

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-74-88>

Оптимизация технологического процесса диспергирования отходов латуни в углеродсодержащей среде постановкой полного факторного эксперимента

Е. В. Агеева¹ ✉, О. Г. Локтионова¹, А. С. Переверзев¹, Л. С. Аболмасова¹

¹ Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Оптимизация технологического процесса диспергирования отходов латуни в углеродсодержащей среде путем проведения полного факторного эксперимента.

Методы. Процесс электроэрозии отходов сплава ЛС58-3 проводили на запатентованной установке, в качестве металлоотходов применялись отходы сплава ЛС58-3 (ГОСТ 15527-2004). В качестве рабочей жидкости (среды диспергирования) был выбран спирт изопропиловый (ГОСТ 9805-84), являющийся углеродсодержащей средой.

Варьируемыми параметрами при работе установки являлись: подводимое к электродам напряжение (100–200 В); ёмкость разрядных конденсаторов (25–65 мкФ); частота возникновения разрядов 50–100 Гц. При появлении электрического разряда происходило мгновенное разрушение электродов и отходов и образование мельчайших частиц порошка.

Гранулометрический состав полученного порошка проводили с помощью анализатора размеров частиц Analysette 22 NanoTec.

Разработку математической модели процесса получения порошка свинцовой латуни проводили путем проведения полного факторного эксперимента типа 2³.

Результаты. В результате математических расчетов было определено максимальное значение выходного параметра оптимизации (среднего размера частиц), которое составило 23,8 мкм при следующих значениях факторов (режимов диспергирования): подводимое к электродам напряжение 200 В, частота возникновения разрядов 100 Гц, ёмкость разрядных конденсаторов 65 мкФ.

Заключение. На основании полученных результатов исследований и расчетов можно сделать вывод, что, изменяя режимы работы установки электроэрозионного диспергирования, можно получать порошки разного размера. На размер частиц получаемой шихты наибольшее влияние оказывает подводимое к электродам напряжение и ёмкость разрядных конденсаторов. При повышении значений этих параметров увеличивается массовый выход порошка, который напрямую зависит от размера получаемых частиц.

Полученное уравнение регрессии позволяет определить, на каких режимах работы установки возможно получение порошка заданного размера частиц.

Ключевые слова: свинцовая латунь; электроэрозионное диспергирование; полный факторный эксперимент; оптимизация.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет-2030».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Агеева Е. В., Локтионова О. Г., Переверзев А. С., Аболмасова Л. С., 2023

Для цитирования: Оптимизация технологического процесса диспергирования отходов латуни в углеродсодержащей среде постановкой полного факторного эксперимента / А. Е. Агеева, О. Г. Локтионова, А. С. Переверзев, Л. С. Аболмасова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 74–88. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-74-88>

Поступила в редакцию 12.07.2022

Подписана в печать 24.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Optimization of the Technological Process of Dispersing Brass Waste in a Carbon-Containing Environment by Setting up a Full Factorial Experiment

Ekaterina V. Ageeva¹ ✉, Oksana G. Loktionova¹, Anton S. Pereverzev¹,
Liliya S. Abolmasova¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Optimization of the technological process of dispersing brass waste in a carbon-containing environment by setting up a full factorial experiment.

Methods. The electroerosion process of LS58-3 alloy waste was carried out on a patented device, LS58-3 alloy waste (GOST 15527-2004) was used as metal waste. Isopropyl alcohol (GOST 9805-84), which is a carbon-containing medium, was chosen as the working fluid (dispersing medium).

Variable parameters during operation of the installation were: the voltage supplied to the electrodes (100...200 V); capacity of discharge capacitors (25...65 μF); discharge frequency 50...100 Hz.

When an electric discharge occurs, the electrodes and wastes are instantly destroyed and the smallest powder particles are formed. The granulometric composition of the obtained powder was carried out using the Analysette 22 NanoTec particle size analyzer. The development of a mathematical model of the process of obtaining lead brass powder was carried out by conducting a full factorial experiment of type 2^3 .

Results. As a result of mathematical calculations, the maximum value of the optimization output parameter (average particle size) was determined, which was 23.8 μm at the following values of the factors (dispersion modes): the voltage supplied to the electrodes is 200 V, the discharge frequency is 100 Hz, and the capacity of the discharge capacitors is 65 μF .

Conclusion. On the basis of the obtained results of studies and calculations, it is possible to conclude that by changing the operating modes of the EDM installation, it is possible to obtain powders of different sizes.

The voltage applied to the electrodes and the capacity of the discharge capacitors have the greatest influence on the particle size of the resulting charge. When the values of these parameters increase, the mass yield of the powder increases, which directly depends on the size of the obtained particles.

The obtained regression equation makes it possible to determine at which operating modes of the installation it is possible to obtain powder of a given particle size.

Keywords: lead brass; electrodispersion; full factorial experiment; optimization.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was carried out as part of the implementation of the development program of the Southwest State University of the "Priority-2030" project.

For citation: Ageeva A. E., Loktionova O. G., Pereverzev A. S., Abolmasova L. S. Optimization of the Technological Process of Dispersing Brass Waste in a Carbon-Containing Environment by Setting up a Full Factorial Experiment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(3): 74–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-74-88>

Received 12.07.2022

Accepted 24.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Латуни широко применяются как в машиностроении, химической промышленности, так и в производстве бытовых товаров. Свойства латуни способствуют постепенному росту её использования во всех областях. Этот сплав востребован повсеместно – начиная от производства ручек дверей, шестеренок часовых механизмов и заканчивая изготовлением сложных деталей в энергетике [1–3].

В настоящее время промышленность сталкивается с проблемой переработки отходов медных сплавов и повторного их использования [1–20]. В качестве одного из перспективных, но недостаточно изученных способов переработки металлоотходов в пригодные для повторного применения порошки является измельчение с помощью электроэрозии [1–5]. Однако в промышленности данный способ переработки практически не применяется, поскольку в технической литературе отсутствуют полноценные сведения о составе, структуре и свойствах получаемых таким образом порошков.

Наибольший исследовательский интерес вызывает электродиспергирование отходов свинцовой латуни ЛС58-3. Свинцовые латуни – это медно-цинковые сплавы с добавлением свинца. Свинец улучшает возможности обработки и антифрикционные свойства латуни, что способствует широкому использованию для изготовления деталей пар трения. Переработка отходов свинцовой латуни в порошки и их повторное применение является актуальным [2].

Результаты предварительных исследований показали влияние режимов электродиспергирования на гранулометрический состав частиц шихты. В связи с этим определение оптимальных режимов процесса получения порошка электроэрозионной свинцовой латуни проводили по среднему размеру получаемых частиц путем проведения полного факторного эксперимента, где в качестве факторов были выбраны следующие параметры: подводимое к электродам напряжение, частота возникновения разрядов, емкость разрядных конденсаторов [1–5].

Целью исследования являлась оптимизация технологического процесса диспергирования отходов латуни в углеродсодержащей среде постановкой полного факторного эксперимента.

Материалы и методы

Процесс электроэрозии отходов сплава ЛС58-3 проводили на запатентованной установке [21] (рис. 1). В качестве металлоотходов применялись отходы сплава ЛС58-3 (ГОСТ 15527-2004), в качестве рабочей жидкости (среды диспергирования) был выбран спирт изопропиловый (ГОСТ 9805-84), являющийся углеродсодержащей средой.

Варьируемыми параметрами при работе установки являлись:

- подводимое к электродам напряжение (100–200 В);
- ёмкость разрядных конденсаторов (25–65 мкФ);
- частота возникновения разрядов 50–100 Гц.



Рис. 1. Внешний вид оборудования для переработки металлотходов в пригодные для промышленного применения металлические частицы [21]

Fig. 1. Appearance of the plant for the production of nanodisperse powders from conductive materials [21]

При появлении электрического разряда происходило мгновенное разрушение электродов и отходов и образование мельчайших частиц порошка [6–7].

Гранулометрический состав полученного порошка проводили с помощью анализатора размеров частиц Analysette 22 NanoТес, согласно методике, представленной на блок-схеме (рис. 2).

Разработку математической модели процесса получения порошка свинцовой латуни проводили путем проведения пол-

ного факторного эксперимента типа 2^3 согласно этапам, представленным на блок-схемах (рис. 3 и 4).

Оптимизация проводилась для определения такой комбинации уровней факторов, при которой удастся достичь максимальных (минимальных) значений параметров оптимизации. Для этих целей применяют метод крутого восхождения Бокса и Уилсона. Блок-схема методики расчета крутого восхождения представлена на рисунке 5 [8].

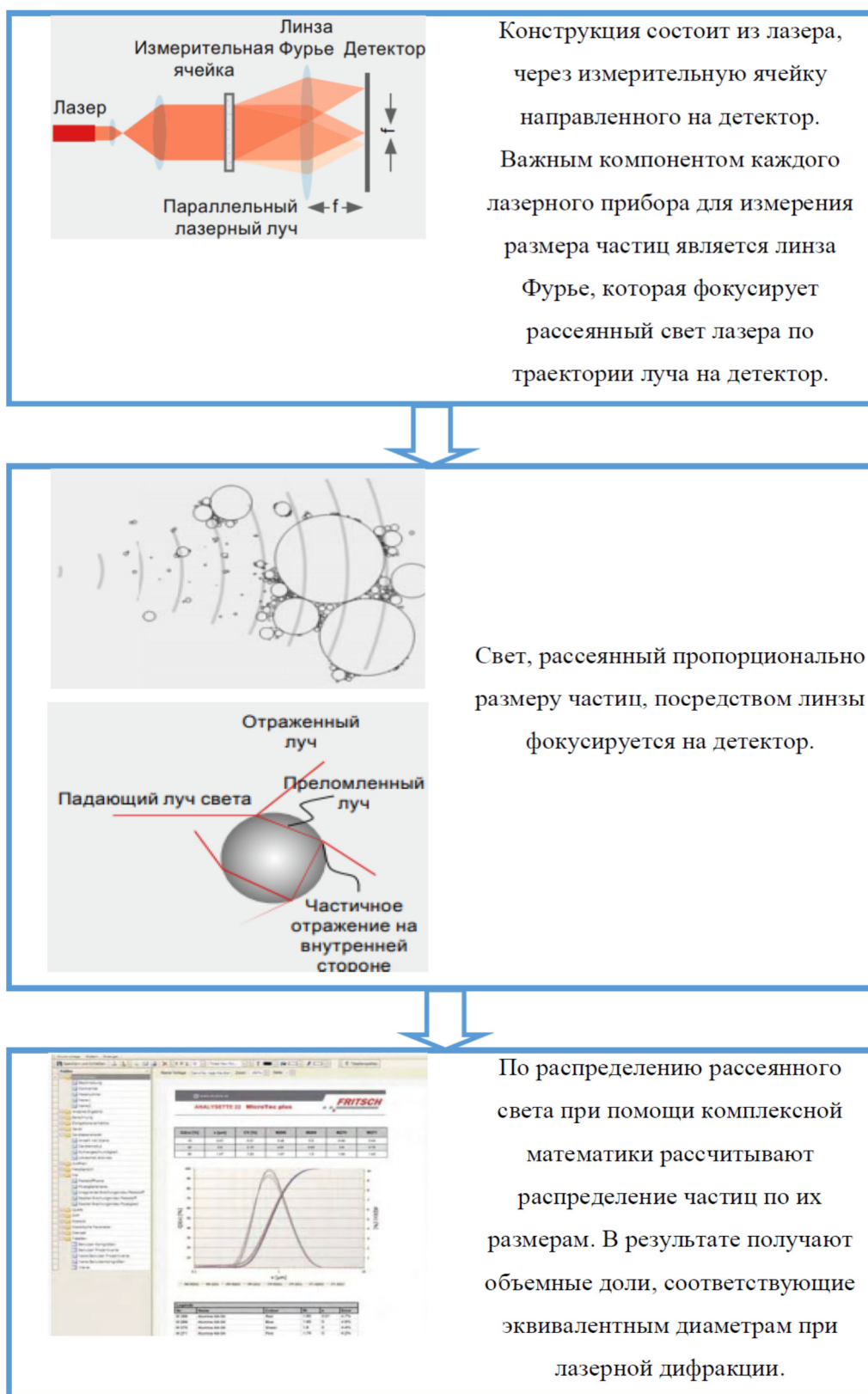


Рис. 2. Принципиальная блок-схема определения размеров частиц

Fig. 2. Schematic block diagram of particle sizing

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

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3$$

где X_1, X_2, X_3 – факторы,

Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	X_1	X_2	X_3
Основной уровень	0			
Интервал варьирования	Δx_i			
Верхний уровень	+1			
Нижний уровень	-1			

Каждый опыт проводится трижды (y_1, y_2, y_3).

Используя уравнения $X_1 = \frac{u-o}{\Delta x_{i(u)}}$; $X_2 = \frac{v-o}{\Delta x_{i(v)}}$; $X_3 = \frac{c-o}{\Delta x_{i(c)}}$, перекодируем значения факторов и составим матрицу планирования эксперимента.

№ 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	\bar{y}_i	$S^2_{\text{воспр}_i}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-					
2	+	+	-	-	-	-	+	+					
3	+	-	+	-	-	+	-	+					
4	+	+	+	-	+	-	-	-					
5	+	-	-	+	+	-	-	+					
6	+	+	-	+	-	+	-	-					
7	+	-	+	+	-	-	+	-					
8	+	+	+	+	+	+	+	+					

Рис. 3. Блок-схема постановки полного факторного эксперимента. Этап 1

Fig. 3. Flowchart for setting up a complete factorial experiment. Stage 1

$$1. \bar{y}_i = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$$

2. Определяем дисперсию параллельных опытов:

$$S_{\text{воспр}i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

3. Вычисляем сумму дисперсии воспроизводимости для всех опытов $\sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр}i}^2$

4. Осуществляем проверку дисперсий с использованием критерия Кохрена:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^n S_{\text{воспр}i}^2}$$

Сравниваем $G_{\text{расч}}$ и $G_{\text{табл}}$. Если $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$, принимаем гипотезу об однородности дисперсий. Если $G_{\text{расч}} > G_{\text{табл}}$, дисперсия неоднородная.

5. Вычисляем дисперсию воспроизводимости для всех экспериментов

$$S_{\text{восп}}^2 = S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{воспр}i}^2$$

6. Вычисляем ошибку всего эксперимента

$$S(y) = \sqrt{S_{(y)}^2}$$

7. Рассчитываем коэффициенты уравнения

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} \bar{y}_i, \quad b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_i, \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} X_{jn} \bar{y}_i$$

8. Составление уравнения регрессии

$$\hat{y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3$$



9. Проверяем статистическую значимость коэффициентов.

$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nm}}$$

Далее определяем доверительный интервал длиной $2\Delta b_i$:

$$\Delta b_i = t_{\text{табл}} S(b_i)$$

Табличное значение $t_{\text{табл}}$ выбираем для числа степеней свободы $f = N(m - 1)$

Сравниваем Δb_i и b_i . Если $\Delta b_i > b_i$, то коэффициент не значимый – исключаем из уравнения регрессии. Если $\Delta b_i < b_i$, то коэффициент значимый – оставляем в уравнении регрессии.

10. Проверяем уравнение на адекватность

Находят значения F -критерия Фишера (дисперсное отношение):

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

Для того чтобы воспользоваться таблицей F -критерия, необходимо определить число степеней свободы $f_{\text{ад}}$ и $f_{\text{восп}}$: $f_{\text{ад}} = N - 1$, $f_{\text{восп}} = N(m - 1)$.

Исходя из найденных значений $f_{\text{ад}}$, $f_{\text{восп}}$ находим по таблице $F_{\text{табл}}$. Если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, то уравнение считают адекватным.

Рис. 4. Блок-схема постановки полного факторного эксперимента. Этап 2

Fig. 4. Flowchart for setting up a complete factorial experiment. Stage 2



Рис. 5. Блок-схема расчета крутого восхождения

Fig. 5. Block diagram for calculating steep ascent

Результаты и их обсуждение

Основными технологическими параметрами процесса диспергирования являются подводимое к электродам напряжение, частота возникновения разрядов и емкость разрядных конденсаторов. Изменение значений этих параметров и их комбинация оказывают влияние на массовый выход порошка и его количество, которое

напрямую связано с размером частиц получаемого порошка. Поэтому эти параметры были выбраны в качестве факторов, оказывающих влияние на параметр оптимизации – средний размер частиц.

Значения выбранных уровней варьировемых факторов даны в таблице 1.

Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования**Table 1.** Variation levels and intervals

Уровень варьируемых факторов The level is variable factors	Обозначение кодовое Designation code	U, В	γ, Гц	C, мкФ
		X_1	X_2	X_3
Основной уровень Main level	0	150	75	45
Интервал варьирования Variation interval	Δx_i	50	25	20
Верхний уровень Upper level	+1	200	100	65
Нижний уровень Lower level	-1	100	50	25

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента**Table 2.** Experiment planning matrix

Номер 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	\bar{y}_i	$S^2_{\text{воспр}i}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	8,2	4,1	6,1	6,1	4,2
2	+	+	-	-	-	-	+	+	15,1	16,4	17,3	16,3	1,28
3	+	-	+	-	-	+	-	+	9,2	11,4	8,6	9,7	2,18
4	+	+	+	-	+	-	-	-	22,4	18,1	20,2	20,2	3,3
5	+	-	-	+	+	-	-	+	11,4	10,8	12,6	10,6	2,34
6	+	+	-	+	-	+	-	-	23,7	20,6	20,8	21,7	3,21
7	+	-	+	+	-	-	+	-	12,6	10,6	11,0	11,4	1,52
8	+	+	+	+	+	+	+	+	24,9	28,1	28,3	27,1	3,44

В результате математических расчетов было получено уравнение регрессии, являющееся математической моделью, описывающей процесс электродиспергирования отходов свинцовой латуни в спирте изопропиловом:

$$\hat{y} = 12 + 5,9X_1 + 1,7X_2 + 2,3X_3 + 0,61X_1X_2 + 0,76X_1X_3 - 0,16X_2X_3 + 0,54X_1X_2X_3.$$

Проверка статистической значимости коэффициентов показала, что все коэффициенты уравнения, моделирующего полный факторный эксперимент диспергирования отходов свинцовой латуни, кроме b_{23} , оказались статистически значимыми.

Исключив статистически незначимый коэффициент, уравнение регрессии принимает вид

$$\hat{y} = 12 + 5,9X_1 + 1,7X_2 + 2,3X_3 + 0,61X_1X_2 + 0,76X_1X_3 + 0,54X_1X_2X_3.$$

В результате проверки уравнения на адекватность с использованием критерия Фишера установлено, что уравнение адекватно.

Полученная математическая модель была использована для расчета крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевых точек (основных уровней) (табл. 3).

Таблица 3. Calculation of steep ascent

Table 3. Calculation of steep ascent

Наименование Name	X_1 (U, В)	X_2 (γ , Гц)	X_3 (C, мкФ)	\hat{y} , мкм
Основной уровень Main level	150	75	45	-
Коэффициент The coefficient b_i	5,9	1,7	2,3	-
Интервал варьирования ξ_i Variation interval ξ_i	50	25	20	-
$b_i \cdot \xi_i$	295	42,5	46	-
Шаг Δ_i Step Δ_i	14,75	2,13	2,3	-
Округленный шаг Rounded step	15	3	3	-
Опыт 1 Experience 1	165	78	48,0	14,3
Опыт 2 Experience 2	180	81	51	16,88
Опыт 3 Experience 3	195	84	54	19,52
Опыт 4 Experience 4	200	87	57	21,0
Опыт 5 Experience 5	200	90	60	21,8
Опыт 6 Experience 6	200	93	63	22,6
Опыт 7 Experience 7	200	96	65	23,3
Опыт 8 Experience 8	200	99	65	23,6
Опыт 9 (max) Experience 9 (max)	200	100	65	23,8

В результате математических расчетов было определено максимальное значение выходного параметра оптимизации (среднего размера частиц), которое составило 23,8 мкм при следующих значениях факторов (режимов диспергирования): подводимое к электродам напряжение 200 В, частота возникновения разрядов 100 Гц, емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ.

Выводы

На основании полученных результатов исследований и расчетов можно сделать вывод, что, изменяя режимы работы установки электроэрозионного диспергирования, можно получать порошки разного размера.

На размер частиц получаемой шихты наибольшее влияние оказывает подводимое к электродам напряжение и емкость

разрядных конденсаторов. При повышении значений этих параметров увеличивается массовый выход порошка, который напрямую зависит от размера получаемых частиц.

Полученное уравнение регрессии позволяет определить, на каких режимах работы установки возможно получение порошка заданного размера частиц.

Список литературы

1. Агеев Е. В., Переверзев А. С. Оптимизация процесса получения электроэрозионной шихты бронзы БрС30 для производства спеченных бронзовых сплавов на её основе // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11, № 2. С. 26–42.
2. Математическое моделирование технологических параметров процесса получения антифрикционных сплавов на основе шихты электроэрозионной свинцовой бронзы / Е. В. Агеева, А. С. Переверзев, П. А. Макаренко [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 1. С. 54–69.
3. Дифрактограмма электроэрозионного вольфрамокобальтового порошка, используемого в износостойких покрытиях / Е. В. Агеева, А. Ю. Алтухов, С. С. Гулидин, М. А. Зубарев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 1(22). С. 6–13.
4. Хорьякова, Н. М., Агеев Е. В., Латыпов Р. А. Сравнительная характеристика морфологии и твердости спеченных образцов из электроэрозионного медного порошка и ПМС-1 // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 1(22). С. 14–20.
5. Агеев Е. В., Хардинов С. В., Алтухов А. Ю. Исследование производительности процесса ЭЭД при получении порошковой шарикоподшипниковой стали // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 1(22). С. 21–26.
6. Агеева Е. В., Переверзев А. С., Осьминина А. С. Исследование влияния электрических параметров установки на производительность процесса электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы в дистиллированной воде // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 1(26). С. 6–13.
7. Оптимизация гранулометрического состава электроэрозионных кобальтохромовых порошков / Е. В. Агеева, А. Ю. Алтухов, А. А. Сысоев, А. С. Осьминина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 1(26). С. 14–23.
8. Математическая оптимизация процесса электродиспергирования отходов сплава ВНЖ / Е. В. Агеева, Е. В. Агеев, О. В. Кузовлева, А. Е. Гвоздев // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22, № 2(78). С. 389–401.
9. Милых А. Н., Муратов В. А., Щерба А. А. Особенности управления режимами источников питания установок электроэрозионного диспергирования металлов // Проблемы преобразовательной техники. 1983. Ч. 5. С. 201–204.
10. Аскарходжаев Т. И., Пирнаев Ш. А. Роль дорожных фрез в технологии ремонта изношенного дорожного полотна // Транспорт шелкового пути. № 3–4. 2019. С. 109–120.
11. Рамазанов Г. Х. Износ инструмента дорожной фрезы и модели эффективности резания // Наукоемкие технологии в машиностроении. № 1(139). 2023. С. 43–48.
12. Фурманов Д. В., Шамахов Л. М., Лысаков Н. Э. Влияние износа режущего элемента дорожной фрезы на силу сопротивления резанию асфальтобетона // Вестник СибАДИ. 2023. № 20(2). С. 204–216.
13. Шеховцова Ю. С., Ролдугина В. А., Ермолаева Т. Н. Разработка методики рентгенофлуоресцентного анализа стартовых металлургических смесей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 4. С. 209–221.
14. Карпенко Н. Н., Латыпов Р. А., Агеева Е. В., Карпенко В. Ю. Рентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализ электроэрозионных порошковых материалов из отходов стали Р18 //

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 3. С. 23–38.

15. Validation of secondary fluorescence excitation in quantitative X-ray fluorescence analysis of thin alloy films / A. Wählich, C. Streeck, P. Hönicke, B. Beckhoffa // *J. Anal. At. Spectrom.* 2020. Vol. 35. P. 1664–1670. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ja/d0ja00171f>

16. Агеева Е. В., Поданов В. О., Воробьев Ю. С. Исследование химсостава жаропрочных сплавов методом рентгенофлуоресцентного анализа на примере турбинной лопатки // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10, № 4. С. 35–47.

17. Полякова М. А., Босикова Е. Ю. Особенности применения рентгенофлуоресцентного анализа для определения состава материалов // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. № 16. 2017. С. 92–98.

18. Агеева Е. В., Королев М. С., Воробьев Ю. С. Исследование элементного состава свинцово-сурьмянистых сплавов методом рентгенофлуоресцентного анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10, № 4. С. 8–21.

19. Об использовании нитроцементованной стали 30ХГТ для резцов дорожных фрез / В. И. Колмыков, Д. Н. Романенко, К. И. Абышев [и др.] // Современные проблемы сварочного производства: сборник научных трудов / под ред. М. А. Иванова, И. А. Ильина. Челябинск: Изд. Центр ЮУрГУ, 2016. С. 290–299.

20. Кирюшкина Н. А., Кузнецова В. Н. Повышение долговечности работы резцов дорожной фрезы // Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых ученых: материалы Международной научно-практической конференции. Омск: Сиб. гос. автомобильно-дорожная акад. (СИБАДИ), 2016. С. 264–267.

21. Патент № 2449859 Российская Федерация, МПК В22F 9/14, В23Н 1/02, В82У 40/00. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов / Агеев Е. В., Семенихин Б. А., Латыпов Р. А., Аниканов В. И. № 2010104316/02; заявл. 08.02.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.

References

1. Ageev E. V., Pereverzev A. S. Optimizatsiya protsessa polucheniya elektroerozionnoi shikhty bronzy BrS30 dlya proizvodstva spechennykh bronzovykh spлавov na ee osnove [Optimization of the process of obtaining electroerosive charge of bronze BrS30 for the production of sintered bronze alloys based on it]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 26–42.

2. Ageeva E. V., Pereverzev A. S., Makarenko P. A., eds. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh parametrov protsessa polucheniya antifriktsionnykh spлавov na osnove shikhty elektroerozionnoi svintsovoi bronzy [Mathematical modeling of technological parameters of the process of obtaining antifriction alloys based on a charge of electroerosive lead bronze]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 54–69.

3. Ageeva E. V., Altukhov A. Yu., Gulidin S. S., Zubarev M. A. Difraktogramma elektroerozionnogo vol'framokobalt'ovogo poroshka, ispol'zuemogo v iznosostoikikh pokrytiyakh [Diffraction pattern of electroerosive tungsten-cobalt powder used in wear-resistant coatings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, vol. 7, no. 1(22), pp. 6–13.

4. Khoryakova N. M., Ageev E. V., Latypov R. A. Sravnitel'naya kharakteristika morfologii i tverdosti spechennykh obraztsov iz elektroerozionnogo mednogo poroshka i PMS-1 [Comparative characteristics of the morphology and hardness of sintered samples from electroerosive copper powder and PMS-1]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings*

of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies, 2017, vol. 7, no. 1(22), pp. 14–20.

5. Ageev E. V., Khardikov S. V., Altukhov A. Yu. Issledovanie proizvoditel'nosti protsessa EED pri poluchenii poroshkovoi sharikopodshipnikovoi stali [Study of the productivity of the EED process in the production of powdered ball-bearing steel]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, vol. 7, no. 1(22), pp. 21–26.

6. Ageeva E. V., Pereverzev A. S., Osminina A. S. Issledovanie vliyaniya elektricheskikh parametrov ustanovki na proizvoditel'nost' protsessa elektroerozionnogo dispergirovaniya otkhodov svintsovoi bronzы v distillirovannoi vode [Study of the influence of the electrical parameters of the installation on the productivity of the process of electroerosive dispersion of lead bronze waste in distilled water]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 1(26), pp. 6–13.

7. Ageeva E. V., Altukhov A. Yu., Sysoev A. A., Osminina A. S. Optimizatsiya granulometricheskogo sostava elektroerozionnykh kobal'tokhromovykh poroshkov [Optimization of particle size distribution of electroerosive cobalt-chromium powders]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 1(26), pp. 14–23.

8. Ageeva E. V., Ageev E. V., Kuzovleva O. V., Gvozdev A. E. Optimizatsiya granulometricheskogo sostava elektroerozionnykh kobal'tokhromovykh poroshkov [Mathematical optimization of the process of electrodispersion of VNZh alloy wastes]. *Chebyshevskii sbornik = Chebyshev Collection*, 2021, vol. 22, no. 2(78), pp. 389–401.

9. Milyakh A. N., Muratov V. A., Shcherba A. A. Osobennosti upravleniya rezhimami istochnikov pitaniya ustanovok elektroerozionnogo dispergirovaniya metallov [Peculiarities of managing modes of power sources of installations of electroerosion dispersion of metals]. *Problemy preobrazovatel'noi tekhniki = Problems of transformative technology*, 1983, pt. 5, pp. 201–204.

10. Askarkhodzhaev T. I., Pirnaev Sh. A. Rol' dorozhnykh frez v tekhnologii remonta iznoshennogo dorozhnogo polotna [The role of road cutters in the technology of repairing a worn roadbed]. *Transport shelkovogo puti = Silk Road Transport*, 2019, vol. 3–4, pp. 109–120.

11. Ramazanov G. Kh. Iznos instrumenta dorozhnoi frezy i modeli effektivnosti rezaniya [Wear of a road milling tool and a model of cutting efficiency]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science-intensive technologies in mechanical engineering*, 2023, vol. 1(139), pp. 43–48.

12. Furmanov D. V., Shamakhov L. M., Lysakov N. E. Vliyanie iznosa rezhushchego elementa dorozhnoi frezy na silu soprotivleniya rezaniyu asfal'tobetona [Influence of wear of the cutting element of a road mill on the cutting resistance force of asphalt concrete]. *Vestnik SibADI = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2023, vol. 20(2), pp. 204–216. (In Russ.)

13. Shekhovtsova Yu. S., Roldugina V. A., Ermolaeva T. N. Razrabotka metodiki rentgenofluorestscentnogo analiza startovykh metallurgicheskikh smesei [Development of a technique for X-ray fluorescence analysis of starting metallurgical mixtures]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 209–221.

14. Karpenko N. N., Latypov R. A., Ageeva E. V., Karpenko V. Yu. Rentgenospektral'nyi i rentgenostrukturnyi analiz elektroerozionnykh poroshkovykh materialov iz otkhodov stali R18 [X-ray spectral and X-ray diffraction analysis of electroerosive powder materials from R18 steel waste]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Technics and Technologies*, 2022, vol. 12(3), pp. 23–38.

15. Wählich A., Streeck C., Hönicke P., Beckhoff B. Validation of secondary fluorescence excitation in quantitative X-ray fluorescence analysis of thin alloy films. *J. Anal. At. Spectrom*, 2020, vol. 35, pp. 1664–1670. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ja/d0ja00171f>

16. Ageeva E. V., Podanov V. O., Vorobyov Yu. S. Issledovanie khimsostava zharoprochnykh splavov metodom rentgenofluorestscentnogo analiza na primere turbinnoi lopatki [Study of the chemical

composition of heat-resistant alloys by X-ray fluorescence analysis on the example of a turbine blade]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Technics and Technologies*, 2020, vol. 10(4), pp. 35–47.

17. Polyakova M. A., Bosikova E. Yu. Osobennosti primeneniya rentgenofluoretsentnogo analiza dlya opredeleniya sostava materialov [Features of the use of X-ray fluorescence analysis to determine the composition of materials]. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki = Technologies of metallurgy, mechanical engineering and material processing*, 2017, vol. 16, pp. 92–98.

18. Ageeva E. V., Korolev M. S., Vorobyov Yu. S. Issledovanie elementnogo sostava svintsovo-sur'myanistykh splavov metodom rentgenofluoretsentnogo analiza [Investigation of the elemental composition of lead-antimony alloys by X-ray fluorescence analysis]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2020, vol. 10(4), pp. 8–21.

19. Kolmykov V. I., Romanenko D. N., Ayshev K. I., Nefediev S. P., Dema R. R. Ob ispol'zovanii nitrotsementovannoi stali 30KHGT dlya reztsov dorozhnykh frez [On the use of nitrocarburized steel 30KHGT for cutters of cold cutters]. *Sovremennye problemy svarochnogo proizvodstva. Sbornik nauchnykh trudov = Modern problems of welding production. Collection of scientific papers*; ed. by M. A. Ivanova, I. A. Ilyin. Chelyabinsk, Izd. centr YuUrGU, 2016, pp. 290–299.

20. Kiryushkina N. A., Kuznetsova V. N. Povyshenie dolgovechnosti raboty reztsov dorozhnoi frezy [Increasing the durability of the cutters of a road mill]. *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki glazami molodykh uchenykh. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of science and technology through the eyes of young scientists. Materials of the International scientific-practical conference]. Omsk, Siberian St. Automobile and Highway Univ. Publ., 2016, pp. 264–267.

21. Ageev E. V., Semenikhin B. A., Latypov R. A., Anikanov V. I. Ustanovka dlya polucheniya nanodispersnykh poroshkov iz tokoprovodyashchikh materialov [Installation for the production of nanodisperse powders from conductive materials. Patent RF, no. 2449859, 2012.

Информация об авторах / Information about the Authors

Агеева Екатерина Владимировна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8457-6565, SPIN-код: 2561-0708

Ekaterina V. Ageeva, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8457-6565, SPIN-код: 2561-0708

Локтионова Оксана Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: 0000-0002-8491-2829, SPIN-код: 1506-3988

Oksana G. Loktionova, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: 0000-0002-8491-2829, SPIN-code: 1506-3988

Переверзев Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: chaser-93@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-8460-3364,
Researcher ID: C-4041-2019,
SPIN-код: 5855-3763

Аболмасова Лилия Сергеевна, аспирант кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: lili4695@mail.ru,
SPIN-код: 6707-9531

Anton S. Pereverzev, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Technology of Materials and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: chaser-93@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-8491-2829,
Researcher ID: C-4041-2019,
SPIN-код: 5855-3763

Liliya S. Abolmasova, Post-Graduate Student of the Department of Materials and Transport Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: lili4695@mail.ru,
SPIN code: 6707-9531