

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 23. Выпуск 3.

УДК 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-3-178-193

Математическая оптимизация среднего размера частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У¹

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

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

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Агеева Екатерина Владимировна — кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

e-mail: ageeva-ev@yandex.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, 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

Аннотация

В настоящее время одна из основных проблем использования жаропрочного никелевого 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.

Для прогнозирования высоких физико-механических свойств изделий из полученной шихты требовалось провести оптимизацию режимов электроэрозионного диспергирования отходов сплава ЖС6У методом планирования эксперимента. Для шихты со сферической формой частиц одним из основных технологических параметров является оптимальный гранулометрический состав, поэтому оптимизацию процесса получения шихты из отходов сплава ЖС6У проводили по среднему размеру частиц. Электроэрозионное диспергирование отходов сплава ЖС6У осуществляли на экспериментальной установке (Патент РФ № 2449859). В результате воздействия кратковременных электрических разрядов образовывались частицы различного размера. Оптимизация процесса электродиспергирования частиц, полученных ЭЭД отходов сплава ЖС6У, проводилась опытным определением сочетания уровней факторов, при котором достигалось необходимое значение среднего диаметра частиц электроэрозионной шихты. Для этого использовали метод крутого восхождения Бокса и Уилсона. Оптимизация процесса электродиспергирования отходов сплава

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

ЖС6У в дистиллированной воде и осветительном керосине осуществлялась с учетом таких факторов, как напряжение на электродах, емкость разрядных конденсаторов и частота следования импульсов.

Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации по среднему размеру электроэрозионных частиц, которые составили: для дистиллированной воды – 50,4 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц; для осветительного керосина – 58,4 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов жаропрочного никелевого сплава и повторное их использование при изготовлении ответственных деталей машиностроения.

Ключевые слова: отходы жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, электроэрозионное диспергирование, частицы порошка, оптимизация, средний размер частиц.

Библиография: 24 названия.

Для цитирования:

Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, А. Е. Гвоздев, Е. А. Протопопов, В. О. Поданов. Математическая оптимизация среднего размера частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У // Чебышевский сборник, 2022, т. 23, вып. 3, с. 178–193.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 23. No. 3.

UDC 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-3-178-193

Mathematical optimization of the average particle size of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U

E. V. Ageev, E. V. Ageeva, A. E. Gvozdev, E. A. Protopopov, V. O. Podanov

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

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Ageeva Ekaterina Vladimirovna — candidate of technical sciences, Southwestern State University (Kursk).

e-mail: ageeva-ev@yandex.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, Southwestern State University (Kursk).

e-mail: vadim.podanov@yandex.ru

Currently, one of the main problems of using the heat-resistant nickel alloy ZhS6U 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.

In order to predict the high physical and mechanical properties of products from the resulting charge, it was necessary to optimize the modes of electroerosive dispersion of waste of the ZhS6U alloy by the method of experiment planning. For a charge with a spherical particle shape, one of the main technological parameters is the optimal granulometric composition, therefore, the optimization of the process of obtaining the charge from the waste of the ZhS6U alloy was carried out according to the average particle size. The electroerosive dispersion of the waste of the ZhS6U alloy was carried out on an experimental installation (RF Patent No. 2449859). As a result of exposure to short-term electrical discharges, particles of various shapes and sizes were formed. Optimization of the process of electrodispersion of particles obtained by the EED of the waste of the ZhS6U alloy was carried out by experimental determination of a combination of levels of factors at which the required value of the average diameter of the particles of the electroerosion charge was achieved. To do this, the method of steep ascent of Box and Wilson was used. Optimization of the process of electrodispersion of waste of the ZhS6U alloy in distilled water and lighting kerosene was carried out taking into account such factors as the voltage at the electrodes, the capacity of the discharge capacitors and the pulse repetition frequency.

According to the conducted series of experiments, the limiting values of the optimization parameter for the average size of electroerosive particles were determined, which were: for distilled water – 50.4 microns with a capacity of discharge capacitors of 65.5 UF, a voltage at the electrodes of 200 V, a pulse repetition frequency of 200 Hz; for lighting kerosene - 58.4 microns with a capacity of discharge capacitors of 65.5 UF, a voltage at the electrodes of 200 V, a pulse repetition frequency of 200 Hz.

Carrying out the planned measures will solve the problem of recycling heat-resistant nickel alloy waste and their reuse in the manufacture of critical parts of mechanical engineering.

Keywords: waste of heat-resistant nickel alloy ZhS6U, electroerosive dispersion, powder particles, optimization, average particle size.

Bibliography: 24 titles.

For citation:

E. V. Ageev, E. V. Ageeva, A. E. Gvozdev, E. A. Protopopov, V. O. Podanov, 2022, “Mathematical optimization of the average particle size of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U”, *Chebyshevskii sbornik*, vol. 23, no. 3, pp. 178–193.

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 при 1000 °С– 170. . . 180 МПа [1-4]. Верхний предел рабочих температур сплава ЖС6У составляет 1050. . . 1100 °С. 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 дис-

пергированных 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.

Для прогнозирования высоких физико-механических свойств изделий из полученной шихты требовалось провести оптимизацию режимов электроэрозионного диспергирования отходов сплава ЖС6У методом планирования эксперимента. Для шихты со сферической формой частиц одним из основных технологических параметров является оптимальный гранулометрический состав, поэтому оптимизацию процесса получения шихты из отходов сплава ЖС6У проводили по среднему размеру частиц.

Целью настоящей работы являлось проведение математической оптимизации среднего размера частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У.

2. Основной текст статьи

Электродиспергирование отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в виде некондиционных «рабочих» лопаток турбины реактивного двигателя самолета осуществляли на экспериментальной установке (Патент РФ № 2449859) [14-20]. В результате воздействия кратковременных электрических разрядов образовывались частицы жаропрочного никелевого сплава различного размера.

Исследование формы и морфологии поверхности частиц, полученных электродиспергированием отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, проводили на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды). Методика исследования формы частиц представлена в виде блок-схемы на рис. 1.

Средний размер частиц полученной электроэрозионной шихты исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес» (Германия). Блок-схема методики исследования гранулометрического состава представлена на рис. 2.

Для шихты со сферической формой частиц одним из основных технологических параметров является оптимальный гранулометрический состав, поэтому оптимизацию процесса получения шихты из отходов сплава ЖС6У проводили по среднему размеру частиц.

Оптимизацию процессов диспергирования отходов проводили постановкой полного факторного эксперимента (ПФЭ) по среднему размеру получаемых электроэрозионных частиц согласно блок-схемам (рис. 3 и рис. 4).

Задача оптимизации сводится к опытному определению такого сочетания уровней факторов, при котором достигается максимальное (минимальное) значение выходного параметра. Для этого используют метод крутого восхождения Бокса и Уилсона. Блок-схема методики расчета крутого восхождения представлена на рис. 5.

В качестве факторов были выбраны параметры работы установки ЭЭД: напряжение на электродах, емкость разрядных конденсаторов и частота следования импульсов. Оптимальные параметры работы установки определяли для среды воды дистиллированной и керосина осветительного.

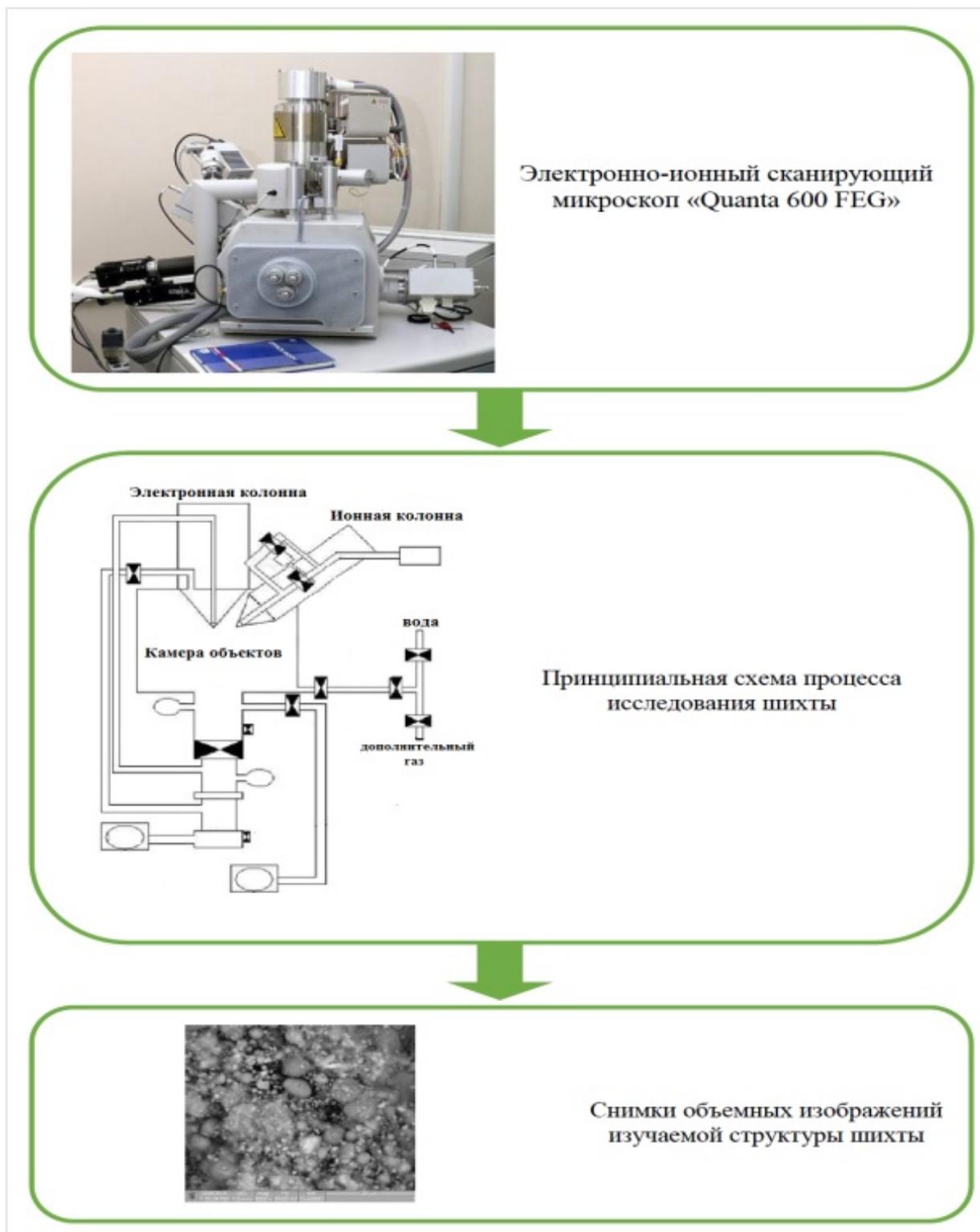


Рис. 1: Блок-схема методики исследования формы и морфологии частиц

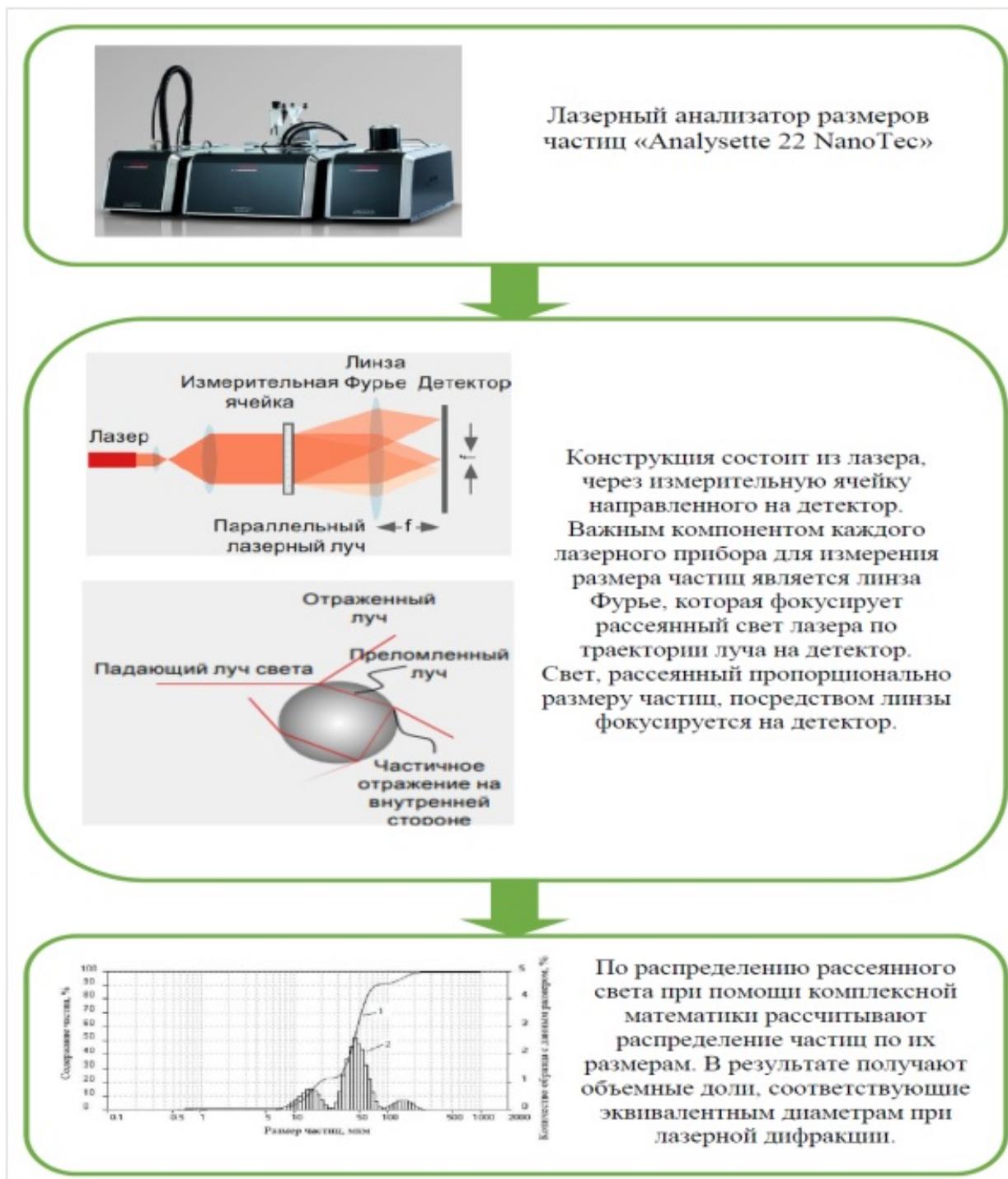


Рис. 2: Блок-схема методики определения среднего размера частиц



Рис. 3: Блок-схема постановки полного факторного эксперимента (1 этап)

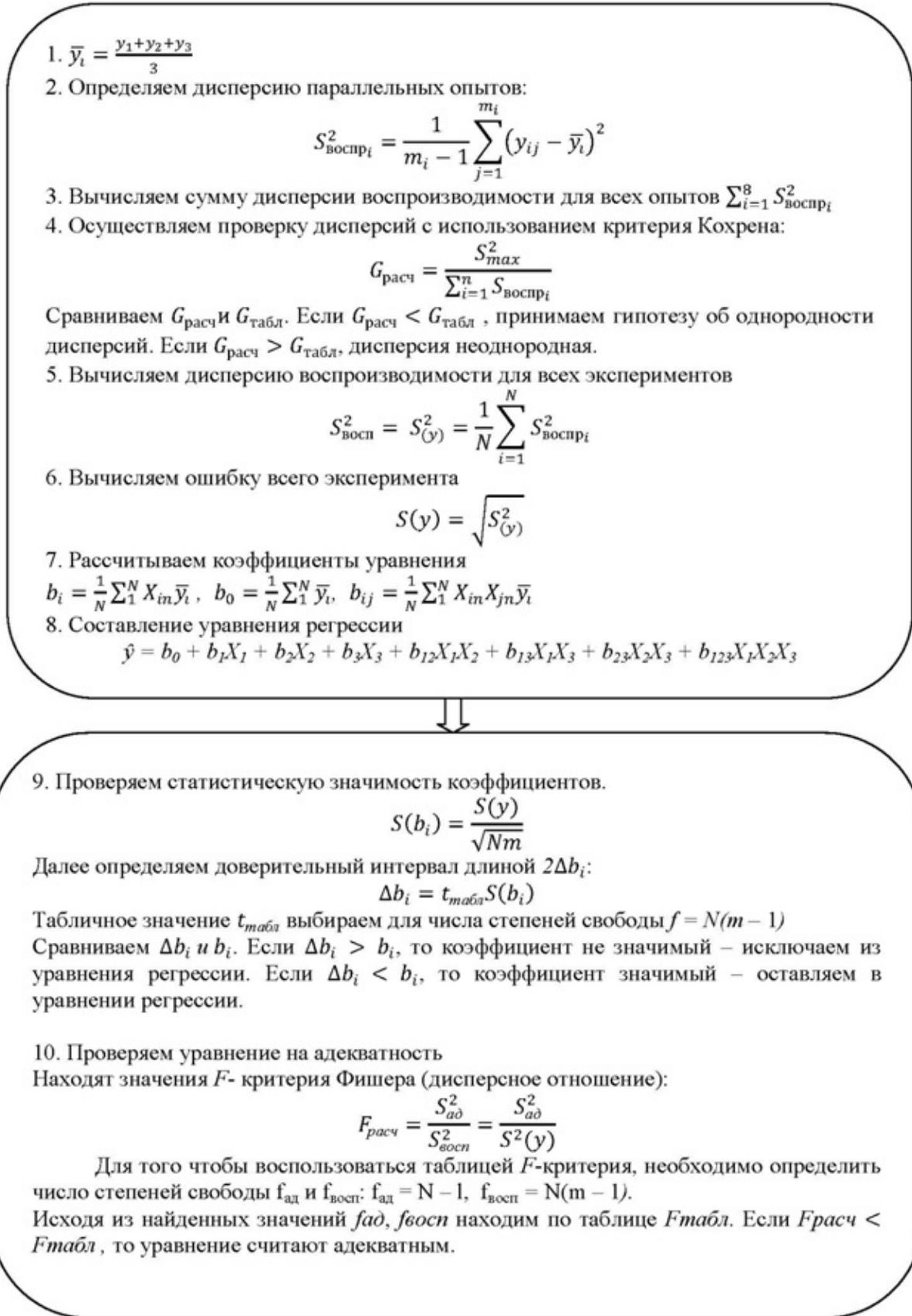


Рис. 4: Блок-схема постановки полного факторного эксперимента (2 этап)



Рис. 5: Блок-схема расчета крутого восхождения

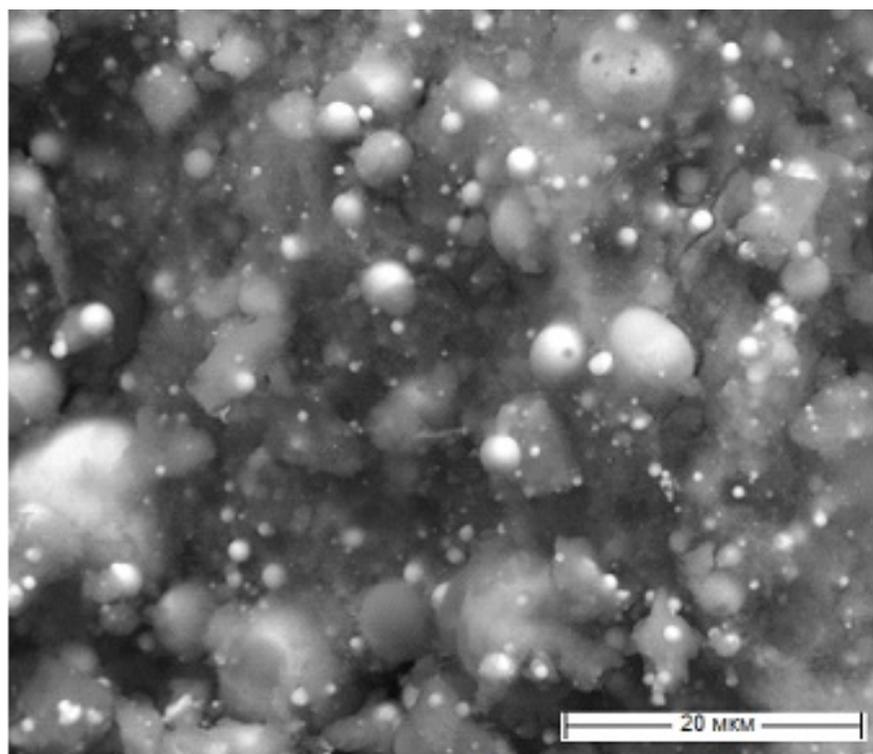
3. Результаты и их обсуждение

Анализ параметров формы частиц электроэрозионной шихты со средним размером 25...100 мкм по изображениям с растрового микроскопа показал, что электроэрозионные частицы жаропрочного никелевого сплава в основном имеют сферическую форму (рис. 6).

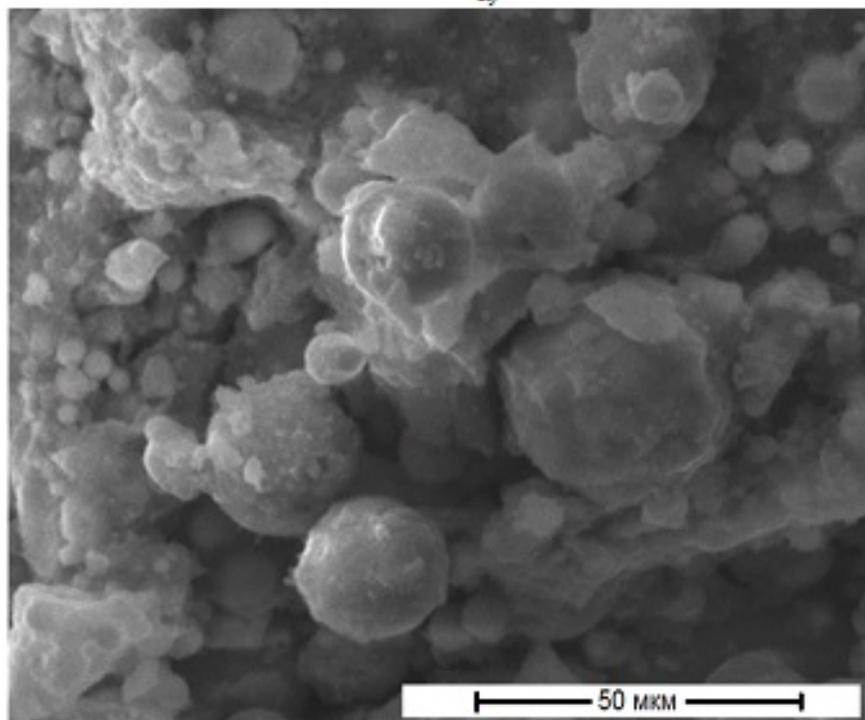
Согласно блок-схемам методики, представленным на рисунках 3-5, были выбраны уровни и интервалы варьирования (табл. 1) и составлены матрицы планирования для экспериментов, проведенных в воде дистиллированной (табл. 2) и керосине осветительном (табл. 3).

Согласно проведенным расчетам, были получены уравнения регрессии, моделирующие полный факторный эксперимент в воде дистиллированной (1) и керосине осветительном (2).

$$\hat{y} = 26,3 + 13,8X_1 + 3,7X_2 + 5,4X_3 + 0,18X_1X_2 + 0,3X_1X_3 + 0,15X_2X_3 + 0,6X_1X_2X_3 \quad (1)$$



а)



б)

Рис. 6: Микрофотография частиц электроэрозионной шихты, полученной: а) в воде дистиллированной; б) керосине осветительном (растровый микроскоп QUANTA 600 FEG)

Таблица 1: Уровни и интервалы варьирования

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

Таблица 2: Матрица планирования эксперимента (вода дистиллированная)

№ п/п	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	Y_3	Y_i	$S^2_{\text{воспр}}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	3,4	3,6	3,8	3,4	0,01
									11,6	11,5	11,4	11,5	0,01
2	+	+	-	-	-	-	+	+	31,6	31,4	30,2	31,1	0,57
									38,7	38,8	38,6	38,7	0,02
3	+	-	+	-	-	+	-	+	11,7	11,9	10,4	11,3	0,66
									21,1	21,3	21,1	21,1	0,02
4	+	+	+	-	+	-	-	-	38,4	36,4	37,8	37,5	0,57
									43,4	42,4	44,1	43,3	0,49
5	+	-	-	+	+	-	-	+	14,2	14,4	15,1	14,6	0,15
									24,6	24,8	25,0	24,8	0,04
6	+	+	-	+	-	+	-	-	41,6	41,2	41,0	41,3	0,09
									51,4	50,8	52,0	51,4	0,36
7	+	-	+	+	-	-	+	-	20,4	20,6	21,0	20,7	0,09
									31,1	30,2	30,1	30,4	0,25
8	+	+	+	+	+	+	+	+	50,1	51,1	50,2	50,5	0,31
									58,1	58,2	58,1	58,1	0,01

$$\hat{y} = 34,9 + 12,9X_1 + 3,3X_2 + 6,2X_3 - 3,3X_1X_2 + 0,59X_1X_3 - 0,21X_2X_3 + 0,8X_1X_2X_3 \quad (2)$$

В результате проверки статистической значимости коэффициентов все коэффициенты уравнения (1) оказались статистически значимыми. Все коэффициенты уравнения (2) оказались статистически значимыми.

Проверку уравнений на адекватность проводили с использованием критерия Фишера. В результате расчета установлено, что уравнения регрессии адекватны.

Полученные уравнения были использованы для расчета крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни): $X_1 = 150$ В, $X_2 = 150$ Гц, $X_3 = 45,5$ мкФ. Согласно проведенной серии опытов, результаты которых представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3: Расчет крутого восхождения (дистиллированная вода)

Наименование	X_1 (У, В)	X_2 (f, Гц)	X_3 (С, мкФ)	Y, мкм
Основной уровень	150	150	45,5	-
Коэффициент b_i	13,8	3,7	5,4	-
Интервал варьирования ξ_i	50	50	20	-
$b_i\xi_i$	690	185	108	-
Шаг Δ_i	34,5	9,25	5,4	-
Округленный шаг	35	10	5	-
Опыт 1	160	160	50,5	31,2
Опыт 2	195	170	55,5	43,2
Опыт 3	200	180	60,5	47,1
Опыт 4	200	190	65,5	49,5
Опыт 5 (max)	200	200	65,5	50,4

Таблица 4: Расчет крутого восхождения (керосин осветительный)

Наименование	X_1 (У, В)	X_2 (f, Гц)	X_3 (С, мкФ)	Y, мкм
Основной уровень	150	150	45,5	-
Коэффициент b_i	12,9	3,3	6,2	-
Интервал варьирования ξ_i	50	50	20	-
$b_i\xi_i$	645	165	124	-
Шаг Δ_i	32,2	8,25	6,2	-
Округленный шаг	32	8	6	-
Опыт 1	182	158	51,5	45,4
Опыт 2	200	166	57,5	52
Опыт 3	200	174	62,5	53,8
Опыт 4	200	182	65,5	55,0
Опыт 5	200	190	65,5	55,1
Опыт 6	200	198	65,5	55,2
Опыт 7 (max)	200	200	65,5	58,4

4. Заключение

1. Проведено определение оптимальных параметров работы установки ЭЭД методом постановки полного факторного эксперимента по среднему размеру частиц получаемых электроэрозионных материалов. В качестве факторов были выбраны параметры работы установки ЭЭД: напряжение на электродах, емкость разрядных конденсаторов и частота следования импульсов. Оптимальные параметры работы установки определяли для двух рабочих сред: воды дистиллированной и керосина осветительного.

2. Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации \hat{y} (средний размер электроэрозионных частиц) для процесса ЭЭД, которые составили:

а) для образца, полученного в воде: 50,4 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц;

б) для образца, полученного в керосине: 58,4 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

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. Ерёмин 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 ЖС26ВСНК // 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., Ageeva E. V. 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 electrodisperging 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 electrodispergation 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 Electrospark Cobalt–Chromium Powder by Additive Manufacturing // *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41. No. 8. P. 731–733.

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 ZhS6U1", *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. & Ageeva, E. V. 2015, "Investigation of the properties of electroerosive powders and hard alloys obtained from them by isostatic pressing and sintering", *Russian Journal of Non-Ferrous Metallurgy*, 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, "EDM micro - and nanopowders for the production of hard alloys", *Russian metallurgy (Metally)*, vol. 2016(6), pp. 547-549.
16. Latypov, R. A., Ageev, E. V., Latypov, R. G., Altukhov, A. Yu. & Ageev, E. V. 2017, "The elemental composition of the powder particles obtained by dispersion of waste discharge hard alloy VK8", *Russian metallurgy (Metally)*, vol. 2017(12), pp. 1083-1085.

17. Latypov, R. A., Ageev, E. V., Altukhov, A. Yu. & Ageev, E. V. 2018, "Receiving cobalt–chrome powders by the method of electric discharge dispersion of wastes and their study", *Russian metallurgy (Metally)*, vol. 2018(12), pp. 1177-1180.
18. Latypov, R. A., Ageev, E. V., Altukhov, A. Yu. & Ageeva, E. V. 2019, "The effect of temperature on the porosity of additive products made from dispersed waste of cobalt-chromium alloys", *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2019(12), pp. 1300-1303.
19. Ageev, E. V., Altukhov, A. Yu., Ageev, E. V. & Pykhtin, A. I. 2021, "Structure and mechanical properties of powders, obtained by electrodispersion 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 pseudoplane permit, sintered from powders spark erosion, made 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 process electrodispersion waste of alloy residence", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 22(2), pp. 389-401.
22. Ageeva, E. V., Ageev, E. V., Kuzovleva, O. V. & Gvozdev, A. E. 2021, "The development of scientific and technological foundations of a new environmentally friendly and waste grinding process waste in conductive powders of micro- and nanoflake", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 21(4), pp. 314-326.
23. Ageev, E. V., Ageeva, E. V. & Horakova, N. M. 2021, "X-ray methods of investigation of the surface of the powder obtained by electroerosion dispersion of waste pseudoplane W-Ni-Fe 95 kerosene", *Journal of research of the surface: 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 parts made of electric spark cobalt-chromium powder by additive manufacturing", *Russian Engineering Research*, vol. 41, no. 8, pp. 731-733.

Получено 12.05.2022

Принято в печать 14.09.2022