ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 22. Выпуск 2.

УДК 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-2-389-401

Математическая оптимизация процесса электродиспергирования отходов сплава ВНЖ 1

Е. В. Агеева, Е. В. Агеев, О. В. Кузовлева, А. Е. Гвоздев

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

e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

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

e-mail: ageev ev@mail.ru

Кузовлева Ольга Владимировна — кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

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

e-mail: qwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Аннотация

В работе определены 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. Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации по среднему размеру электроэрозионных частиц, которые составили: для воды -51,38 мкм при $\ddot{\rm e}$ мкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 210 В, частоте следования импульсов 230 Γ ц; для керосина — 61.73 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 65.5мкФ, напряжении на электродах 160 В и частоте следования импульсов 205 Гц..

Ключевые слова: отходы сплава ВНЖ, электродиспергирование, оптимизация процесca.

Библиография: 26 названий.

Для цитирования:

Е. В. Агеева, Е. В. Агеев, О. В. Кузовлева, А. Е. Гвоздев. Математическая оптимизация процесса электродиспергирования отходов сплава ВНЖ // Чебышевский сборник, 2021, т. 22, вып. 2, с. 389–401.

¹Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (НШ-2564.2020.8).

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 22. No. 2.

UDC 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-2-389-401

Mathematical optimization of the process of electrodispergation of the waste of the alloy of the residence permit

E. V. Ageeva, E. V. Ageev, O. V. Kuzovleva, A. E. Gvozdev

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

e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

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

e-mail: ageev ev@mail.ru

Kuzovleva Olga Vladimirovna — candidate of technical sciences, associate professor, Russian State University of Justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

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

e-mail: qwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Abstract

In this paper, the optimal parameters of the EED installation operation are determined by setting up a complete factor experiment on the average particle size of the obtained electroerosive materials. The parameters of the EED system operation were selected as factors: the voltage at the electrodes, the capacity of the discharge capacitors, and the pulse repetition rate. The optimal parameters of the installation were determined for two working media: distilled water and lighting kerosene. According to a series of experiments to determine the maximum value of the parameter optimization in EDM average size of the particles that made up: for water — 51,38 μ m when capacity bit of 65.5 μ f capacitors, the voltage across the electrodes 210, the pulse repetition frequency of 230 Hz; for kerosene — 61,73 μ m when capacity bit of 65.5 μ f capacitors, the voltage across the electrodes 160 and the pulse repetition frequency of 205 Hz.

Keywords: permit alloy, electrodispersion, process optimization.

Bibliography: 26 titles.

For citation:

E. V. Ageeva, E. V. Ageeva, O. V. Kuzovleva, A. E. Gvozdev, 2021, "Mathematical optimization of the process of electrodispergation of the waste of the alloy of the residence permit", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 22, no. 2, pp. 389–401.

Введение

Существующие промышленные технологии измельчения таких сплавов отличаются крупнотоннажностью, высокими затратами энергии и экологическими проблемами. Поиск новых экологически чистых технологий переработки отходов тяжелых сплавов вольфрама, в том числе сплавов ВНЖ, является актуальным и необходимым [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Одним из перспективных и промышленно неприменяемых способов измельчения любого электропроводного материала является электроэрозионный способ. К настоящему времени

отсутствуют научно-технические разработки по использованию диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ в качестве шихты для производства тяжелых вольфрамовых псевдосплавов и изделий из них. Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

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

Требования к шихте для получения изделий заключается в технологичности, поэтому задача сводится к получению частиц необходимой дисперсности — от 40 мкм до 60 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 ВНЖ методом планирования эксперимента [21, 22, 23, 24, 25, 26].

Основной текст статьи

Для шихты одним из основных технологических свойств является оптимальная дисперсность, поэтому оптимизацию процесса получения шихты для производства тяжелых вольфрамовых псевдосплавов (электродиспергирования отходов сплава марки ВНЖ 95) проводили по среднему размеру частиц путем проведения полного факторного эксперимента типа 2³.

Регулируя параметры работы установки, 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.

Результаты и их обсуждение

Для оценки влияния указанных факторов и математического описания процесса получения электроэрозионных частиц использована модель первого порядка вида

$$\widehat{y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + B_{123} X_1 X_2 X_3, \tag{1}$$

где X_1, X_2, X_3 — факторы;

y — исследуемая величина (средний размер электроэрозионных частиц).

Рассматриваемый пример — полный факторный эксперимент типа 2^3 .

Значения выбранных уровней варьируемых факторов даны в таблице 1.

Уровень варьируемых	Обозначение	U, B	u, Гц	С, мкФ
факторов	кодовое	X_1	X_2	X_3
Основной уровень	0	125	150	44,75
Интервал варьирования	$\triangle x_i$	25	50	20,75
Верхний уровень	+1	150	200	65,5
Нижний уровень	-1	100	100	24

Таблица 1: Уровни и интервалы варьирования

Каждый опыт проводили трижды. Размерный анализ электроэрозионных материалов, полученных из отходов псевдосплава ВНЖ, проведен на лазерном анализаторе размеров частиц Analysette 22 NanoTec Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний представлены в таблице 2.

№ опыта	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	\overline{y}_i	$S^2_{\text{воспр}}$
1	+	_	_	_	+	+	+	_	4,15	4,12	3,97	4,08	0,0093
	,				·				10,4	10,9	10,8	10,7	0,07
2	+	+	_	_	_	_	+	+ + +	22,9	23,5	23,8	23,4	0,21
					_	_			26,57	26,80	27,33	26,9	0,05945
3						1			4,08	5,6	6,31	5,33	1,2979
3	+	_	+	_	_	+	_	- +	13,25	14,33	13,82	13,8	0,2919
4		,	,					28,1	27,6	27,7	27,8	0,07	
4	+	+	+	_	+	_	_	_	32,57	32,41	32,22	32,4	0,0307
5	+			+	+				24,7	22,2	22,7	23,2	1,75
9	+	_	_	+		_	_	+	27,51	27,12	27,27	27,3	0,0387
6	,	+		+		1			48,2	47,7	47,5	47,8	0,13
	+		_	+	_	+	_	_	56,45	57,0	55,75	56,4	0,3925
7	_		1				+ -		42,8	42,9	44,8	43,5	1,27
'	+	_	+	+	_	_		_	59,12	58,55	58,13	58,6	0,2469
8		1		-		54,4	53,7	52,7	53,6	0,73			
0	+	+	+	+	+	+	+ -	+ +	60,87	61,85	61,38	61,2	0,0819

Таблица 2: Матрица планирования эксперимента

Среднее значение параметра оптимизации по параллельным опытам определяем, например, для первого опыта (вода и керосин соответственно):

$$\overline{y_i} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} y_{ij} = \frac{4,15+4,12+3,97}{3} = 4,08$$

$$\overline{y_i} = \frac{1}{m_i} \sum_{i=1}^{m_i} y_{ij} = \frac{10, 4 + 10, 9 + 10, 9}{3} = 10, 7.$$

Для всех остальных аналогично. Результаты заносим в таблицу 2.

Определяем дисперсию параллельных опытов, например, для первого опыта (вода и керосин соответственно):

$$S_{\text{воспр}_i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \overline{y_i})^2 = \frac{1}{2} \left[(4, 15 - 4, 08)^2 + (4, 12 - 4, 08)^2 + (3, 97 - 4, 08)^2 \right] = 0,0093$$

$$S_{\text{воспр}_i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{i=1}^{m_i} (y_{ij} - \overline{y_i})^2 = \frac{1}{2} \left[(10, 4 - 10, 7)^2 + (10, 9 - 10, 7)^2 + (10, 8 - 10, 7)^2 \right] = 0, 07.$$

Для всех остальных аналогично. Результаты заносим в таблицу 2.

Вычисляем сумму дисперсии воспроизводимости для всех опытов (вода и керосин соответственно):

$$\sum_{i=1}^{8} S_{\text{воспр}_i}^2 = 0,0093 + 0,21 + 1,2979 + 0,07 + 1,75 + 0,13 + 1,27 + 0,73 = 5,4672$$

$$\sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр}_i}^2 = 0,07+0,05945+0,2919+0,0307+0,0387+0,3925+0,2469+0,0819=1,21205.$$

Из таблицы видно, что для 5 опыта (вода) и 6 опыта (керосин) величина дисперсии гораздо больше остальных. Поэтому осуществляем проверку дисперсий с использованием критерия Кохрена $G_{\rm pacq} < G_{\rm табл}$ (вода и керосин соответственно):

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum\limits_{i=1}^n S_{\text{воспр}_i}} = \frac{1,75}{5,4672} = 0,32$$

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum\limits_{i=1}^n S_{\text{воспр}_i}} = \frac{0,3925}{1,21205} = 0,3238.$$

Табличное значение критерия Кохрена $G_{\text{табл}}$ (при N=8, f=m-1=3-1=2), равно 0,5157. Так как выполняется условие $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ (0,32 < 0,5157,0,3238 < 0,5157), то принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

Вычисляем дисперсию воспроизводимости для всех экспериментов (вода и керосин соответственно):

$$\begin{split} S_{\text{воспр}}^2 &= S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{воспр}_i}^2 = \frac{5,4672}{8} = 0,6834 \\ S_{\text{воспр}}^2 &= S_{(y)}^2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{воспр}_i}^2 = \frac{1,21205}{8} = 0,1515. \end{split}$$

Вычисляем ошибку всего эксперимента (вода и керосин соответственно):

$$S(y) = \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{0,6834} \approx 0,83$$

 $S(y) = \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{0,1515} \approx 0,39.$

Рассчитываем коэффициенты уравнения (вода и керосин соответственно).

$$b_{i} = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} X_{in} \overline{y_{i}}, \quad b_{0} = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} \overline{y_{i}}, \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} X_{in} X_{jn} \overline{y_{i}}$$

$$b_{1} = \frac{-4,08 + 23,4 - 5,33 + 27,8 - 23,2 + 47,8 - 43,5 + 53,6}{8} = 9,56$$

$$b_{1} = \frac{-10,7 + 26,9 - 13,8 + 32,4 - 27,3 + 56,4 - 58,6 + 61,2}{8} = 8,31$$

Аналогично рассчитываются коэффициенты b_2 и b_3 (вода и керосин соответственно).

$$b_0 = \frac{4,08+23,4+5,33+27,8+23,2+47,8+43,5+53,6}{8} = 28,59$$

$$b_0 = \frac{10,7 + 26,9 + 13,8 + 32,4 + 27,3 + 56,4 + 58,6 + 61,2}{8} = 35,91$$

$$b_{12} = \frac{4,08 - 23,4 - 5,33 + 27,8 + 23,2 - 47,8 - 43,5 + 53,6}{8} = -1,415$$

$$b_{12} = \frac{10,7 - 26,9 - 13,8 + 32,4 + 27,3 - 56,4 - 58,6 + 61,2}{8} = -3,01$$

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

$$\widehat{y} = 28,59 + 9,56X_1 + 3,97X_2 + 13,44X_3 - 1,415X_1X_2 - 0,89X_1X_3 + 2,56X_2X_3 - 2,21X_1X_2X_3$$
(2)

$$\hat{y} = 35,91 + 8,31X_1 + 5,59X_2 + 14,96X_3 - 3,01X_1X_2 - 0,39X_1X_3 + 3,44X_2X_3 - 3,61X_1X_2X_3$$
(3)

Проверяем статистическую значимость коэффициентов.

Проверку проводим с помощью t-критерия. Для полного факторного эксперимента ошибки всех коэффициентов равны между собой и определяются следующим образом (вода и керосин соответственно):

$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nm}} = \frac{0.83}{\sqrt{8 \cdot 3}} = 0.17$$
$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nm}} = \frac{0.39}{\sqrt{8 \cdot 3}} = 0.08$$

Далее определяем доверительный интервал длиной 2 $\triangle b_i$ (вода и керосин соответственно):

$$\triangle b_i = t_{\text{таб,т}} S(b_i) = 2, 12 \cdot 0, 17 = 0, 36$$

 $\triangle b_i = t_{\text{таб,т}} S(b_i) = 2, 12 \cdot 0, 08 = 0, 17$

Табличное значение $t_{\text{табл}}$ выбираем для числа степеней свободы $f = N \times (m-1) = 8 \times (3-1)$ = 16 и по принятому уровню значимости 0,05, т.е. $t_{\text{табл}} = 2,12$. Таким образом, все коэффициенты уравнения (2), моделирующего полный факторный эксперимент в дистиллированной воде оказались статистически значимыми. Все коэффициенты уравнения (3), моделирующего полный факторный эксперимент в керосине осветительном, оказались статистически значимыми. После исключения статистически незначимого коэффициента b_3 уравнение регрессии принимает вид (вода и керосин соответственно):

$$\hat{y} = 28,59+9,56X_1+3,97X_2+13,44X_3-1,415X_1X_2-0,89X_1X_3+2,56X_2X_3-2,21X_1X_2X_3$$
 (3)

$$\hat{y} = 335, 91 + 8, 31X_1 + 5, 59X_2 + 14, 96X_3 - 3, 01X_1X_2 - 0, 39X_1X_3 + 3, 44X_2X_3 - 3, 61X_1X_2X_3$$
(4)

Проверяем уравнения на адекватность.

Данная проверка проводится с целью доказательства пригодности полученного уравнения регрессии для описания экспериментальных данных с заданной точностью. Для этого оценивают отклонения вычисленных по уравнениям регрессии (3 и 4) значений функции оптимизации \hat{y} от экспериментально установленных \bar{y} .

Для первого опыта уравнение регрессии (3 и 4) будет иметь вид (вода и керосин соответственно) (т.е вместо значений X_1, X_2, X_3 и т.д. выбираем + или - согласно 1 строке (1 опыту)).

$$\hat{y}_1 = 28,59 - 9,56 - 3,97 - 13,44 - 1,42 - 0,89 + 2,56 + 2,21 = 4,08$$

№ опыта	$\overline{\mathfrak{z}}$	\overline{li}	$\overline{y_i}$		
N- OHBITA	вода	керосин	вода	керосин	
1	4,08	10,7	4,085	10,7	
2	23,4	26,9	23,395	26,9	
3	5,33	13,8	5,315	13,8	
4	27,8	32,4	27,805	32,4	
5	23,2	27,3	23,205	27,3	
6	47,8	56,4	47,795	56,38	
7	43,5	58,6	43,515	58,6	
8	53,6	61,2	53,603	61,2	

Таблица 3: Сводные данные

$$\hat{y}_1 = 35,91 - 8,31 - 5,59 - 14,96 - 3,01 - 0,39 + 3,44 + 3,61 = 10,7$$

Аналогично рассчитываются значения для других опытов. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Для оценки отклонений используют критерий Фишера F-критерий.

Находят значения F- критерия Фишера (дисперсное отношение):

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{восц}}^2} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(y)},$$

где
$$S_{\mathrm{ad}}^2 = \frac{m_i}{N-1} \sum\limits_{i=1}^N (\overline{y_i} - \widehat{y})^2$$
 — дисперсия адекватности;

 m_i — число параллельных опытов в i-й строчке матрицы планирования;

 $\overline{y_i}$ — среднее арифметическое функции отклика (из m параллельных опытов) значение функции отклика;

 \hat{y} — предсказанное по уравнению (3 и 4) в i -м опыте;

l — число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

N — число независимых опытов.

Величина дисперсии адекватности (вода и керосин соответственно):

$$S_{\text{a,p}}^2 = \frac{m_i}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (\overline{y_i} - \widehat{y})^2 = \frac{3}{8-7} \sum_{1}^{8} (4,08-4,805)^2 + (23,40-23,395)^2 + (5,33-5,315)^2 + (27,80-27,805)^2 + (23,20-23,205)^2 + (47,80-47,795)^2 + (43,50-43,513)^2 + (53,6-53,605)^2 = 0,0018$$

$$S_{\text{a,p}}^2 = \frac{m_i}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (\overline{y_i} - \widehat{y})^2 = \frac{3}{8-7} \sum_{1}^{8} (10,7-10,7)^2 + (26,9-26,9)^2 + (13,8-13,8)^2 + (32,4-32,4)^2 + (27,3-27,3)^2 + (56,4-56,38)^2 + (58,6-58,6)^2 + (61,2-61,2) = 0,0012$$

Для того чтобы воспользоваться таблицей F-критерия, необходимо определить число степеней свободы $f_{\rm ag}$ и $f_{\rm восп}: f_{\rm ag}=N-1.$ $f_{\rm ag}=8-7=1,$ $f_{\rm восп}=N\times(m-1)=8(3-1)=16.$

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{1\text{ад}}^2}{S^2(y)} = \frac{0,0018}{0,175} = 0,0103$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{1\text{ад}}^2}{S^2(y)} = \frac{0,0012}{0,175} = 0,0068.$$

Исходя из найденных значений $f_{\rm ag}$, $f_{\rm Bocn}$ находим по таблице $F_{\rm табл}=4,49$. Если $F_{\rm pacq}< F_{\rm табл}$, то уравнение считают адекватным. В рассматриваемых примерах 0,0103<4,49,0,0068<4,49, значит уравнения адекватны.

Полученные уравнения были использованы для крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни): $X_1=120\,$ В, $X_2=150\,$ Гц, $X_3=44,75\,$ мкФ (таблица 4).

Наименование	X_1 (U, B)	X_2 $(f, \Gamma$ ц)	X_3 (C, MK Φ)	Y
Основной уровень	125	150	44,75	_
Коэффициент b_i	9,56	3,97	13,14	_
Интервал варьирования ξ_i	25	50	20,75	_
$b_i \cdot \xi_i$	239	198,5	272,7	_
Шаг $ \Delta i $	2,39	1,99	2,73	_
Округленный шаг	2	2	3	_
Реализованный опыт 1	127	152	47,75	39,01
Реализованный опыт 2	129	154	50,75	42,27
Реализованный опыт 3	131	156	53,75	48,78
Реализованный опыт 4	133	158	56,75	48,60
Реализованный опыт 5	135	160	59,75	51,63
Реализованный опыт 41(max)	210	230	65,5	51,38

Таблица 4: Расчет крутого восхождения (дистиллированная вода)

Согласно проведенной серии опытов принято предельное значение параметра оптимизации Y, которое составило 61,73 мкм. Таким образом, оптимальными параметрами для процесса получения электроэрозионного материала ВНЖ 95в керосине осветленном: ёмкость разрядных конденсаторов 65,5 мк Φ , напряжение на электродах 160 B, частота следования импульсов 205 Γ ц.

Далее представлены результаты экспериментальных исследований состава, структуры и свойств диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ в воде дистиллированной и керосине осветительном, полученных при оптимальных режимах.

Наименование	X_1 (U, B)	X_2 (f, Γ_{Π})	X_3 (C, MK Φ)	Y
Основной уровень	125	150	44,75	_
Коэффициент b_i	8,31	5,59	14,96	_
Интервал варьирования ξ_i	25	50	20,75	_
$b_i \cdot \xi_i$	207,75	279,50	310,42	_
Шаг $ \Delta i $	2,0775	2,795	3,1042	_
Округленный шаг	2	3	3	_
Реализованный опыт 1	127	153	47,75	39,01
Реализованный опыт 2	129	156	50,75	42,27
Реализованный опыт 3	131	159	53,75	48,78
Реализованный опыт 4	133	162	56,75	48,60
Реализованный опыт 5	135	165	59,75	51,63
Реализованный опыт 18(max)	160	205	65,5	61,73

Таблица 5: Расчет крутого восхождения (керосин осветительный)

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 воды $-51,\!38$ мкм при ёмкости разрядных конденсаторов $65,\!5$ мк Φ , напряжении на электродах $210 \mathrm{\ B}$, частоте следования импульсов $230 \mathrm{\ \Gamma}$ ц; для керосина $-61,73 \mathrm{\ mkm}$ при ёмкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 160 В и частоте следования импульсов 205 Гц.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Агеев Е. В., Гадалов В. Н., Семенихин Б. А., Агеева Е. В., Латыпов Р. А. Получение износостойких порошков из отходов твердых сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – №12. – С. 39–44.
- 2. Агеев Е. В., Гадалов В. Н., Семенихин Б. А., Агеева Е. В., Латыпов Р. А. Рентгеноструктурный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – №2. – С. 42–44.
- 3. Агеев Е.В., Гадалов В.Н., Семенихин Б.А., Агеева Е.В., Латыпов Р.А. Рентгеноспектральный микроанализ частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №2(74). – С. 13-16.
- 4. Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Агеева Е.В., Латыпов Р.А. Оценка эффективности применения твердосплавных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов, при восстановлении и упрочнении деталей композиционными гальваническими покрытиями // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №9(81). – C. 14–16.
- 5. 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.
- 6. Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Агеев Е. В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию // Вестник машиностроения. – 2014. – №10. – C. 66–68.
- 7. 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.
- 8. Агеева Е.В., Агеев Е.В., Карпенко В.Ю. Рентгеноструктурный анализ порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в водной среде // Вестник машиностроения. – 2014. – №12. – С. 64–65.

- 9. 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.
- 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.
- 11. 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.
- 12. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Карпенко В. Ю. Изучение формы и элементного состава порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в водной среде // Упрочняющие технологии и покрытия. − 2014. − №4(112). − С. 14–17.
- 13. Хорьякова Н. М., Агеев Е. В., Агеева Е. В. Электроэрозионные медные порошки для гальванических покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. №4(112). С. 18–20.
- 14. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Воробьев Е. А., Осьминина А.С. Получение износостойких покрытий с использованием электродов из твердосплавных электроэрозионных порошков и их исследование // Упрочняющие технологии и покрытия. − 2014. − №4(112). − С. 21–23.
- 15. Агеев Е. В., Агеева Е. В., Карпенко В. Ю., Осьминина А.С. Получение заготовок твердого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов // Упрочняющие технологии и покрытия. − 2014. − №4(112). −С. 24–27.
- 16. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Хорьякова Н. М. Изготовление заготовок из медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов электротехнической меди и изучение их свойств // Наукоемкие технологии в машиностроении. − 2014. − №10(40). − С. 10−13.
- 17. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Карпенко В. Ю. Размерный анализ частиц порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в воде // Вестник машиностроения. − 2015. − №3. − С. 45–46.
- 18. 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.
- 19. Агеева Е.В., Латыпов Р.А., Агеев Е.В., Алтухов А.Ю., Карпенко В.Ю. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. − 2015. − №1. − С. 71−76.
- 20. Агеева Е. В., Латыпов Р. А., Агеев Е. В., Алтухов А. Ю., Карпенко В. Ю. Характеристики электроискровых покрытий, полученных электродами из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. − 2015. − №2. − С. 62−65.

- 21. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Латыпов Р. А. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия
- 22. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Пикалов С.В., Агеев Е.В. Состав, структура и свойства медного электроэрозионного порошка, полученного в среде керосина // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – №4. – C. 4–8.
- 23. Левинсон Е. М. Электроэрозионная обработка металлов. Л.: Лениздат, 1961. 184 с.
- 24. Бурцев В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. –М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 c.
- 25. Седой В. С., Валевич В. В. Получение высокодисперсных металлических порошков методом электрического взрыва в азоте пониженного давления // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т.25. – Вып. 14. – С. 81–84.
- 26. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 464 с.

REFERENCES

- 1. Ageev E.V., Gadalov V.N., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. 2010, «Obtaining wear-resistant powders from solid alloy waste», Procurement in mechanical engineering, No.12, pp. 39-44.
- 2. Ageev E.V., Gadalov V.N., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. 2011, «X-ray Structural analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of a hard alloy», Procurement in mechanical engineering, No.2, pp. 42-44.
- 3. Ageev E.V., Gadalov V.N., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. 2011, «X-ray Spectral microanalysis of powder particles obtained by electroerosive dispersion of hard alloy», Strengthening technologies and coatings, No.2(74), pp. 13-16.
- 4. Ageev E.V., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov RA, 2011, «Evaluation of the effectiveness of the use of hard-alloy powders obtained by electroerosive dispersion of solid-alloy waste in the restoration and strengthening of parts with composite electroplating coatings», Hardening technologies and coatings, No.9(81), pp. 14-16.
- 5. Ageev E.V., Latypov R.A., Ageeva E.V. 2014, «Investigation of properties of electroerosive powders and hard alloy obtained from them by isostatic pressing and sintering», News of higher educational institutions. Nonferrous metallurgy, No.6, pp. 51-55.
- 6. Ageeva E.V., Horakova N.M. Ageev E.V. 2014, «Morphology and elemental composition of copper electroerosion powders suitable for sintering», Bulletin of mechanical engineering, No.10, pp. 66-68.
- 7. Ageeva E.V., Ageev E.V., Vorobyov E.A. 2014, «X-ray Spectral microanalysis of a powder obtained from high-speed steel waste by electroerosive dispersion in kerosene», Bulletin of mechanical engineering, No.11, pp. 71-72.

- 8. Ageeva E.V., Ageev E.V., Karpenko V.Yu. 2014, «X-ray Structural analysis of a powder obtained from tungsten-containing waste by electroerosive dispersion in an aqueous medium», Bulletin of mechanical engineering, No.12, pp. 64-65.
- Ageeva E.V., Horyakova N.M., Ageev E.V. 2014, «Investigation of the form and morphology of electroerosive copper powders obtained from waste», *Bulletin of mechanical engineering*, No.8, pp. 73-75.
- 10. 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», *Bulletin of mechanical engineering*, No.9, pp. 63-64.
- 11. Ageev E.V., Ageeva E.V., Vorobiev E.A. 2014, «Granulometric and phase compositions of powder obtained from tungsten-containing waste of tool materials by electroerosive dispersion in kerosene», *Hardening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 11-14.
- 12. Ageeva E.V., Ageev E.V., Karpenko V.Yu. 2014, «Study of the form and elemental composition of a powder obtained from tungsten-containing waste of tool materials by electroerosive dispersion in an aqueous medium», *Hardening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 14-17.
- 13. Horyakova N.M., Ageev E.V., Ageeva E.V. 2014, «Electroerosive copper powders for electroplating coatings», *Strengthening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 18-20.
- 14. Ageeva E.V., Ageev E.V., Vorobyov E.A., Osminina A.S. 2014, «Obtaining wear-resistant coatings using electrodes from hard-alloy electroerosive powders and their research», *Hardening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 21-23.
- 15. Ageev E.V., Ageeva E.V., Karpenko V.Yu., Osminina A.S. 2014, «Obtaining hard alloy billets from powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-containing waste», *Hardening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 24-27.
- 16. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M. 2014, «Production of blanks from copper powders obtained by electroerosive dispersion of waste electrical copper and study of their properties», *Science-Intensive technologies in mechanical engineering*, No.10(40), pp. 10-13.
- 17. Ageeva E.V., Ageev E.V., Karpenko V.Yu. 2015, «Dimensional analysis of powder particles obtained from tungsten-containing waste by electroerosive dispersion in water», *Bulletin of mechanical engineering*, No.3, pp. 45-46.
- 18. Ageeva E.V., Ageev E.V., Vorobiev E.A. 2015, «Analysis of the shape and morphology of powder particles obtained from tungsten-containing waste by electroerosive dispersion in kerosene», *Bulletin of mechanical engineering*, No.7, pp. 72-73.
- 19. Ageeva E.V., Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Yu., Karpenko V.Yu. 2015, «Assessment of wear resistance of electric spark coatings obtained using high-speed steel electroerosive powders», News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings, No.1, pp. 71-76.
- Ageeva E.V., Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Yu., Karpenko V.Yu. 2015, «Characteristics of electric spark coatings obtained by electrodes from high-speed steel electroerosive powders», News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings, No.2, pp. 62-65.

- 21. Ageeva E.V., Ageev E.V., Latypov R.A. 2015, «Evaluation of wear resistance of electric spark coatings obtained using high-speed steel electroerosive powders», News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings, No.3, p. 45.
- 22. Ageeva E.V., Horakova N.M. Pikalov, S.V., Ageev E.V. 2015, «Composition, structure and properties of copper spark erosion powder obtained in an environment of kerosene», News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings, No.4, pp. 4-8.
- 23. Levinson E.M. 1961, Electroerosion treatment of metals. Leningrad, Lenizdat. 184 p.
- 24. Burtsev V.A., Kalinin N.V., Luchinsky A.V. 1990, Electric explosion of conductors and its application in electrophysical installations. Moscow, Energoatomizdat. 288 p.
- 25. Gray V.S., Valevich V.V. 1999, «Preparation of highly dispersed metal powders method of electric explosion in the nitrogen of low pressure», Letters to the ZhTF, Vol.25, No.14, pp. 81-84.
- 26. Holm R. 1961, Electrical contacts. Moscow, Foreign literature Publishing house. 464 p.