

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

С.В. Хардилов, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: hardikov1990@mail.ru)

А.А. Горохов, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: disclos@yandex.ru)

Л.П. Андреева, канд. техн. наук, доцент, Московский политехнический университет (Москва, Россия) (e-mail: andreeva@mail.ru)

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ОТХОДОВ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

Как показывает практика, большинство способов получения порошковых материалов обладают рядом недостатков: энергоёмкость, экологические проблемы (сточные воды, вредные выбросы), высокая стоимость технологического оборудования.

В настоящее время одним из наиболее перспективных методов получения порошковых материалов из токопроводящих отходов является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). Метод ЭЭД отличается относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса. Для разработки технологии получения порошковых материалов из отходов шарикоподшипниковой стали, и оценки эффективности их использования требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Проведение намеченных мероприятий позволит решить задачу получения порошковых материалов, в том числе нанопорошков, на основе железа, утилизации отходов шарикоподшипниковой стали и дальнейшего их использования и, тем самым, снизить себестоимость производства конечного продукта.

Целью работы являлась оптимизация гранулометрического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали.

Экспериментально установлены обратно пропорциональные зависимости среднего размера частиц порошкового материала от ёмкости разрядных конденсаторов и от напряжения на электродах в реакторе. Также установлена обратно пропорциональная зависимость среднего размера частиц порошкового материала от частоты следования импульсов установки ЭЭД в интервале до 90 Гц. Дальнейшее увеличение ёмкости разрядных конденсаторов приводит к увеличению среднего размера частиц порошкового материала.

Постановкой факторного эксперимента определены оптимальные параметры для процесса получения порошковых материалов методом электроэрозионного диспергирования в воде дистиллированной: ёмкость разрядных конденсаторов 58 мкФ, напряжение на электродах 140 В, частота следования импульсов 140 Гц.

Ключевые слова: шарикоподшипниковая сталь, отходы, электроэрозионное диспергирование, порошок, гранулометрический состав.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-6-68-75

Ссылка для цитирования: Оптимизация гранулометрического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали / Е.В. Агеева, С.В. Хардилов, А.А. Горохов, Л.П. Андреева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 68-75.

Введение

Шарикоподшипниковые стали нашли широкое применение в машиностроении. Из них изготавливают шарики, ролики и кольца подшипников качения. Эти детали в процессе работы испытывают высокие

удельные знакопеременные нагрузки. Поэтому шарикоподшипниковая сталь должна обладать высокой твердостью, прочностью и контактной выносливостью [1, 2]. В связи с широким её применением, образуется большое количество

отработанных и выбракованных подшипников. В настоящее время существует несколько способов отходов шарикоподшипниковой стали. Все эти способы отличаются крупнотоннажностью, большими энергетическими затратами, экологическими проблемами. Особую актуальность приобретает поиск и разработка малоэнергоёмких, ресурсосберегающих, экологически чистых и безотходных способов получения порошков. Как показывает практика, большинство способов получения порошковых материалов обладают рядом недостатков: энергоёмкость, экологические проблемы (сточные воды, вредные выбросы), высокая стоимость технологического оборудования.

В настоящее время одним из наиболее перспективных методов получения порошковых материалов из токопроводящих отходов является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). Метод ЭЭД отличается относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса. Для разработки технологии получения порошковых материалов из отходов шарикоподшипниковой стали, и оценки эффективности их использования требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Проведение намеченных мероприятий позволит решить задачу получения порошковых материалов, в том числе нанопорошков, на основе железа, утилизации отходов шарикоподшипниковой стали и дальнейшее их использование и, тем самым, снизить себестоимость производства конечного продукта [3-15].

Целью работы являлась оптимизация гранулометрического состава порошков, полученных электроэрозионным диспер-

гированием отходов шарикоподшипниковой стали.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Провести исследование влияния электрических параметров установки ЭЭД на гранулометрический состав порошковых материалов.

2. Поставить факторный эксперимент.

Для исследования влияния параметров диспергирования на гранулометрический состав порошковых материалов был проведён ряд экспериментов. На рисунках 1 – 3 представлены графики зависимости среднего размера частиц порошкового материала от электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов.

На рисунке 1 представлен график зависимости среднего размера частиц порошкового материала стали ШХ15 от ёмкости разрядных конденсаторов при постоянном напряжении на электродах $U=100$ и постоянной частоте следования импульсов $\nu=100$ Гц.

На рисунке 2 представлен график зависимости среднего размера частиц порошкового материала ШХ15 от напряжения на электродах реактора установки ЭЭД, при постоянной частоте следования импульсов $\nu=100$ Гц и постоянной ёмкости разрядных конденсаторов $C=58$ мкФ.

На рисунке 3 представлен график зависимости среднего размера частиц порошкового материала ШХ15 от рабочей частоты генератора импульсов при постоянном напряжении на электродах $U=100$ В и постоянной ёмкости разрядных конденсаторов $C=58$ мкФ.

В ходе проведенных исследований были установлены обратно пропорциональные зависимости среднего размера

частиц порошкового материала от ёмкости разрядных конденсаторов и от напряжения на электродах в реакторе. Также установлена обратно пропорциональная зависимость среднего размера частиц порошкового материала от частоты следования импульсов установки ЭЭД

в интервале до 90 Гц. Дальнейшее увеличение ёмкости разрядных конденсаторов приводит к увеличению среднего размера частиц порошкового материала.

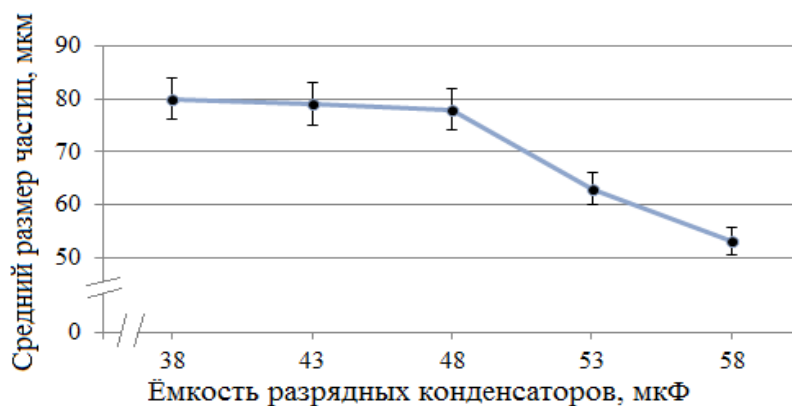


Рис. 1. Зависимость среднего размера частиц порошкового материала от ёмкости разрядных конденсаторов

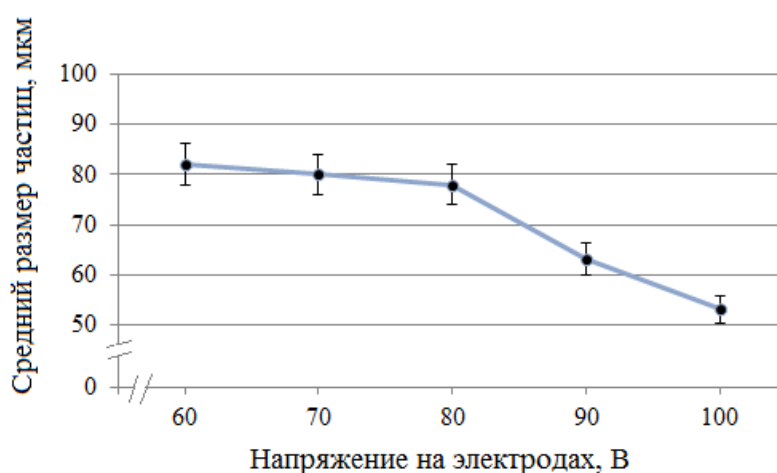


Рис. 2. Зависимость среднего размера частиц порошкового материала от напряжения на электродах реактора

Определение оптимальных электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования постановкой полного факторного эксперимента проводили по среднему размеру частиц порошкового материала.

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 для нахождения факторов на основных уровнях. Полученные значения параметра оптимизации y_u , его среднее значение \bar{y} , отклонения значений параметра оптимизации от его среднего значения $(y_u - \bar{y})$ и квадраты их отклонений приведены в таблице 3.

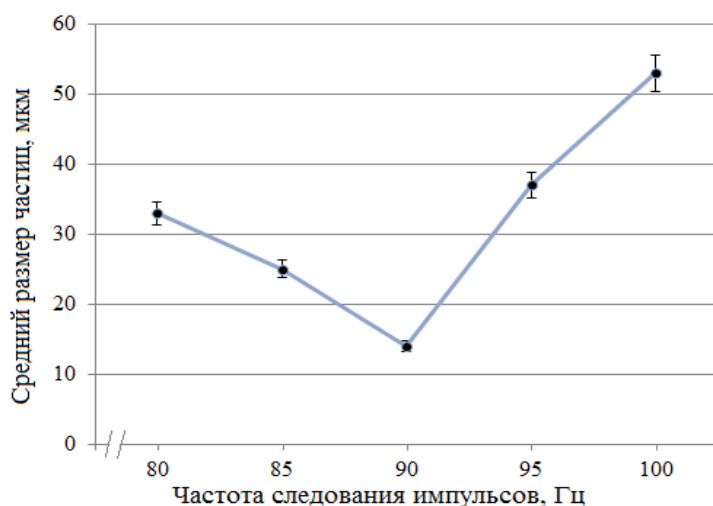


Рис. 3. Зависимость среднего размера частиц порошкового материала от рабочей частоты установки ЭЭД

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования

Наименование	Факторы		
	X_1 (C, мкФ)	X_2 (f, Гц)	X_3 (U, В)
Основной уровень	38	80	120
Интервал варьирования	10	20	20
Верхний уровень (+)	68	160	180
Нижний уровень (-)	28	40	60

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Порядок реализации опыта	X_0 (Среда)	X_1 (C, мкФ)	X_2 (f, Гц)	X_3 (U, В)	$X_1 X_2$	$X_2 X_3$	$X_1 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	Y (D, мкм)
1	7	+	+	+	+	+	-	-	+	78,89
2	2	+	-	+	+	+	+	-	-	33,87
3	8	+	+	-	+	-	-	+	-	5,88
4	3	+	-	-	+	+	+	+	+	53,44
5	1	+	+	+	-	+	+	+	-	14,76
6	4	+	-	+	-	-	-	+	+	79,97
7	5	+	+	-	-	-	+	-	+	80,84
8	6	+	-	-	-	+	-	-	-	79,92

Таблица 3

Вспомогательная таблица для расчета S_{y^2}

Номер опыта	y_u	\hat{y}	$(y_u - \hat{y})$	$(y_u - \hat{y})^2$
1	53,64	$\sum_{n=1}^3 \mathcal{E} y_u / 3 = 53,44$	0	0
2	53,44		+0,2	0,04
3	53,24		-0,2	0,04
$\Sigma(y_u - \hat{y})^2$				0,08

Дисперсия параметра оптимизации:

$$S_Y^2 = \frac{1}{3-1} \sum_{n=1}^3 (y_U - y^1)^2, \quad (1)$$

$$S_{y^2} = 0,04.$$

Находим коэффициенты модели:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j, \quad (2)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_i. \quad (3)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{ij} y_i, \quad (4)$$

$$b_0=6,68; b_1=20,04; b_2=40,08; b_3=80,16.$$

Средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии:

$$S\{b_i\} = (S_Y / N)^{1/2} \quad (5)$$

$$S\{b_i\} = (S_Y^2 / 8)^{1/2} = 0,07.$$

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

$$\Delta b = \pm t \cdot S\{b_i\}. \quad (6)$$

$$\Delta b = \pm 4,3 \cdot 0,07 = \pm 0,3.$$

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

Таким образом, получили модель в виде полинома первой степени:

$$Y = 6,68 + 20,04 \cdot X_1 + 40,08 \cdot X_2 +$$

$$+ 80,16 \cdot X_3 + 133,86 \cdot X_1$$

$$X_2 + 803,20 \cdot X_2 X_3 + 1606,40 \cdot X_1 X_3.$$

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.

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	78,89	78,41	0,48	0,2304
2	33,87	34,16	-0,29	0,0841
3	5,88	6,17	-0,19	0,0361
4	53,44	53,29	0,13	0,0169
5	14,76	14,92	-0,16	0,0256
6	79,97	79,25	0,72	0,5184
7	80,84	80,15	0,69	0,4761
8	79,92	79,59	0,33	0,1089
$\sum (y_j - \hat{y}_j)^2$				1,49

Таблица 5

Расчет крутого восхождения

Наименование	X_1 (С, мкФ)	X_2 (f, Гц)	X_3 (U, В)	Y
Основной уровень	48	100	80	—
Коэффициент b_i	13,4	13,8	73,3	—
Интервал варьирования ξ_i	10	20	20	—
$b_i \cdot \xi_i$	134	276	1466	—
Шаг Δ_i	5	10,3	9,8	—
Округленный шаг	5	10	10	—
Мысленный опыт	38	60	60	—
Мысленный опыт	43	80	80	—
Реализованный опыт 9	48	100	100	53,44
Мысленный опыт	53	120	120	—
Реализованный опыт 10	58	140	140	5,33
Реализованный опыт 11	63	160	160	14,76

$$S_{ад}^2 = (y_j - \hat{y}_j)^2 / (N - (k + 1)). \quad (7)$$

$$S_{ад}^2 = 1,49 / (8 - (3 + 1)) = 0,37.$$

$$F_p = S_{ад}^2 / S_y^2 = 0,38 / 0,04 = 9,3.$$

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

Полученное уравнение было использовано для крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни): $X_1=48$ мкФ, $X_2=100$ Гц, $X_3=80$ В (табл. 5). Шаг движения для фактора X_1 приняли равным 5 мкФ. Вычислили шаг движения для $X_2 = 10,3$, $X_3 = 9,8$.

По окончании эксперимента на новых уровнях было получено максимальное значение параметра оптимизации Y , которое составило 5,33 мкм.

Выводы

1. Экспериментально установлены обратно пропорциональные зависимости среднего размера частиц порошкового материала от ёмкости разрядных конденсаторов и от напряжения на электродах в реакторе. Также установлена обратно пропорциональная зависимость среднего размера частиц порошкового материала от частоты следования импульсов установки ЭЭД в интервале до 90 Гц. Дальнейшее увеличение ёмкости разрядных конденсаторов приводит к увеличению среднего размера частиц порошкового материала.

2. Постановкой факторного эксперимента определены оптимальные параметры для процесса получения порошковых материалов методом электроэрозионного диспергирования в воде дистиллированной: ёмкость разрядных конденсаторов 58 мкФ, напряжение на электродах 140 В, частота следования импульсов 140 Гц.

Список литературы

1. Жолдошов Б.М., Муратов В.С., Кенис М.С. Особенности термоциклической обработки стали ШХ15 // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 3. С. 29-32.
2. Жолдошов Б.М. Разработка режимов термоциклической обработки шарикоподшипниковой стали // Наука, новые технологии и инновации. 2011. № 2. С. 38-41.
3. Агеев Е.В., Агеева Е.В. Исследование химического состава порошков, полученных из отходов твердых сплавов методом электроэрозионного диспергирования // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы IV Международ. науч.-техн. конф.: в 2 ч. / отв. ред: Е.И. Яцун. Курск, 2006. С. 146-150.
4. Разработка установки для получения порошков из токопроводящих материалов / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Р.А. Латыпов, Р.В. Бобрышев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 5-2. С. 234-237.
5. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 5-2 (44). С. 99-102.
6. Использование твердосплавных электроэрозионных порошков для получения износостойких покрытий при восстановлении и упрочнении деталей машин и инструмента / Е.В. Агеев, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева, А.С. Бондарев, Е.П. Новиков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. № 1. С. 32-38.
7. Петридис А.В., Толкушев А.А., Агеев Е.В. Состав и свойства порошков, полученных из отходов твердых сплавов методом электроэрозионного дисперги-

рования (ЭЭД) // Технология металлов. 2005. № 6. С. 13-17.

8. Разработка и исследование твердосплавных изделий из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов / Р.А. Латыпов, Г.Р. Латыпова, Е.В. Агеев, А.А. Давыдов // Международный научный журнал. 2013. № 2. С. 107-112.

9. Исследование производительности процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Н.А. Пивовар // Известия Юго-Западного государственного университета. 2010. № 4 (33). С. 76-82.

10. Рентгеноспектральный микроанализ частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, В.Н. Гада-

лов, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 13-16.

11. Исследование технологических свойств твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Бондарев, Е.П. Новиков, В.Л. Селютин, И.А. Павлов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2-1. С. 19-022.

12. 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, vol. 56, no. 1, pp. 52-62.

Поступила в редакцию 15.11.17

UDC 621.762

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

S.V. Hardikov, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: hardikov1990@mail.ru)

A.A. Gorokhov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: disclos@yandex.ru)

L. P. Andreeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia) (e-mail: andree-va@mail.ru)

OPTIMIZATION OF GRANULOMETRIC COMPOSITION OF POWDERS MADE BY ELECTROEROSION DISPERSION OF BALL BEARING STEEL WASTE

As practice shows, most of the methods to obtain powder materials have several disadvantages: high power consumption, environmental problems (waste water, emissions), high cost of technological equipment.

Currently, one of the most promising methods for producing powder materials from the conductive waste is the method of electroerosion dispersion (EED). EED method has a relatively low energy consumption and environmental cleanliness of the process. The development of technology of making powder materials from ball bearing steel waste, and assessment of their use effectiveness requires comprehensive theoretical and experimental studies. The implementation of the planned measures will allow us to solve the problems of obtaining powder materials including iron based nanopowder, elimination of ball bearing steel waste and their further use and, thereby, reduce the production cost of the final product.

The aim of the present paper is to optimize the granulometric composition of powders made by electroerosion dispersion of waste-bearing steel waste.

Our study has experimentally determined inversely proportional relationship between average particle size of powder material and the capacity of energy discharge capacitors and the voltage on the electrodes in the reactor. It has also stated inversely proportional dependence of the average particle size of powder material on pulse repetition frequency of EED installation in the range up to 90 Hz. Further increase of energy discharge capacitors capacity leads to an increase in the average particle size of powder material.

By making factorial experiment there have been determined the optimal settings for the process of powder materials production by the method of electroerosion dispersing in distilled water: the capacity of energy discharge capacitors is 58 ufd, voltage on the electrodes is 140 W, pulse repetition frequency is 140 Hz.

Key words: ball bearing steel, waste, electroerosion dispersion, powder, granulometric composition.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-6-68-75

For citation: Ageeva E.V., S Hardikov.V., Gorokhov A.A., Andreeva L. P. Optimization of granulometric composition of powders produced by electroerosion dispersion of waste-bearing steel. Proceedings of the Southwest State University, 2017, vol. 21, no. 6(75), pp. 68-75 (in Russ.).

Reference

1. Zholdoshev B.M., Muratov V.S., Kenis M.S. Osobennosti termociklicheskoj obrabotki stali ShX15. Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii, 2012, no. 3, pp. 29-32.
2. Zholdoshev B.M. Razrabotka rezhimov termociklicheskoj obrabotki sharikopodshipnikovoj stali. Nauka, novye tekhnologii i innovacii, 2011, no. 2, p. 38-41.
3. Ageev E.V., Ageeva E.V. Issledovanie khimicheskogo sostava poroshkov, poluchennykh iz otkhodov tverdykh splavov metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Sovremennye instrumentalnye sistemy, informacionnye tekhnologii i innovacii". Kursk, 2006, pp. 146-150.
4. Ageev E.V., Semenixin B.A., Latypov R.A., Bobryshev R.V. Razrabotka ustanovki dlya polucheniya poroshkov iz tokoprovodyashchikh materialov. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, 2009, vol. 11, no. 5-2, pp. 234-237.
5. Ageev E.V., Latypova G.R., Davydov A.A., Ageeva E.V. Provedenie rentgenospektralnogo mikroanaliza tverdospлавных электроэрозионных порошков. Izvestiya Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2012, no. 5-2 (44), pp. 99-102.
6. Ageev E.V., Davydov A.A., Ageeva E.V., Bondarev A.S., Novikov E.P. Ispolzovanie tverdospлавных электроэрозионных порошков dlya polucheniya iznosostojkikh pokrytij pri vosstanovlenii i uprochnenii detalей машин i instrumenta. Izvestiya Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tehnika i tekhnologii, 2013, no. 1, pp. 32-38.
7. Petpidis A.V., Tolkushev A.A., Ageev E.V. Sostav i svoystva poposhkov, poluchennykh iz otkhodov tverdykh splavov metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya (EED). Tekhnologiya metallov, 2005, no. 6, pp. 13-17.
8. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., Davydov A.A. Razrabotka i issledovanie tverdospлавных izdelij iz poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem volframsoderzhashchikh otkhodov. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal, 2013, no. 2, pp. 107-112.
9. Ageev E.V., Semenixin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A., Pivovarov N.A. Issledovanie proizvoditelnosti processa polucheniya poroshkov metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya. Izvestiya Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2010, no. 4 (33), pp. 76-82.
10. Ageev E.V., Gadlov V.N., Semenixin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. Rentgenospektralnij mikroanaliz chastic poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem tverdogo splava. Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya, 2011, no. 2, pp. 13-16.
11. Ageev E.V., Ageeva E.V., Bondarev A.S., Novikov E.P., Selyutin V.L., Pavlov I.A. Issledovanie tekhnologicheskikh svoystv tverdospлавных электроэрозионных порошков. Izvestiya Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tehnika i tekhnologii, 2012, no. 2-1, pp. 019-022.
12. 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, vol. 56, no. 1, pp. 52-62.