

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 22. Выпуск 3.

УДК 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-3-298-310

Численная оптимизация процесса спекания диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ 95¹

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: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Аннотация

В работе определены оптимальные параметры процесса получения тяжелого вольфрамового сплава искровым плазменным спеканием частиц сплава ВНЖ 95 по микротвердости спеченных образцов путем проведения полного факторного эксперимента типа. В качестве факторов были выбраны параметры работы установки искрового плазменного спекания: температура, давление и время выдержки, мин. Оптимальные параметры работы установки определяли для электроэрозионного материала ВНЖ 95, ранее полученного в двух рабочих средах: воды дистиллированной и керосина осветительного. Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации Y (микротвердость), которые составили: для образцов, полученных из частиц, диспергированных в воде — 3498,6 МПа при температуре $T = 1050^\circ\text{C}$, давлении $P = 40$ МПа и времени выдержки $t = 10$ мин.; для образцов, полученных из частиц, диспергированных в керосине — 2449,2 МПа при температуре $T = 1200^\circ\text{C}$, давлении $P = 40$ МПа и времени выдержки $t = 5$ мин. Далее представлены результаты экспериментальных исследований состава, структуры и свойств тяжелых вольфрамовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ 95, полученные при оптимальных режимах.

Ключевые слова: электроэрозионный порошок, искровое плазменное спекание, оптимизация процесса.

Библиография: 26 названий.

Для цитирования:

Е. В. Агеева, Е. В. Агеев, О. В. Кузовлева, А. Е. Гвоздев, Численная оптимизация процесса спекания диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ 95 // Чебышевский сборник, 2021, т. 22, вып. 3, с. 298–310.

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

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 22. No. 3.

UDC 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-3-298-310

Numerical optimization of the sintering process of dispersed electroerosion particles of the alloy VNZh 95

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

e-mail: ageev_ev@mail.ru

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

e-mail: kusovleva@yandex.ru

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

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Abstract

In this paper, the optimal parameters of the process of obtaining a heavy tungsten alloy by spark plasma sintering of the particles of the alloy VNZh 95 on the microhardness of the sintered samples are determined by conducting a full factorial experiment of the type. The operating parameters of the spark plasma sintering unit were selected as factors: temperature, pressure, and holding time, min. The optimal parameters of the installation operation were determined for the electroerosive material VZH 95, previously obtained in two working media: distilled water and lighting kerosene. According to a series of experiments to determine the maximum value of the optimization parameter Y (microhardness), which amounted to: for samples obtained from particles dispersed in water — 3498,6 MPa at $T = 1050^\circ\text{C}$, a pressure of $P = 40$ MPa and holding time $t = 10$ min; for samples obtained from particles dispersed in kerosene — 2449,2 MPa at a temperature $T = 1200^\circ\text{C}$, $P = 40$ MPa and holding time $t = 5$ min. The results of experimental studies of the composition, structure, and properties of heavy tungsten alloys made of electroerosion-dispersed particles of the VNJ 95 alloy obtained under optimal conditions are presented below.

Keywords: electroerosive powder, spark plasma sintering, process optimization.

Bibliography: 26 titles.

For citation:

E. V. Ageeva, E. V. Ageev, O. V. Kuzovleva, A. E. Gvozdev, 2021, "Numerical optimization of the sintering process of dispersed electroerosion particles of the alloy VNZh 95", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 22, no. 3, pp. 298–310.

1. Введение

Тяжелые сплавы обладают рядом весьма ценных свойств, благодаря которым их эффективно используют во многих областях промышленности. В настоящее время одной из основных проблем использования этих сплавов является наличие в нем значительного количества дорогостоящего вольфрама. Данная проблема может быть решена измельчением их отходов и повторным использованием. Существующие промышленные технологии измельчения отличаются крупнотоннажностью, высокими затратами энергии и экологическими проблемами. Одним из перспективных и промышленно неприменяемых способов измельчения любого электропроводного материала является электроэрозионный способ [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения об использовании диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ в качестве шихты для повторного производства из них сплавов [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований.

Для прогнозирования высоких физико-механических свойств спеченных изделий из электроэрозионных порошков тяжелых вольфрамсодержащих сплавов требуется провести оптимизацию режимов спекания методом планирования эксперимента [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

2. Основной текст статьи

Заготовки сплавов получали по технологии горячего прессования путем пропускания высокоамперного тока (искровое плазменное спекание).

В соответствие с данной технологией заготовки получали из диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ 95 в воде дистиллированной и керосине осветительном методом горячего прессования с пропусканием высокоамперного тока в вакууме согласно расчетным режимам оптимизации. В основе процесса лежит модифицированный метод горячего прессования, при котором электрический ток пропускается непосредственно через пресс-форму и прессуемую заготовку, а не через внешний нагреватель.

Из свойств, лимитирующих ресурс изделий, технологически просто и информативно определяется микротвердость, поэтому оптимизацию процесса получения тяжелого вольфрамового сплава искровым плазменным спеканием частиц сплава ВНЖ 95 проводили по микротвердости спеченных образцов путем проведения полного факторного эксперимента типа 2^3 . Для оценки влияния указанных факторов и математического описания процесса получения тяжелого вольфрамового сплава искровым плазменным спеканием частиц сплава ВНЖ 95 использована модель первого порядка вида, представленная уравнением (1), в котором X_1, X_2, X_3 — факторы: температура T , °С; давление P , МПа и t , мин. время выдержки, мин. соответственно, $\hat{y}$ — исследуемая величина (микротвердость).

Оптимальные параметры работы установки определяли для двух рабочих сред: воды дистиллированной и керосина осветительного.

3. Результаты и их обсуждение

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

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + B_{123}X_1X_2X_3, \quad (1)$$

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.

Таблица 1: Уровни и интервалы варьирования

Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодировое	$T, ^\circ\text{C}$		$P, \text{МПа}$		$t, \text{мин}$	
		X_1		X_2		X_3	
		Вода	Керос.	Вода	Керос.	Вода	Керос.
Основной уровень	0	625	700	30	30	6	3,5
Интервал варьирования	Δx_i	400	500	10	10	4	1,5
Верхний уровень	+1	1050	1200	40	40	10	5
Нижний уровень	-1	200	200	20	20	2	2

Каждый опыт проводили трижды. Микротвердость образцов, полученных искровым плазменным спеканием частиц сплава ВНЖ 95 проводили на автоматизированном микротвердометре AFFRI DM-8 (по Виккерсу). Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2: Матрица планирования эксперимента

№ опы- та	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	$\bar{y}_i$	$S^2_{\text{воспр}}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	251	253	249	251	4
									173	174	178	175	7
2	+	+	-	-	-	-	+	+	321	324	321	322	3
									226	224	225	225	1
3	+	-	+	-	-	+	-	+	327	322	326	325	7
									226	229	229	228	3
4	+	+	+	-	+	-	-	-	340	335	336	337	7
									248	243	247	246	7
5	+	-	-	+	+	-	-	+	327	327	321	325	12
									235	230	237	234	13
6	+	+	-	+	-	+	-	-	397	399	398	398	1
									302	301	303	302	1
7	+	-	+	+	-	-	+	-	400	401	405	402	7
									295	298	298	297	3
8	+	+	+	+	+	+	+	+	431	432	427	430	7
									305	304	306	305	1

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

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} y_{ij} = \frac{251 + 253 + 249}{3} = 251$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} y_{ij} = \frac{173 + 174 + 178}{3} = 175.$$

Для всех остальных аналогично. Результаты заносим в таблицу 2. Определяем дисперсию параллельных опытов, например, для первого опыта (вода и керосин соответственно):

$$S^2_{\text{воспр}_i} = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = \frac{1}{2} [(251 - 251)^2 + (253 - 251)^2 + (249 - 251)^2] = 4$$

$$S_{\text{воспр}_i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = \frac{1}{2} [(173 - 175)^2 + (174 - 175)^2 + (178 - 175)^2] = 7.$$

Для всех остальных аналогично. Результаты заносим в таблицу 2. Вычисляем сумму дисперсии воспроизводимости для всех опытов (вода и керосин соответственно):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр}_i}^2 &= 4 + 3 + 7 + 7 + 12 + 1 + 7 + 7 = 48 \\ \sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр}_i}^2 &= 7 + 1 + 3 + 7 + 13 + 1 + 3 + 1 = 36. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} G_{\text{расч}} &= \frac{S_{\text{max}}^2}{n \sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр}_i}^2} = \frac{12}{48} = 0,25 \\ G_{\text{расч}} &= \frac{S_{\text{max}}^2}{n \sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр}_i}^2} = \frac{13}{36} = 0,36. \end{aligned}$$

Табличное значение критерия Кохрена $G_{\text{табл}}$ (при $N = 8, f = m - 1 = 3 - 1 = 2$), равно 0,5157. Так как выполняется условие $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ ($0,25 < 0,5157, 0,36 < 0,5157$), то принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

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

$$\begin{aligned} S_{\text{восп}}^2 &= S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{воспр}_i}^2 = \frac{48}{8} = 6 \\ S_{\text{восп}}^2 &= S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{воспр}_i}^2 = \frac{36}{8} = 4,5. \end{aligned}$$

Вычисляем ошибку всего эксперимента (вода и керосин соответственно):

$$\begin{aligned} S(y) &= \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{6} \approx 2,45 \\ S(y) &= \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{4,5} \approx 2,12 \end{aligned}$$

Рассчитываем коэффициенты уравнения (вода и керосин соответственно).

$$\begin{aligned} b_i &= \frac{1}{N} \sum_1^N X_{in} \bar{y}_i, \quad b_0 = \frac{1}{N} \sum_1^N \bar{y}_i, \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_1^N X_{in} X_{jn} \bar{y}_i \\ b_1 &= \frac{-251 + 322 - 325 + 337 - 325 + 398 - 402 + 430}{8} = 23 \\ b_1 &= \frac{-175 + 225 - 228 + 246 - 234 + 302 - 297 + 305}{8} = 18. \end{aligned}$$

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

$$b_0 = \frac{251 + 322 + 325 + 337 + 325 + 398 + 402 + 430}{8} = 348,75$$

$$b_0 = \frac{175 + 225 + 228 + 246 + 234 + 302 + 297 + 305}{8} = 251,5$$

$$b_{12} = \frac{251 - 322 - 325 + 337 + 325 - 398 - 402 + 430}{8} = -13$$

$$b_{12} = \frac{175 - 225 - 228 + 246 + 234 - 302 - 297 + 305}{8} = -11,5.$$

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

$$\hat{y} = 348,75 + 23X_1 + 24,76X_2 + 40X_3 - 13X_1X_2 + 2,15X_1X_3 + 2,5X_2X_3 + 1,73X_1X_2X_3 \quad (2)$$

$$\hat{y} = 251,5 + 18X_1 + 17,51X_2 + 32,97X_3 - 11,5X_1X_2 + 1,1X_1X_3 - 1X_2X_3 - 3,62X_1X_2X_3 \quad (3)$$

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):

$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nm}} = \frac{2,45}{\sqrt{8 \cdot 3}} = 0,5$$

$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nm}} = \frac{2,12}{\sqrt{8 \cdot 3}} = 0,43.$$

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

$$\Delta b_i = t_{\text{табл}} S(b_i) = 2,12 \cdot 0,5 = 1,06$$

$$\Delta b_i = t_{\text{табл}} S(b_i) = 2,12 \cdot 0,43 = 0,91.$$

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):

$$\hat{y} = 348,75 + 23X_1 + 24,76X_2 + 40X_3 - 13X_1X_2 + 2,15X_1X_3 + 2,5X_2X_3 + 1,73X_1X_2X_3 \quad (4)$$

$$\hat{y} = 251,5 + 18X_1 + 17,51X_2 + 32,97X_3 - 11,5X_1X_2 + 1,1X_1X_3 - 1X_2X_3 - 3,62X_1X_2X_3 \quad (5)$$

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 (4 и 5) значений функции оптимизации $\hat{y}$ от экспериментально установленных $\bar{y}$.

Для первого опыта уравнение регрессии (4 и 5) 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)).

$$\hat{y}_1 = 348,75 - 23 - 24,76 - 40 - 13 + 2,15 + 2,5 - 1,73 = 250,91$$

$$\hat{y}_1 = 251,5 - 18 - 17,51 - 32,97 - 11,5 + 1,1 - 1 + 3,62 = 175,24.$$

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

Таблица 3: Сводные данные

№ опыта	$\overline{y_i}$		$\overline{y_i}$	
	вода	керосин	вода	керосин
1	251	175	250,91	175,24
2	322	225	322,07	224,80
3	325	228	324,89	228,02
4	337	246	337,13	246,06
5	325	234	325,07	233,74
6	398	302	397,91	302,18
7	402	297	402,13	297,00
8	430	305	429,89	304,96

Для оценки отклонений используют критерий Фишера F -критерий. Находят значения F -критерия Фишера (дисперсное отношение):

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^1}{S_{\text{восп}}^2} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(y)},$$

где $S_{\text{ад}}^2 = \frac{m_i}{N-1} \sum_{i=1}^N (\overline{y_i} - \hat{y})^2$ — 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 (5.3.1 и 5.3.2) в i -м опыте; l — число значимых коэффициентов в уравнении регрессии; N — число независимых опытов.

Величина дисперсии адекватности (вода и керосин соответственно):

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m_i}{N-1} \sum_{i=1}^N (\overline{y_i} - \hat{y})^2 = \frac{3}{8-7} \sum_{i=1}^8 (251 - 250,91)^2 + (322 - 322,07)^2 + (325 - 324,89)^2 + \\ + (337 - 337,13)^2 + (325 - 325,07)^2 + (398 - 397,91)^2 + (402 - 402,13)^2 + (430 - 429,89)^2 = 0,252$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m_i}{N-1} \sum_{i=1}^N (\overline{y_i} - \hat{y})^2 = \frac{3}{8-7} \sum_{i=1}^8 (175 - 175,24)^2 + (225 - 224,8)^2 + (228 - 228,02)^2 + \\ + (246 - 246,06)^2 + (234 - 233,74)^2 + (302 - 302,18)^2 + (297 - 297)^2 + (305 - 304,96) = 0,6096.$$

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

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(y)} = \frac{0,252}{0,175} = 1,44$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(y)} = \frac{0,6096}{0,175} = 3,483.$$

Исходя из найденных значений $f_{\text{ад}}$, $f_{\text{восп}}$ находим по таблице $F_{\text{табл}} = 4,49$. Если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, то уравнение считают адекватным. В рассматриваемых примерах $1,44 < 4,49$, $3,483 < 4,49$, значит уравнения адекватны.

Полученные уравнения были использованы для крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение шихты, полученной в воде, начинали из нулевой точки (основные уровни): $X_1 = 625^\circ\text{C}$, $X_2 = 30$ МПа, $X_3 = 6$ мин (таблица 4).

Таблица 4: Расчет крутого восхождения (дистиллированная вода)

Наименование	X_1 (Т, °C)	X_2 (P, МПа)	X_3 (t, мин)	Y
Основной уровень	625 30	6	—	
Коэффициент b_i	23	24,76	40	—
Интервал варьирования ξ_i	400	10	4	—
$b_i \cdot \xi_i$	9200	247,6	160	—
Шаг Δi	92	2,47	1,6	—
Округленный шаг	90	2	2	—
Реализованный опыт 1	715	32	8	338,15
Реализованный опыт 2	805	34	10	340,91
Реализованный опыт 3	895	36	10	342,12
Реализованный опыт 4	970	38	10	346,85
Реализованный опыт 5(max)	1050	40	10	349,86

Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации Y (микротвердость), которые составили: для образцов, полученных из частиц, диспергированных в воде — 3498,6 МПа при температуре $T = 1050^\circ\text{C}$, давлении $P = 40$ МПа и времени выдержки $t = 10$ мин.

Полученные уравнения были использованы для крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение шихты, полученной в керосине, начинали из нулевой точки (основные уровни): $X_1 = 700^\circ\text{C}$, $X_2 = 30$ МПа, $X_3 = 3,5$ мин (таблица 5).

Таблица 5: Расчет крутого восхождения (керосин осветительный)

Наименование	X_1 (T, °C)	X_2 (P, МПа)	X_3 (t, мин)	Y
Основной уровень	700	30	3,5	—
Коэффициент b_i	18	17,51	32,97	—
Интервал варьирования ξ_i	500	10	1,5	—
$b_i \cdot \xi_i$	9000	175,1	49,46	—
Шаг Δi	90	1,751	0,4946	—
Округленный шаг	90	2	0,5	—
Реализованный опыт 1	790	32	4	235,66
Реализованный опыт 2	880	34	4,5	237,07
Реализованный опыт 3	970	36	5	238,79
Реализованный опыт 4	1060	38	5	421,72
Реализованный опыт 5	1150	40	5	243,56
Реализованный опыт 6(max)	1200	40	5	244,92

Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации Y (микротвердость), которые составили: для образцов, полученных из частиц, диспергированных в керосине — 2449,2 МПа при температуре $T = 1200^\circ\text{C}$, давлении $P = 40$ МПа и времени выдержки $t = 5$ мин. Далее представлены результаты экспериментальных исследований состава, структуры и свойств тяжелых вольфрамовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ 95, полученные при оптимальных режимах.

4. Заключение

1. Проведено определение оптимальных параметров процесса получения тяжелого вольфрамового сплава искровым плазменным спеканием частиц сплава ВНЖ 95 по микротвердости спеченных образцов путем проведения полного факторного эксперимента типа. В качестве факторов были выбраны параметры работы установки искрового плазменного спекания: температура, давление и время выдержки, мин. Оптимальные параметры работы установки определяли для электроэрозионного материала ВНЖ 95, ранее полученного в двух рабочих средах: воды дистиллированной и керосина осветительного.
2. Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации Y (микротвердость), которые составили: для образцов, полученных из частиц, диспергированных в воде — 3498,6 МПа при температуре $T = 1050^\circ\text{C}$, давлении $P = 40$ МПа и времени выдержки $t = 10$ мин.; для образцов, полученных из частиц, диспергированных в керосине — 2449,2 МПа при температуре $T = 1200^\circ\text{C}$, давлении $P = 40$ МПа и времени выдержки $t = 5$ мин. Далее представлены результаты экспериментальных исследований состава, структуры и свойств тяжелых вольфрамовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ 95, полученные при оптимальных режимах.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левинсон Е. М. Электроэрозионная обработка металлов. – Л.: Лениздат, 1961. – 184 с.
2. 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 с.
3. Седой В. С., Валевиц В. В. Получение высокодисперсных металлических порошков методом электрического взрыва в азоте пониженного давления // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. – Вып. 14. – С. 81–84.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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). – С. 14–16.
8. 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.

9. Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Агеев Е. В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию // Вестник машиностроения. – 2014. – №10. – С. 66–68.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Хорьякова Н. М. Изготовление заготовок из медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов электротехнической меди и изучение их свойств // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – №10(40). – С. 10–13.
20. 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.
21. 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.

22. 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.
23. 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.
24. 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
25. 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. – С. 4–8.
26. Хольм Р. Электрические контакты. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 464 с.

REFERENCES

1. Levinson E.M. 1961, *Electroerosion treatment of metals*. Leningrad, Lenizdat. 184 p.
2. Burtsev V.A., Kalinin N.V., Luchinsky A.V. 1990, *Electric explosion of conductors and its application in electrophysical installations*. Moscow, Energoatomizdat. 288 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Ageev E.V., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Holm R. 1961, *Electrical contacts*. Moscow, Foreign literature Publishing house. 464 p.

Получено 12.03.21 г.

Принято в печать 20.09.2021 г.