

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 23. Выпуск 1.

УДК 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-1-183-196

**Численная оптимизация процесса получения шихты
электродиспергированием отходов сплава Т5К10¹**

Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, А. Е. Гвоздев, А. А. Калинин

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

Калинин Антон Алексеевич — Тульский государственный университет (г. Тула).

e-mail: antony_ak@mail.ru

Аннотация

Одной из основных проблем использования вольфрамсодержащих твердых сплавов в настоящее время является высокая стоимость вольфрама. Ввиду высокой температуры плавления существует проблема их переработки для вторичного использования. Одним из перспективных методов их переработки в порошки сферической формы является электроэрозионное диспергирование (ЭЭД). К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения об использовании диспергированных электроэрозией частиц сплава Т5К10 в качестве шихты для производства вольфрам-титано-кобальтовых сплавов и режущего инструменты из них. Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований.

Для прогнозирования высоких физико-механических свойств изделий из полученной шихты требовалось провести оптимизацию режимов электроэрозионного диспергирования отходов сплава Т5К10 методом планирования эксперимента. Для шихты одним из основных технологических параметров является оптимальная дисперсность, поэтому оптимизацию процесса получения шихты для производства спеченных твердых сплавов проводили по среднему размеру частиц. Электроэрозионное диспергирование отходов сплава Т5К10 осуществляли на экспериментальной установке (Патент РФ № 2449859). В результате воздействия кратковременных электрических разрядов образовывались твердосплавные частицы различной формы и размера. Оптимизация процесса электродиспергирования частиц, полученных ЭЭД отходов твердого сплава марки Т5К10, 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. Оптимизации процесса электродиспергирования сплава Т5К10 в дистиллированной воде и осветительном керосине осуществлялась с учетом таких факторов, как напряжение на электродах, емкость разрядных конденсаторов и частота следования импульсов.

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00123, <https://rscf.ru/project/22-29-00123/>.

Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации по среднему размеру электроэрозионных частиц, которые составили: для дистиллированной воды – 57,1 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц; для осветительного керосина – 64,1 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 вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и повторное их использование при изготовлении режущего инструмента.

Ключевые слова: отходы твердого сплава Т5К10, электроэрозионное диспергирование, средний размер частиц, оптимизация процесса.

Библиография: 20 названий.

Для цитирования:

Е. В. Агеева, Е. В. Агеев, А. Е. Гвоздев, А. А. Калинин. Численная оптимизация процесса получения шихты электродиспергированием отходов сплава Т5К10 // Чебышевский сборник, 2022, т. 23, вып. 1, с. 183–196.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 23. No. 1.

UDC 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-1-183-196

Numerical optimization of the charge production process by electrodispersion of T5K10 alloy waste

E. V. Ageev, E. V. Ageeva, A. E. Gvozdev, A. A. Kalinin

Ageev Yevgeniy Viktorovich — doctor of technical sciences, professor of the department of automobiles and automobile economy, Southwestern State University (Kursk).

e-mail: ageev_ev@mail.ru

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

e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

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

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Kalinin Anton Alekseevich — Tula State University (Tula).

e-mail: antony_ak@mail.ru

Abstract

One of the main problems of using tungsten-containing hard alloys at present is the high cost of tungsten. Due to the high melting point, there is a problem of their recycling for secondary use. One of the promising methods of their processing into spherical powders is electroerosive dispersion (EED). To date, there is no complete information in the modern scientific and technical literature on the use of T5K10 alloy particles dispersed by electroerosion as a charge for the production of tungsten-titanium-cobalt alloys and cutting tools from them. For these purposes, comprehensive theoretical and experimental studies are required.

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 T5K10 alloy waste by the experimental planning method. For the charge, one of the main technological

parameters is the optimal dispersion, therefore, the optimization of the process of obtaining the charge for the production of sintered hard alloys was carried out according to the average particle size. Electroerosive dispersion of T5K10 alloy waste was carried out on an experimental installation (RF Patent No. 2449859). As a result of exposure to short-term electrical discharges, carbide particles of various shapes and sizes were formed. Optimization of the process of electrodispersion of particles obtained by the EED of solid alloy waste of the T5K10 brand 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 electrodispersing the T5K10 alloy in distilled water and lighting kerosene was carried out taking into account factors such as the voltage at the electrodes, the capacity of the discharge capacitors and the pulse repetition rate.

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 – 57.1 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 - 64.1 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 waste of tungsten-titanium-cobalt alloys and their reuse in the manufacture of cutting tools.

Keywords: solid alloy waste T5K10, electroerosive dispersion, average particle size, process optimization.

Bibliography: 20 titles.

For citation:

E. V. Ageev, E. V. Ageeva, A. E. Gvozdev, A. A. Kalinin, 2022, “Numerical optimization of the charge production process by electrodispersion of T5K10 alloy waste”, *Chebyshevskii sbornik*, vol. 23, no. 1, pp. 183–196.

1. Введение

Спеченные вольфрамсодержащие твердые сплавы обладают рядом весьма ценных свойств, благодаря которым их эффективно используют во многих областях техники. В производстве металлокерамических твердых сплавов используются дорогостоящие карбиды вольфрама WC, титана TiC и тантала TaC, в качестве связующего материала – порошок металлического кобальта Co [1-6].

Одной из основных проблем использования вольфрамсодержащих твердых сплавов в настоящее время является высокая стоимость вольфрама. Ввиду высокой температуры плавления существует проблема их переработки для вторичного использования. Одним из перспективных методов их переработки в порошки сферической формы является электроэрозионное диспергирование (ЭЭД).

Прочностные характеристики твердых сплавов во многом зависят от способа их получения. В настоящее время для производства вольфрамсодержащих твердых сплавов, т.е. консолидации порошков используют спекание (или горячее прессование), недостатком которой является наличие пор. Для получения спеченных изделий с высокими механическими свойствами при повышенных температурах необходимо создание беспористой микроструктуры [7-9].

Современной альтернативой традиционному спеканию является SPS-синтез, при котором используется импульсы постоянного электрического тока, проходящего через графитовую матрицу, в которой находится образец. Процесс состоит из совместного воздействия температуры, осевого давления и электрического тока в присутствии электромагнитного поля (плазмы). Высокие локальные температуры между частицами испаряют загрязняющие вещества и оксиды на поверхности частиц до образования перемычки. Именно этот эффект

с одновременным приложением осевого давления позволяет значительно снизить температуру спекания и продолжительность процесса, что в свою очередь способствует значительному уменьшению скорости роста зерна, в отличие от спекания без нагрузки или горячего прессования. SPS-синтез позволит получать конкурентноспособный высокотехнологичный продукт с повышенными физико-механическими свойствами [10-13].

Решение вопросов, связанных с улучшением качества твердых сплавов, в полной мере касается так же качества порошковых материалов, используемых для их изготовления.

В связи с этим крайне актуальной задачей является комплексное изучение влияния исходного сырья на структуру и свойства сплавов, в частности, порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов сплава Т5К10 в процессе SPS-синтеза.

Выбор порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов сплава Т5К10 может быть обоснован его стоимостью и свойствами. Ресурс твердых сплавов из электроэрозионных порошков Т5К10 будет определяться не только свойствами исходного сырья, но и технологией их производства (SPS-синтез).

Наиболее интенсивные исследования в области материаловедения для перспективных твердых сплавов проводятся в странах с высоким научно-технологическим уровнем: США, Швеции, Германии, Японии и др. странах.

Разработанные в ходе выполнения данного проекта порошковые материалы для твердых сплавов, а также созданная технология для их производства (SPS-синтез) обеспечат экономические показатели на уровне мировых производителей и не допустят отставания России от ведущих стран мира.

К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения об использовании диспергированных электроэрозией частиц сплава Т5К10 в качестве шихты для производства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и режущего инструмента из них. Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и повторное их использование при изготовлении режущего инструмента.

Работы в области исследования новых вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов ведутся в научных и высших образовательных учреждениях, таких как: НИТУ МИСиС, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, МПУ, ЮЗГУ, Институт материаловедения Хабаровского НЦ ДВО РАН и др. Однако в трудах ученых этих организаций не рассматриваются вопросы, касающиеся использования диспергированных электроэрозией частиц сплава Т5К10 в качестве шихты для производства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и режущего инструмента из них.

Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов тяжелых вольфрамовых сплавов, экономии дорогостоящего вольфрама и повторное его использование.

Требования к шихте для получения изделий заключается в технологичности, поэтому задача сводится к получению частиц необходимой дисперсности – от 50 мкм до 70 мкм. Однако, по результатам проведенных предварительных исследований необходимые значения среднего размера частиц получены не были.

Для прогнозирования высоких физико-механических свойств изделий из полученной шихты требуется провести оптимизацию режимов получения электроэрозионных материалов отходов сплава Т5К10 методом планирования эксперимента.

2. Основной текст статьи

Электроэрозионное диспергирование отходов сплава Т5К10 осуществляли на экспериментальной установке (Патент РФ № 2449859) [14-20]. В результате воздействия кратковременных электрических разрядов образовывались твердосплавные частицы различной формы и размера.

Для шихты одним из основных технологических параметров является оптимальная дисперсность, поэтому оптимизацию процесса получения шихты для производства спеченных твердых сплавов (электродиспергирования отходов твердого сплава марки Т5К10) проводили по среднему размеру частиц.

Регулируя параметры работы установки электроэрозионного диспергирования (ЭЭД), в частности напряжение на электродах, емкость разрядных конденсаторов и частоту следования импульсов, можно регулировать массовую производительность процесса. Масса электроэрозионных материалов находится в прямой зависимости от средней массы всех частиц, которая, в свою очередь, находится в зависимости со средним размером частиц и их количеством.

Определение оптимальных параметров работы установки ЭЭД проводили постановкой полного факторного эксперимента (ПФЭ) 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.

Исследование формы и морфологии поверхности частиц, полученных ЭЭД отходов твердого сплава марки Т5К10, проводили на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды). Методика исследования формы и морфологии частиц представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

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

3. Результаты и их обсуждение

Анализ параметров формы частиц электроэрозионной шихты со средним размером 25 ... 100 мкм по изображениям с растрового микроскопа говорит о том, что электроэрозионные частицы имеют сферическую и эллиптическую форму, а также агломераты (рисунок 3). Микрофотография частиц электроэрозионной шихты, полученной:

Оптимизация процесса электродиспергирования частиц, полученных ЭЭД отходов твердого сплава марки Т5К10, 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.

При оптимизации процесса электродиспергирования сплава Т5К10 в дистиллированной воде и осветительном керосине с учетом факторов напряжение на электродах, емкость разрядных конденсаторов и частота следования импульсов были выбраны уровни и интервалы варьирования (таблица 1) и составлены матрицы планирования для экспериментов, проведенных в дистиллированной воде (таблица 2) и осветительном керосине (таблица 3).

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

$$\hat{y} = 31,37 + 12,27X_1 + 3,84X_2 + 8,1X_3 - 0,13X_1X_2 + 0,05X_1X_3 - 0,15X_2X_3 + 1,5X_1X_2X_3 \quad (1)$$

$$\hat{y} = 33,6 + 15,5X_1 + 3,7X_2 + 9,7X_3 + 0,69X_1X_2 + 1,31X_1X_3 - 0,59X_2X_3 + 0,26X_1X_2X_3 \quad (2)$$

Таблица 1: Уровни и интервалы варьирования

Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	U, В	ν , Гц	C, мкФ
		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 ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	\bar{Y}_i	S ² _{воспр}
1	++	-	-	-	+	+	+	-	5,3	5,4	5,5	5,4	0,02
2	+++	+	-	-	-	-	+	+	33,2	33,4	32,9	33,1	0,14
3	+	-	+	-	-	+	-	+	16,5	16,6	17,0	16,7	0,14
4	+	+	+	-	+	-	-	-	37,8	37,9	38,0	37,9	0,02
5	+	-	-	+	+	-	-	+	24,9	24,9	25,0	24,8	0,06
6	+	+	-	+	-	+	-	-	46,9	46,9	46,3	46,7	0,24
7	+	-	+	+	-	-	+	-	29,2	29,3	30,1	29,5	0,49
8	+	+	+	+	+	+	+	+	56,4	57,4	56,9	56,9	0,50

Таблица 3: Матрица планирования эксперимента (керосин осветительный)

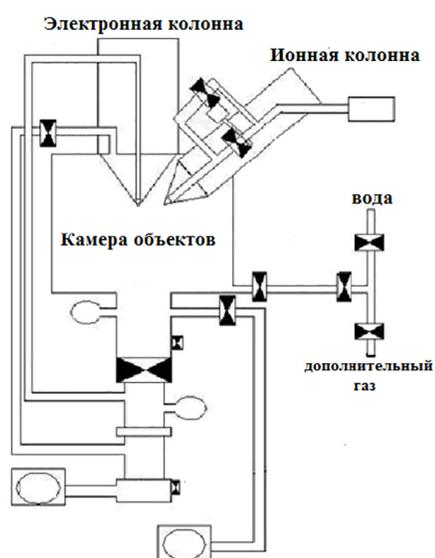
№ п/п	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	\bar{Y}_i	S ² _{воспр}
1	++	-	-	-	+	+	+	-	5,6	5,7	5,9	5,8	0,06
2	++ +	+	-	-	-	-	+	+	33,8	33,1	33,4	33,4	0,25
3	+	-	+	-	-	+	-	+	13,5	13,5	13,4	13,5	0,01
4	+	+	+	-	+	-	-	-	42,7	42,8	43,0	42,8	0,05
5	+	-	-	+	+	-	-	+	24,4	24,5	24,4	24,4	0,01
6	+	+	-	+	-	+	-	-	56,1	56,3	56,1	56,2	0,03
7	+	-	+	+	-	-	+	-	28,6	28,7	28,8	28,7	0,02
8	+	+	+	+	+	+	+	+	64,4	64,5	64,1	64,3	0,09

В результате проверки статистической значимости коэффициентов все коэффициенты уравнения (1), кроме b_{12} и b_{13} , оказались статистически значимыми. Все коэффициенты уравнения (2) оказались статистически значимыми.

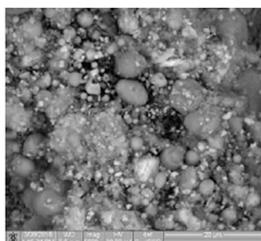
После исключения статистически незначимых коэффициентов уравнения регрессии приняли вид:



Электронно-ионный сканирующий микроскоп «Quanta 600 FEG»



Принципиальная схема процесса исследования шихты

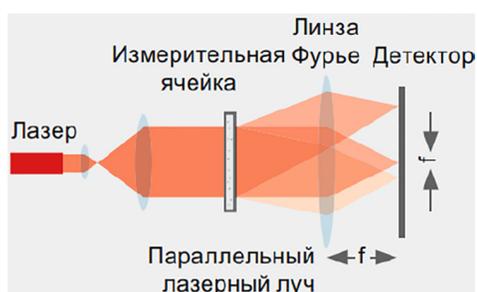


Снимки объемных изображений изучаемой структуры шихты

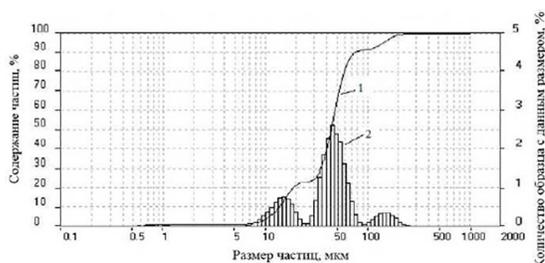
Рис. 1: Блок-схема методики исследования формы и морфологии частиц



Лазерный анализатор размеров частиц «Analysette 22 NanoTec»



Конструкция состоит из лазера, через измерительную ячейку направленного на детектор. Важным компонентом каждого лазерного прибора для измерения размера частиц является линза Фурье, которая фокусирует рассеянный свет лазера по траектории луча на детектор. 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.

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

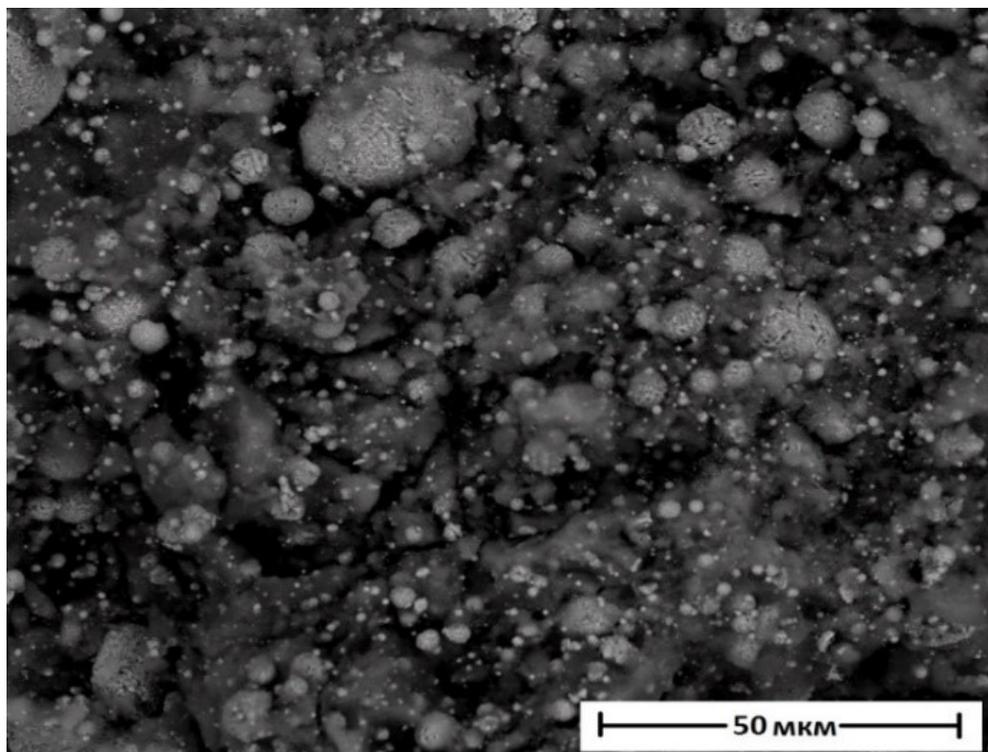


Рис. 3: в воде дистиллированной

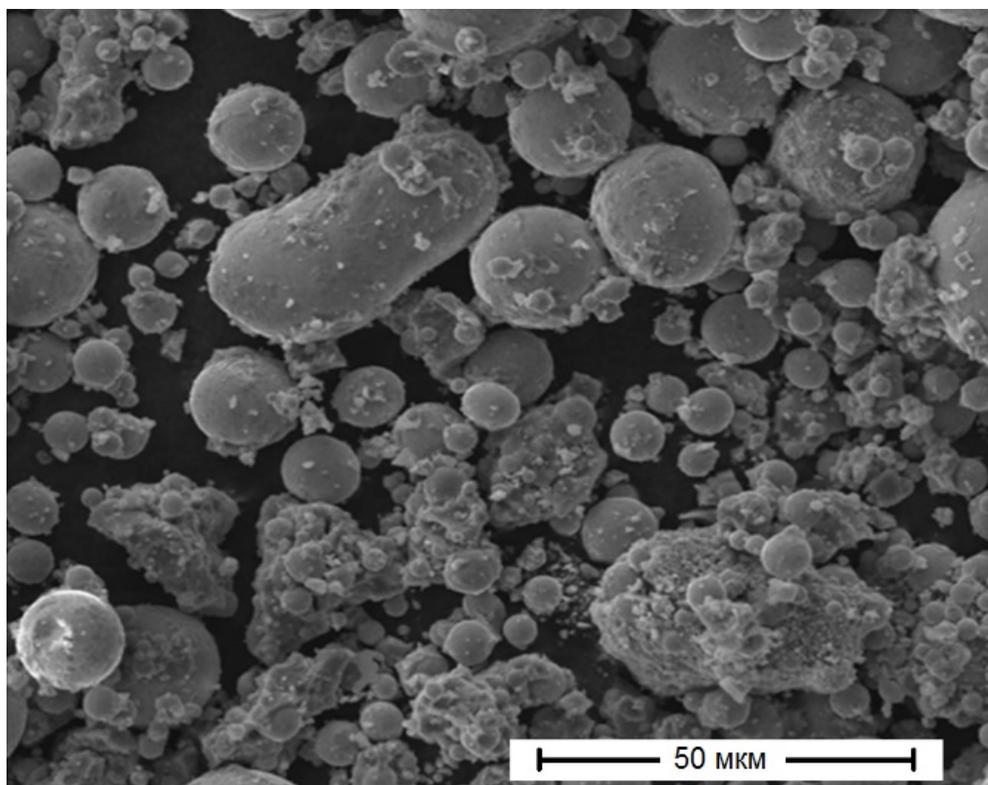


Рис. 4: в керосине осветительном (растровый микроскоп QUANTA 600 FEG)

$$\hat{y} = 31,37 + 12,27X_1 + 3,84X_2 + 8,1X_3 - 0,15 X_2X_3 + 1,5X_1X_2X_3 \quad (3)$$

$$\hat{y} = 33,6 + 15,5X_1 + 3,7X_2 + 9,7X_3 + 0,69X_1X_2 + 1,31X_1X_3 - 0,59 X_2X_3 + 0,26X_1X_2X_3 \quad (4)$$

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 таблице 4, определены предельные значения параметра оптимизации \hat{y} (средний размер электроэрозионных частиц) для процесса электродиспергирования металлоотходов в дистиллированной воде, которые составили 57,1 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

Таблица 4: Расчет крутого восхождения (вода дистиллированная)

Наименование	X_1 (U, В)	X_2 (f, Гц)	X_3 (C, мкФ)	Y, мкм
Основной уровень	150	150	45,5	—
Коэффициент b_i	12,27	3,84	8,1	—
Интервал варьирования ξ_i	50	50	20	—
$b_i \cdot \xi_i$	613,5	192	162	—
Шаг Δ_i	30,6	9,6	8,1	—
Округленный шаг	31	10	8	—
Опыт 1	181	160	53,5	43,1
Опыт 2	200	170	61,5	52,1
Опыт 3	200	180	65,5	54,9
Опыт 4	200	190	65,5	56,0
Опыт 5 (max)	200	200	65,5	57,1

Согласно проведенной серии опытов, результаты которых представлены в таблице 5, определены предельные значения параметра оптимизации \hat{y} (средний размер электроэрозионных частиц) для процесса электродиспергирования металлоотходов в осветительном керосине, которые составили 64,1 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

4. Заключение

1. Проведено определение оптимальных параметров работы установки ЭЭД методом постановкой 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 по среднему размеру электроэрозионных частиц, которые составили: для дистиллированной воды – 57,1 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц; для осветительного керосина – 64,1 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

Таблица 5: Расчет крутого восхождения (керосин осветительный)

Наименование	X ₁ (U, В)	X ₂ (f, Гц)	X ₃ (C, мкФ)	Y, мкм
Основной уровень	150	150	45,5	—
Коэффициент b _i	15,5	3,7	9,7	—
Интервал варьирования ξ _i	50	50	20	—
b _i · ξ _i	775	185	194	—
Шаг Δ _i	38,75	9,25	9,7	—
Округленный шаг	39	9	10	—
Опыт 1	189	159	55,5	51,7
Опыт 2	200	168	65,5	61,5
Опыт 3	200	177	65,5	62,3
Опыт 4	200	186	65,5	63,0
Опыт 5	200	195	65,5	63,7
Опыт 6 (max)	200	200	65,5	64,1

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев Е.Н., Замулаева Е.И., Зайцев А.А., Коняшин И.Ю., Левашов Е.А. Структура и свойства крупнозернистых твердых сплавов WC-Co с особо однородной микроструктурой // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2019. № 4. С. 70-78.
2. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Исследование влияния температурных полей нагрева при непрерывной лазерной обработке на эксплуатационные свойства пластин твердого сплава T15K6 // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 76-84.
3. Самоутугин С.С., Кудинова Е.В., Христенко О.А., Беляковский В.П., Шибистая Я.Н. Выбор оптимальных режимов плазменной обработки инструмента из твердых сплавов // Технология машиностроения. 2018. № 7. С. 30-34.
4. Дворник М.И., Михайленко Е.А. Использование недостатка углерода для создания наноструктурного градиентного твердого сплава // Бюллетень научных сообщений. 2018. № 23. С. 22-27.
5. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В., Игнатюк В.Д. Термическая обработка неплетачиваемых пластин из твердого сплава T15K6 непрерывным лазерным излучением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 1 (169). С. 26-30.
6. Быстров В.А. Эффективность упрочнения твердым сплавом сменных деталей металлургических агрегатов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 12. С. 939-947.
7. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., 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. Т. 2017. № 12. С. 1083-1085.
8. Ageev E.V., Ugrimov A.S., Latypov R.A. Metallurgical features of the manufacture of hard-alloy powders by electroerosive dispersion of a T15K6 alloy in butanol // Russian metallurgy (Metally). 2016. Т. 2016. № 12. С. 1155-1157.

9. Ageev E.V., Ageeva 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. Т. 56. № 1. С. 52-62.
10. Кочергин С.А., Моргунов К.Т.Н.Ю.А., Саушкин Д.Т. Конечно-элементное моделирование процесса искрового плазменного спекания режущих пластин // СТИН. 2015. № 10. С. 28-32.
11. Смирнов А.В., Юшин Д.И., Кузнецов В.А. Моделирование искрового плазменного спекания: цели, задачи, проблемы и пути их решения // Молодой ученый. 2016. № 25 (129). С. 66-72.
12. Забелин Д.А., Чайникова А.С., Качаев А.А., Осин И.В., Гращенков Д.В. Синтез, структура и свойства керамики на основе оксинитрида алюминия (AlON), полученной методом искрового плазменного спекания // Труды ВИАМ. 2019. № 6 (78). С. 13-19.
13. Пристинский Ю.О., Перетягин Н.Ю., Кузнецова Е.В., Перетягин П.Ю. Сравнение механических свойств твердых сплавов вкб, полученных традиционным методом и искровым плазменным спеканием // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 51-54.
14. Агеев Е. В., Латыпов Р. А., Агеева Е. В. Исследование свойств электроэрозионных порошков и твердого сплава, полученного из них изостатическим прессованием и спеканием // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. №6. С. 51–55.
15. Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Агеев Е. В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию // Вестник машиностроения. 2014. №10. С. 66–68.
16. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Воробьев Е. А. Рентгеноспектральный микроанализ порошка, полученного из отходов быстрорежущей стали электроэрозионным диспергированием в керосине // Вестник машиностроения. 2014. №11. С. 71–72.
17. Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Агеев Е. В. Исследование формы и морфологии электроэрозионных медных порошков, полученных из отходов // Вестник машиностроения. 2014. №8. С. 73–75.
18. Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Агеев Е. В. Исследование распределения микрочастиц по размерам в порошках, полученных электроэрозионным диспергированием медных отходов // Вестник машиностроения. 2014. №9. С. 63–64.
19. Агеев Е. В., Агеева Е. В., Воробьев Е. А. Гранулометрический и фазовый составы порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в керосине // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. №4 (112). С. 11–14.
20. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Воробьев Е. А. Анализ формы и морфологии частиц порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в керосине // Вестник машиностроения. 2015. №7. С. 72–73.

REFERENCES

1. Avdeenko E.N., Zamulaeva E.I., Zaitsev A.A., Konyashin I.Yu., Levashov E.A., 2019, "Structure and properties of coarse-grained WC-Co hard alloys with a particularly homogeneous microstructure", *Izvestiya vysshikh uchebnykh uchebnykh zavedeniy [Structure and properties of*

- coarse-grained WC-Co hard alloys with a particularly homogeneous microstructure]. Non-ferrous metallurgy*, No. 4, pp. 70-78.
2. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V., 2018, "Investigation of the influence of temperature fields of heating during continuous laser processing on the operational properties of T15K6 hard alloy plates", *Izvestiya vysshchikh uchebnykh zavedenii. Powder metallurgy and functional coatings*, No. 2, pp. 76-84.
 3. Samotugin S.S., Kudinova E.V., Khristenko O.A., Belyakovskiy V.P., Shibistaya Ya.N., 2018, "The choice of optimal modes of plasma processing of tools made of hard alloys", *Technology of mechanical engineering*, No. 7, pp. 30-34.
 4. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A., 2018, "The use of carbon deficiency to create a nanostructured gradient hard alloy", *Bulletin of scientific communications.*, No. 23, pp. 22-27.
 5. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V., Ignatyuk V.D., 2019, "Heat treatment of non-sharpenable plates made of T15K6 hard alloy by continuous laser radiation", *Hardening technologies and coatings*, Vol. 15, No. 1 (169), pp. 26-30.
 6. Bystrov V.A., 2018, "Efficiency of hardening with a hard alloy of replaceable parts of metallurgical aggregates", *Izvestia of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, Vol. 61, No. 12, pp. 939-947.
 7. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., 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, No. 12, pp. 1083-1085.
 8. Ageev E.V., Ugrimov A.S., Latypov R.A., 2016, "Metallurgical features of the manufacture of hard-alloy powders by electroerosive dispersion of a T15K6 alloy in butanol", *Russian metallurgy (Metally)*, Vol. 2016, No. 12, pp. 1155-1157.
 9. Ageev E. V., Ageeva E. V., Latypov R. A., 2015, "Investigation into the properties of electroerosive powders and hard alloy fabricated from them by isostatic pressing and sintering", *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, Vol. 56, No. 1, P. 52-62.
 10. Kochergin S. A., Morgunov Ph.D. Yu.A., Saushkin, D. T., 2015, "Finite element modeling of the process of spark plasma sintering inserts", *STIN*, No. 10, pp. 28-32.
 11. Smirnov A. V., Yushin D. I., Kuznetsov V. A., 2016, "Modeling of spark plasma sintering: goals, objectives, problems and solutions", *Young scientist*, No. 25 (129), pp. 66-72.
 12. Zabelin D.A., Chaynikova A.S., Kachaev A.A., Osin I.V., Grashchenkov D.V., 2019, "Synthesis, structure and properties of ceramics based on aluminum oxynitride (ALON) obtained by spark plasma sintering", *Proceedings of VIAM*, No. 6 (78), pp. 13-19.
 13. Pristinsky Yu.O., Peretyagin N.Yu., Kuznetsova E.V., Peretyagin P.Yu., 2019, "Comparison of mechanical properties of vk6 hard alloys obtained by the traditional method and spark plasma sintering", *Bulletin of Mechanical Engineering*, No. 9, pp. 51-54.
 14. Ageev E. V., Latypov R. A., Ageeva E. V., 2014, "Investigation of the properties of electroerosive powders and hard alloy obtained from them by isostatic pressing and sintering", *News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy*, No.6, pp. 51-55.
 15. Ageeva E. V., Horyakova N. M., Ageev E. V., 2014, "Morphology and elemental composition of copper electroerosive powders suitable for sintering", *Bulletin of Mechanical Engineering*, No. 10, pp. 66-68.

16. Ageeva E. V., Ageev E. V., Vorobyev E. A., 2014, "X-ray spectral microanalysis of powder obtained from high-speed steel waste by electroerosive dispersion in kerosene", *Vestnik mashinostroeniya*, No.11, pp. 71-72.
17. Ageeva E. V., Horyakova N. M., Ageev E. V., 2014, "Investigation of the form and morphology of electroerosive copper powders obtained from waste", *Vestnik mashinostroeniya*, No.8, pp. 73-75.
18. Ageeva E. V., Horyakova N. M., Ageev E. V., 2014, "Investigation of the size distribution of microparticles in powders obtained by electroerosive dispersion of copper waste", *Vestnik Mashinostroeniya*, No. 9, pp. 63-64.
19. Ageev E. V., Ageeva E. V., Vorobiev E. A., 2014, "Particle size and phase composition of the powder obtained from tungsten-containing wastes tool materials by electroerosion dispersion in kerosene", *Strengthening technologies and coatings*, №4 (112), pp. 11-14.
20. Ageeva E. V. Ageev E. V., Vorob'ev E. A., 2015, "Analysis of the shape and morphology of the powder particles obtained from tungsten-containing wastes by electroerosion dispersion in kerosene", *Journal of mechanical engineering*, No. 7, pp. 72-73.

Получено 1.12.2021 г.

Принято в печать 27.02.2022 г.