УДК 621.762.227

Е.В. Агеева, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: ageeva-ev@yandex.ru)

Н.М. Хорьякова, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: natali030119891@yandex.ru)

Г.Р. Латыпова, ст. преподаватель, Московский государственный политехнический университет (e-mail: latipov46@mail.ru)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МЕДНЫХ ОТХОДОВ В ВОДЕ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ПОСТАНОВКОЙ ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На сегодняшний день в литературе отсутствуют сведения о получении методом электроэрозионного диспергирования многих порошков, в т.ч. медных, поэтому исследование данного процесса является актуальным и необходимым. Проведение традиционных экспериментов электроэрозионного диспергирования, основанных на поочередном варьировании отдельных независимых переменных (например, емкость разрядных конденсаторов, напряжение, частота следования импульсов и пр.), когда остальные остаются неизменными (например, среда, материал и пр.), требуют больших затрат, сил и средств. Эксперименты, являются многофакторными и связаны с оптимизацией качества материалов, отысканием оптимальных условий проведения технологического процесса электроэрозионного диспергирования, разработкой наиболее рациональной конструкции оборудования и т.д. В итоге, системы являются такими сложными, что не поддаются теоретическому изучению в разумные сроки. Поэтому, возникает необходимость поиска пути, позволяющего вести исследовательскую работу ускоренными темпами и обеспечивающего принятие решений, близких к оптимальным. Этим путем явился статистический метод постановки факторного эксперимента.

Целью настоящей работы являлось определение оптимальных электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования постановкой полного факторного эксперимента и изучение формы и морфологии медных электроэрозионных порошков, полученных при оптимальных параметрах процесса.

Определение оптимальных электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования постановкой полного факторного эксперимента проводили по производительности процесса получения медного порошка

Экспериментально установлено, что оптимальными параметрами для процесса получения порошков меди методом электроэрозионного диспергирования в воде дистиллированной являются: емкость разрядных конденсаторов 45,5 мФ, напряжение на электродах 220 В, частота следования импульсов 100 Гц.

Ключевые слова: *электроэрозионное диспергирование, установка, оптимальные параметры.*

***

В последние десятилетия в результате исследований электроэрозии в межэлектродном промежутке, заполненном свободно соприкасающимися гранулами металла и диэлектрической рабочей жидкостью появилась возможность создания производительной технологии получения дисперсных порошков металлов и их соединений. Высокая производительность порошкообразования и дисперсность продукта, экологическая чистота основного технологического процесса и возможность получения мелкодисперсных порошков практически всех токопроводящих материалов (включая сверхтвердые, жаропрочные и пластичные) и их соединений с элементами рабочей жидкости (карбидов, оксидов, гидрооксидов) определяют перспективу и актуальность данного направления исследования [1–5].

Однако на сегодняшний день в литературе отсутствуют сведения о получении методом электроэрозионного диспергирования многих порошков, в т.ч. медных, по-

этому исследование данного процесса является актуальным и необходимым.

Проведение традиционных экспериментов электроэрозионного диспергирования, основанных на поочередном варьировании отдельных независимых переменных (например емкость разрядных конденсаторов, напряжение, частота следования импульсов и пр.), когда остальные остаются неизменными (например среда, материал и пр.), требуют больших затрат, сил и средств. Эксперименты являются многофакторными и связаны с оптимизацией качества материалов, отысканием оптимальных условий проведения технологического процесса электроэрозионного диспергирования, разработкой наиболее рациональной конструкции оборудования и т.д. В итоге, системы являются такими сложными, что не поддаются теоретическому изучению в разумные сроки. Поэтому, возникает необходимость поиска пути, позволяющего вести исследовательскую работу ускоренными темпами и обеспечивающего принятие решений, близких к оптимальным. Этим путем явился статистический метод постановки факторного эксперимента [6].

Целью настоящей работы являлось определение оптимальных электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования постановкой полного факторного эксперимента и изучение формы и морфологии медных электроэрозионных порошков, полученных при оптимальных параметрах процесса.

Определение оптимальных электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования постановкой полного факторного эксперимента проводили по производительности процесса получения медного порошка [6].

Для постановки факторного эксперимента были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов (табл. 1).

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 2.

Для определения дисперсии параметра оптимизации было проведено три опыта при нахождении факторов на основных уровнях (вода). Полученные значения параметра оптимизации y_u, его среднее значение ý, отклонения значений параметра оптимизации от его среднего значения (y_u–ý) и квадраты их отклонений приведены в таблице 3.

Дисперсия параметра оптимизации:

$$S_{y^2} = \sum_{n=1}^{3} y_u / 3. \quad (1)$$

$$S_{y^2} = 17{,}27.$$

Находим коэффициенты модели:

$$b_0 = \Sigma\, y_i / N. \quad (2)$$

$$b_i = \Sigma\, x_{ij} y_i / N. \quad (3)$$

$b_0 = 17{,}3$; $b_1 = 11{,}8$; $b_2 = 26{,}7$; $b_3 = 66{,}6$.

Средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии:

$$S\{b_i\} = (Sy / N)^{1/2}. \quad (4)$$

$$S\{b_i\} = (Sy / 3)^{1/2} = 1{,}2.$$

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования

Наименование	Факторы		
	X_1 (C, мкФ)	X_2 (f, Гц)	X_3 (U, В)
Основной уровень	35,5	80	200
Интервал варьирования	10	20	10
Верхний уровень (+)	55,5	160	250
Нижний уровень (–)	15,5	10	50

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Порядок реализации опыта	X_0 (Среда)	X_1 (С, мкФ)	X_2 (f, Гц)	X_3 (U, В)	Y (П, г/час)
1	4	+	+	+	+	16,56
2	3	+	–	+	+	10,62
3	8	+	+	–	+	4,86
4	5	+	–	–	+	1,02
5	7	+	+	+	–	1,78
6	2	+	–	+	–	1,46
7	1	+	+	–	–	0,22
8	6	+	–	–	–	0,12

Таблица 3

Вспомогательная таблица для расчета S_{y^2}

Номер опыта	y_u	ý	$(y_u – ý)$	$(y_u – ý)^2$
1	17,27	$\sum_{n=1}^{3} \Sigma y_u / 3 = 17,27$	0	0
2	17,37		+0,1	0,01
3	17,17		-0,1	0,01
$\Sigma(y_u – ý)^2$				0,02

Доверительный интервал коэффициентов регрессии при числе степеней свободы f=2:

$\Delta b = \pm t \cdot S\{b_i\}$. (5)

$\Delta b = \pm 4,3 \cdot 1,2 = \pm 5,5$.

Все коэффициенты регрессии по абсолютной величине больше доверительного интервала, поэтому их можно признать статически значимыми.

Таким образом, получили модель в виде полинома первой степени:

$Y = 17,3 + 11,8 \cdot X_1 + 26,7 \cdot X_2 + 66,6 \cdot X_3$.

Согласно полученной модели параметр оптимизации возрастает с увеличением значений факторов X_1, X_2 и X_3. Причем наибольшее влияние оказывает параметр X_3, т.е. напряжение на электродах.

Проверку адекватности модели производили по F-критерию Фишера. Для вычисления дисперсии адекватности составили вспомогательную таблицу 4.

$S_{ад}^2 = (y_j – \hat{y}_j)^2 / (N – (k + 1))$. (6)

$S_{ад}^2 = 1,44 / (8 – (3+1)) = 0,36$.

$F_р = S_{ад}^2 / S_y^2 = 0,36 / 17,27 = 0,2$.

Табличное значение $F_т$-критерия при 5 % уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 4 и для знаменателя 2 равно 19,3. Fр<Fт. Следовательно, модель адекватна.

Полученное уравнение было использовано для крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни): X_1=35,5 мкФ, X_2=80 Гц, X_3=200 В (табл. 5). Шаг движения для фактора X_1 приняли равным 3 мкФ. Вычислили шаг движения для X_2 = 10,5, фактор X_3 = 10,2.

По окончании эксперимента на новых уровнях было получено максимальное значение параметра оптимизации Y, которое составило 30,76 г/час. Таким образом, оптимальными параметрами для процесса получения порошков меди методом электроэрозионного диспергирования в воде дистиллированной являются: емкость разрядных конденсаторов 45,5 мФ, напряжение на электродах 220 В, частота следования импульсов 100 Гц.

Таблица 4

Вспомогательная таблица для расчета $S_{ад}^2$

Номер опыта	y_j	$\hat{y}_j$	$y_j - \hat{y}_j$	$(y_j - \hat{y}_j)^2$
1	16,56	17,02	-0,46	0,2116
2	10,62	9,7	0,92	0,8464
3	4,86	5,26	-0,4	0,16
4	1,02	1,46	-0,44	0,1936
5	1,78	1,82	-0,04	0,0016
6	1,46	1,52	-0,06	0,0036
7	0,22	0,16	0,06	0,0036
8	0,12	0,24	-0,12	0,0144
$\sum(y_j - \hat{y}_j)^2$				1,44

Таблица 5

Расчет крутого восхождения

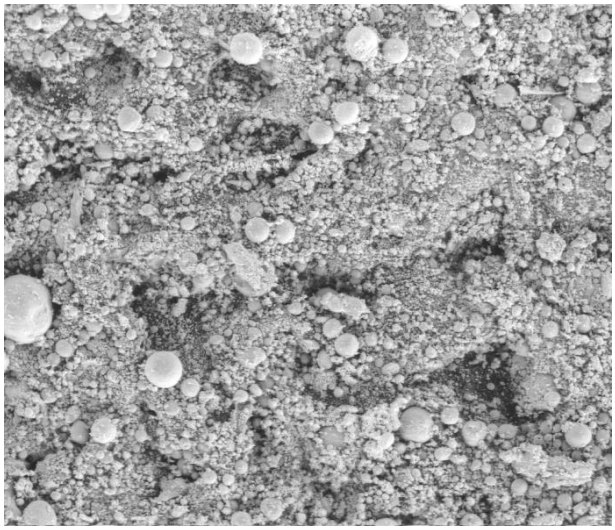
Наименование	X_1 (C, мкФ)	X_2 (f, Гц)	X_3 (U, В)	Y
Основной уровень	35,5	80	200	–
Коэффициент b_i	11,8	26,7	66,6	–
Интервал варьирования ξ_i	10	20	10,0	–
$b_i \cdot \xi_i$	118,3	534,0	666	–
Шаг Δ_i	3	10,5	10,2	–
Округленный шаг	3	10	10	–
Мысленный опыт	38,5	80	200	–
Мысленный опыт	41,5	90	210	–
Реализованный опыт 9	45,5	100	220	30,76
Мысленный опыт	47,5	110	230	–
Реализованный опыт 10	50,5	120	240	13,24
Реализованный опыт 11	55,5	130	250	16,56

Получение медных порошков производили методом электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) на установке для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов (патент РФ № 2449859), включающей регулятор напряжения, генератор импульсов и реактор [7, 8]. Процесс проводили при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 45,5 мкФ, напряжение 220 В, частота следования импульсов 100 Гц. В качестве реактора установки электроэрозионного диспергирования использовался стеклянный эксикатор, в качестве разделителя – пластмассовая решетка. Для исключения возможности соприкосновения электродов со стенками реактора диспергированный материал изолировали от стенок реактора пластмассовой перегородкой. В качестве исходного (диспергируемого) материала использовали отходы электротехнической медной проволоки марки М1.

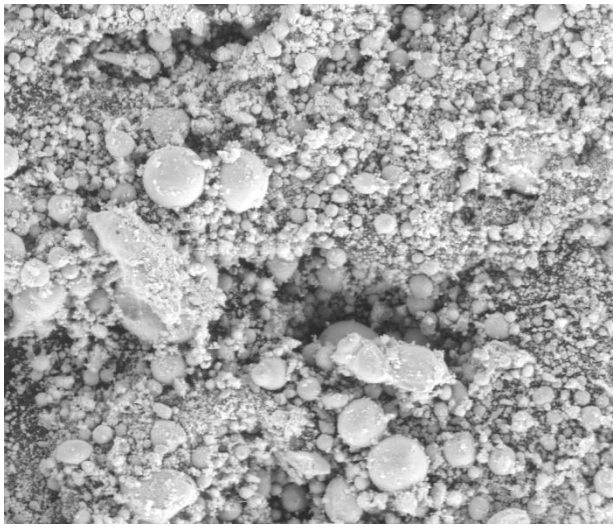
Для дальнейших физико-химических исследований был использован медный порошок, полученный методом электроэрозионного диспергирования в изолированном реакторе в воде дистиллированной при оптимальных электрических параметрах установки.

Методом растровой электронной микроскопии проведено исследование мик-

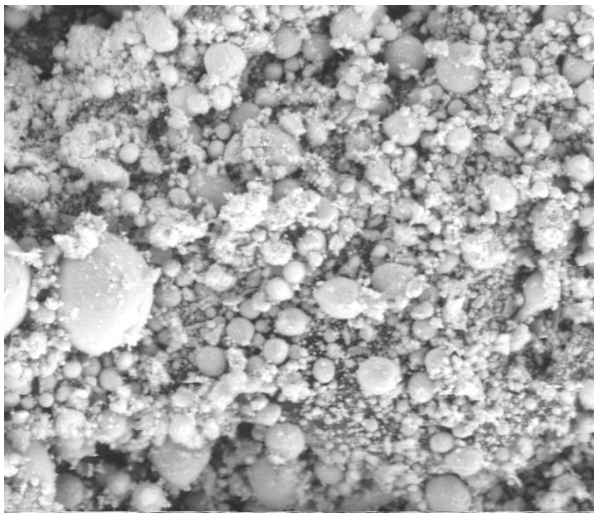
роструктуры порошка. Были выполнены снимки на растровом электронном микроскопе «QUANTA 200 3D». Результаты микроскопии электроэрозионного медного порошка, полученного при оптимальных электрических параметрах установки в изолированном реакторе, приведены на рисунке.



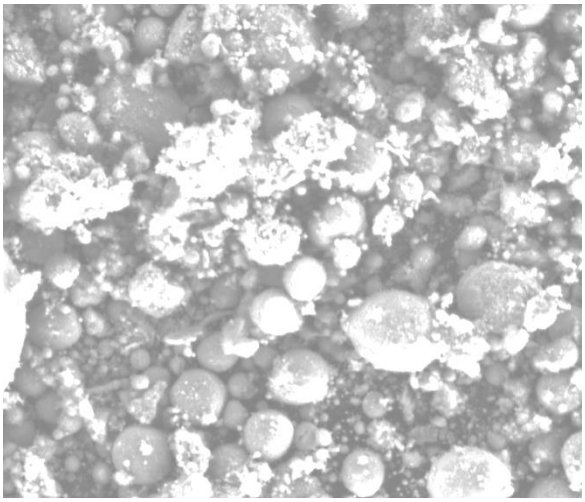
x200



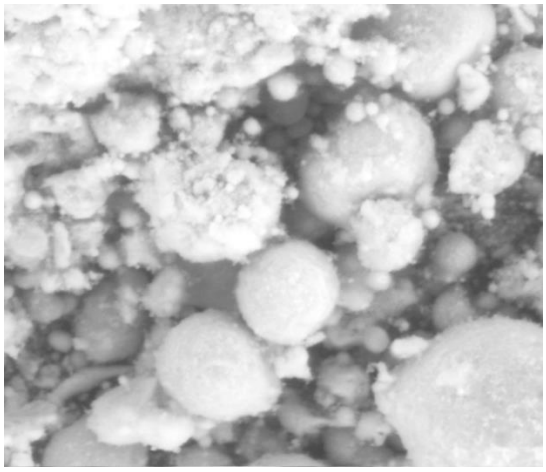
x500



x1000



x2000



x5000

Рис. Микроскопия образца медного порошка, полученного электроэрозионным диспергированием в изолированном реакторе

Таким образом, в порошке, полученном методом электроэрозионного диспергирования, преобладают частицы правильной сферической или эллиптической формы, полученные кристаллизацией расплавленного материала (жидкая фаза).

Экспериментально установлено, что оптимальными параметрами для процесса получения порошков меди методом электроэрозионного диспергирования в воде дистиллированной являются: емкость разрядных конденсаторов 45,5 мФ, напряжение на электродах 220 В, частота следования импульсов 100 Гц.

Список литературы

1. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Хорьякова Н.М. Состав и свойства медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием: монография / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2014. – 143 с.

2. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Морфология и элементный состав медных электроэро-зионных порошков, пригодных к спеканию // Вестник машиностроения. – 2014. – № 10. – С. 66-68.

3. Хорьякова Н.М., Малюхов В.С. Морфология и элементный состав медного порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования // Современный материалы, техника и технология: материалы 3-й Междунар. науч.-практич. конф.: в 3 т. – Курск, 2013. − Т. 1.– С. 388-390.

4. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M. Morphology and Composition of Copper Electrospark Powder Suitable for Sintering // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 1. – P. 33–35.

5. Ageev E.V., Avilova I.A., Horyakova N.M. Preparation of copper electroerosionnanopowders from waste of aquatic medium and its validation by physicochemical methods // Applied Mechanics and Materials. – 2015. − Vol. 770. – P. 23-27.

6. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. − 184 с.

7. Пат. 2449859 Российская Федерация, C2, B22F9/14. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов / Агеев Е.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. – № 2010104316/02; заяв. 08.02.2010; опубл. 10.05.2012. – 4 с.: ил.

8. Исследования гранулометрического и элементного состава электроэрозионного медно-углеродного порошка, полученного в керосине / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, И.В. Егельский, Д.А. Чумак-Жунь // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – № 4 (17). – С. 18-23.

Получено 17.10.16

E. V. Ageeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: ageeva-ev@yandex.ru)

N. Horakova, Postgraduate, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: natali030119891@yandex.ru)

G. R. Latypova, Senior Lecturer, Moscow State Polytechnic University (e-mail: latipov46@mail.ru)

FACTORIAL EXPERIMENT AS A WAY TO DETERMINE THE MOST OPTIMAL ELECTRICAL PARAMETERS OF ELECTROEROSIVE DISPERSION PLANT FOR THE DISPERSION OF COPPER SCRAP IN DISTILLED

Today there is no available information on the production of powders, including copper powders, by electroerosive dispersion method. Thus any research of the said process seems important. Traditional experiments devoted to electroerosive dispersion process that involve successive modification of specific independent variables (such as

the capacity of energy discharge capacitor, voltage, pulse repetition rate, etc.) with others being invariable (like medium, material, etc.) are rater complicated and demand much time, effort and resource. These are multi-factor experiments that are related with the optimization of material properties, identification of more optimal conditions of the electroerosive dispersion production process, development of the most efficient equipment design, etc. As a result the systems become too sophisticated to be studied within reasonable time period. Thus there is a need to find a way to boost research activities with ensuring final results that will approximate the most optimal solution. One of such ways is the statistical method of factorial experiment.

The purpose of the present paper is to find the most optimal electrical parameters of electroerosive dispersion plant by making a full-scale factorial experiment and investigating the form and morphology of copper electroerosive powders obtained under the most optimal parameters of the production process.

The most optimal electrical parameters of electroerosive dispersion plant have been determined by means of full-scale factorial experiment based on the efficiency of copper powder production process.

It has been experimentally proved that the most optimal parameters for the production of copper powder by electroerosive dispersion in distilled water are as follows: capacity of the energy discharge capacitor of 45.5 мF, electrode voltage of 220 V, and pulse repetition frequency of 100 Hz.

Key words: *electroerosive dispersion, plant, optimal parameters*

***

Reference

1. Ageev E.V., Ageeva E.V., Hor'jakova N.M. Sostav i svojstva mednyh poroshkov, poluchennyh jelektrojerozionnym dispergirovaniem: monografija / Jugo-Zap. gos. un-t. – Kursk, 2014. – 143 s.

2. Ageeva E.V., Hor'jakova N.M., Ageev E.V. Morfologija i jelementnyj sostav mednyh jelektrojerozionnyh poroshkov, prigodnyh k spekaniju // Vestnik mashinostroenija. – 2014. – № 10. – S. 66-68.

3. Hor'jakova N.M., Maljuhov V.S. Morfologija i jelementnyj sostav mednogo poroshka, poluchennogo metodom jelektrojerozionnogo dispergirovanija // Sovremennyj materialy, tehnika i tehnologija: materialy 3-j Mezhdunar. nauch.-praktich. konf.: v 3 t. – Kursk, 2013. − T. 1.– S. 388-390.

4. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M. Morphology and Composition of Copper Electrospark Powder Suitable for Sintering // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 1. – P. 33–35.

5. Ageev E.V., Avilova I.A., Horyakova N.M. Preparation of copper electroerosionnanopowders from waste of aquatic medium and its validation by physicochemical methods // Applied Mechanics and Materials. – 2015. − Vol. 770. – P. 23-27.

6. Spiridonov A.A. Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii tehnologicheskih processov. – M.: Mashinostroenie, 1981. − 184 s.

7. Pat. 2449859 Rossijskaja Federacija, C2, B22F9/14. Ustanovka dlja poluchenija nanodispersnyh poroshkov iz tokoprovodjashhih materialov / Ageev E.V.; zajavitel' i patentoobladatel' Jugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet. – № 2010104316/02; zajav. 08.02.2010; opubl. 10.05.2012. – 4 s.: il.

8. Issledovanija granulometricheskogo i jelementnogo sostava jelektrojerozionnogo medno-uglerodnogo poroshka, poluchennogo v kerosine / N.M. Hor'jakova, E.V. Ageeva, E.V. Ageev, I.V. Egel'skij, D.A. Chumak-Zhun' // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii. – 2015. – № 4 (17). – S. 18-23.