & Gvozdev, A.E. 2021, “Mathematical optimization of the process of electrodispersion of the waste of the alloy of the residence permit“, *Chebyshevskii Sbornik*, vol. 22 (2), pp. 389-401.
22. Ageeva, E.V., Ageev, E.V., Kuzovleva, O.V. & Gvozdev, A.E. 2021, “Development of scientific and technological foundations for a new environmentally friendly and waste-free process for grinding conductive waste into micro- and nanofractions powders“, *Chebyshevskii Sbornik*, vol. 21 (4), pp. 314-326.
23. Ageev, E.V., Ageeva, E.V. & Khoryakova, N.M. 2021, “X-Ray methods for studying the surface of powder obtained by electroerosion dispersion of the waste of W–Ni–Fe 95 pseudoalloy in kerosene“, *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, vol. 15, no. 4, pp. 723-727.
24. Ageev, E.V. & Ageeva, E.V. 2021, “Wear resistance of hardened components produced from electrospark cobalt–chromium powder by additive manufacturing“, *Russian Engineering Research*, vol. 41, no. 8, pp. 731-733.
25. Ageev, E.V. & Gvozdev, A.E. 2021, *High-speed steels: superplasticity and recycling*, Publishing House of ZAO Universitetskaya kniga, Kursk.

Получено 27.10.2021 г.

Принято в печать 27.02.2022 г.