

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-27-43>

Оптимизация процесса получения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава ТН20 в воде

Е. В. Агеева ¹✉, Н. М. Хорьякова ¹, Б.Н. Сабельников ¹, А. Е. Агеева ¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Целью настоящей работы являлось проведение оптимизации процесса получения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава ТН20 в воде.

Методы. Для выполнения намеченных исследований были выбраны отходы спеченного безвольфрамового твердого сплава марки ТН20. В качестве рабочей жидкости применялась вода дистиллированная. На экспериментальной запатентованной установке для получения порошков из токопроводящих материалов диспергировали отходы безвольфрамового твердого сплава ТН20 в воде дистиллированной при массе загрузки 500 г. При этом использовали следующие электрические параметры установки: ёмкость конденсаторов 60,0...62,5 мкФ; напряжение на электродах от 120...140 В; частота следования импульсов 120...140 Гц. Исследование формы и морфологии поверхности частиц, полученных ЭД отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20, проводили на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды). Средний размер частиц титанового порошка исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec» (Германия). Оптимизацию процессов диспергирования отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20 проводили постановкой полного факторного эксперимента по среднему размеру частиц получаемых электроэрозионных частиц согласно блок-схемам.

Результаты. Анализ параметров формы частиц твердосплавного порошка по изображениям с растрового микроскопа говорит о том, что электроэрозионные частицы имеют в основном сферическую форму и агломераты. Экспериментально установлено, что средний размер частиц твердосплавного порошка 24,4 мкм получается при ёмкости разрядных конденсаторов 63 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

Заключение. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов сплава ТН20 и повторное их использование в производстве режущего инструмента.

Ключевые слова: металлоотходы сплава ТН20; электроэрозионное диспергирование; порошок; средний размер частиц; оптимизация.

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

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00316, <https://rscf.ru/project/24-29-00316/>.

© Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Сабельников Б.Н., Агеева А. Е., 2024

Для цитирования: Оптимизация процесса получения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава TN20 в воде / Е. В. Агеева, Н. М. Хорьякова, Б.Н. Сабельников, А. Е. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 27-43. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-27-43>.

Поступила в редакцию 18.01.2024

Подписана в печать 10.02.2024

Опубликована 27.03.2024

Optimization of the Process of Obtaining Powder Materials for the Production of Carbide Cutting Tools by Electrodispersion of TN20 Alloy Metal Waste in Water

Ekaterina V. Ageeva ¹✉, Natalya M. Horyakova ¹, Boris N. Sabelnikov ¹,
Anna E. Ageeva ¹

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of this work was to optimize the process of obtaining powder materials for the production of carbide cutting tools by electrodispersing metal waste of TN20 alloy in water.

Methods. To carry out the planned studies, waste of sintered tungsten-free hard alloy of the TN20 brand was selected. Distilled water was used as the working fluid. On an experimental patented installation for the production of powders from conductive materials, waste of a tungsten-free hard alloy TN20 was dispersed in distilled water with a loading weight of 500 g. The following electrical parameters of the installation were used: capacitance of capacitors 60.0...62.5 UF; voltage at the electrodes from 120...140 V; pulse repetition frequency 120...140 Hz. The study of the shape and morphology of the surface of particles obtained by EED of waste of a tungsten-free hard alloy TN20 was carried out on an electron-ion scanning (scanning) microscope with field emission of electrons "QUANTA 600 FEG" (the Netherlands). The average particle size of titanium powder was studied using the Analysette 22 NanoTec laser particle size analyzer (Germany). Optimization of the processes of dispersion of waste of tungsten-free hard alloy TN20 was carried out by setting up a complete factorial experiment on the average particle size of the resulting erosive particles according to block diagrams.

Results. Analysis of the particle shape parameters of the carbide powder from images from a scanning microscope suggests that the electroerosive particles are mainly spherical in shape and agglomerates. It has been experimentally established that the average particle size of a carbide powder of 24.4 microns is obtained with a discharge capacitor capacity of 63 UF, an electrode voltage of 200 V, and a pulse repetition frequency of 200 Hz.

Conclusion. Carrying out the planned measures will solve the problem of recycling waste from TN20 alloy and their reuse in the production of cutting tools.

Keywords: TN20 alloy metal waste; electroerosive dispersion; powder; average particle size; 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 research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-29-00316, <https://rscf.ru/project/24-29-00316/>.

For citation: Ageeva E. V., Horyakova N. M., Sabelnikov B. N., Ageeva A. E. Optimization of the Process of Obtaining Powder Materials for the Production of Carbide Cutting Tools by Electrodipersion of Tn20 Alloy Metal Waste in Water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 27-43 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-27-43>.

Received 18.01.2024

Accepted 10.02.2024

Published 27.03.2024

Введение

В настоящее время безвольфрамовые твердые сплавы (БВТС) группы ТН на основе карбида титана, сцементированного никель-молибденовым сплавом, нашли широкое применение для обработки металлов резанием [1]. TiC по твердости превосходит WC, но материалы на их основе уступают вольфрамсодержащим твердым сплавам по прочности [2]. Промышленное производство БВТС предусматривает спекание в вакууме при температуре 1300...1350° и выдержке 0,5...1 ч. Остаточная пористость при этом составляет порядка 0,2% [3].

В настоящее время основными проблемами при создании инструментальных БВТС является применение для его производства дорогостоящих компонентов [4]. Рециклинг металлоотходов инструментального производства является приоритетным направлением развития современного металлургического производства [5]. Однако это развитие сдерживается проблемой чрезвычайно высокой стоимости таких материалов, связанной с дефицитностью компонентов, технологической сложностью и дороговизной их получения [6]. Одним из путей решения названной проблемы яв-

ляется переработка в мелкодисперсное сырье легковесных металлоотходов [7], содержащих дорогостоящие компоненты такие, как Ti, Mo, и др., силами собственных производственных мощностей предприятий при минимальных затратах энергии и экологическом уровне окружающей среды [8].

Существующие в настоящее время способы переработки отходов безвольфрамовых твердых сплавов являются крупнотоннажными, энергоемкими, экологически вредными и дорогостоящими [9]. Одним из эффективных промышленно неприменяемых и недостаточно изученных металлургических способов переработки любых токопроводящих легковесных металлоотходов, в том числе и отходов твердых сплавов, лишенный вышеперечисленных недостатков, является электроэрозионное диспергирование (ЭЭД) [10]. К настоящему времени в реальном производстве данный способ практически не применяется, ввиду отсутствия полноценных комплексных сведений о составе, структуре и свойствах диспергированных электроэрозией частиц сплава ТН20 [11].

Целью настоящей работы являлось проведение оптимизации процесса полу-

чения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава ТН20 в воде.

Материалы и методы

Для выполнения намеченных исследований были выбраны отходы спеченного безвольфрамового твердого сплава марки ТН20 [12]. Химический состав сплава в соответствии с ГОСТ 26530–85 следующий: Ni до 15%; Mo до 6 %; Nb до 0,1%; TiC остальное. В качестве рабочей жидкости (РЖ) применялась вода дистиллированная ГОСТ Р 58144-2018.

На экспериментальной запатентованной установке [13] для получения порошков из токопроводящих материалов диспергировали отходы безвольфрамового твердого сплава ТН20 в воде дистиллированной при массе загрузки 500 г. При этом использовали следующие электрические параметры установки: ёмкость конденсаторов 60,0...62,5 мкФ; напряжение на электродах от 120...140 В; частота следования импульсов 120...140 Гц. Блок-схема процесса электродиспергирования металлоотходов сплава ТН20 представлена на рис. 1.

Исследование формы и морфологии поверхности частиц, полученных ЭЭД отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20, проводили на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды) [14].

Методика исследования формы частиц представлена в виде блок-схемы на рис. 2.

Средний размер частиц титанового порошка исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес» (Германия) [15]. Блок-схема методики исследования гранулометрического состава представлена на рис. 3.

Результаты и их обсуждение

Анализ параметров формы [16] частиц твердосплавного порошка по изображениям с растрового микроскопа говорит о том, что электроэрозионные частицы имеют в основном сферическую форму и агломераты (рис. 4).

Оптимизацию процессов диспергирования отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20 проводили постановкой полного факторного эксперимента (ПФЭ) [17] по среднему размеру получаемых электроэрозионных частиц согласно блок-схемам (рис. 5 и 6).

Задача оптимизации сводится к опытному определению такого сочетания уровней факторов, при котором достигается максимальное (минимальное) значение выходного параметра. Для этого используют метод крутого восхождения Бокса и Уилсона [18]. Блок-схема методики расчета крутого восхождения представлена на рис. 7.

В качестве факторов были выбраны параметры работы установки ЭЭД: напряжение на электродах, емкость разрядных конденсаторов и частота следования импульсов [19].

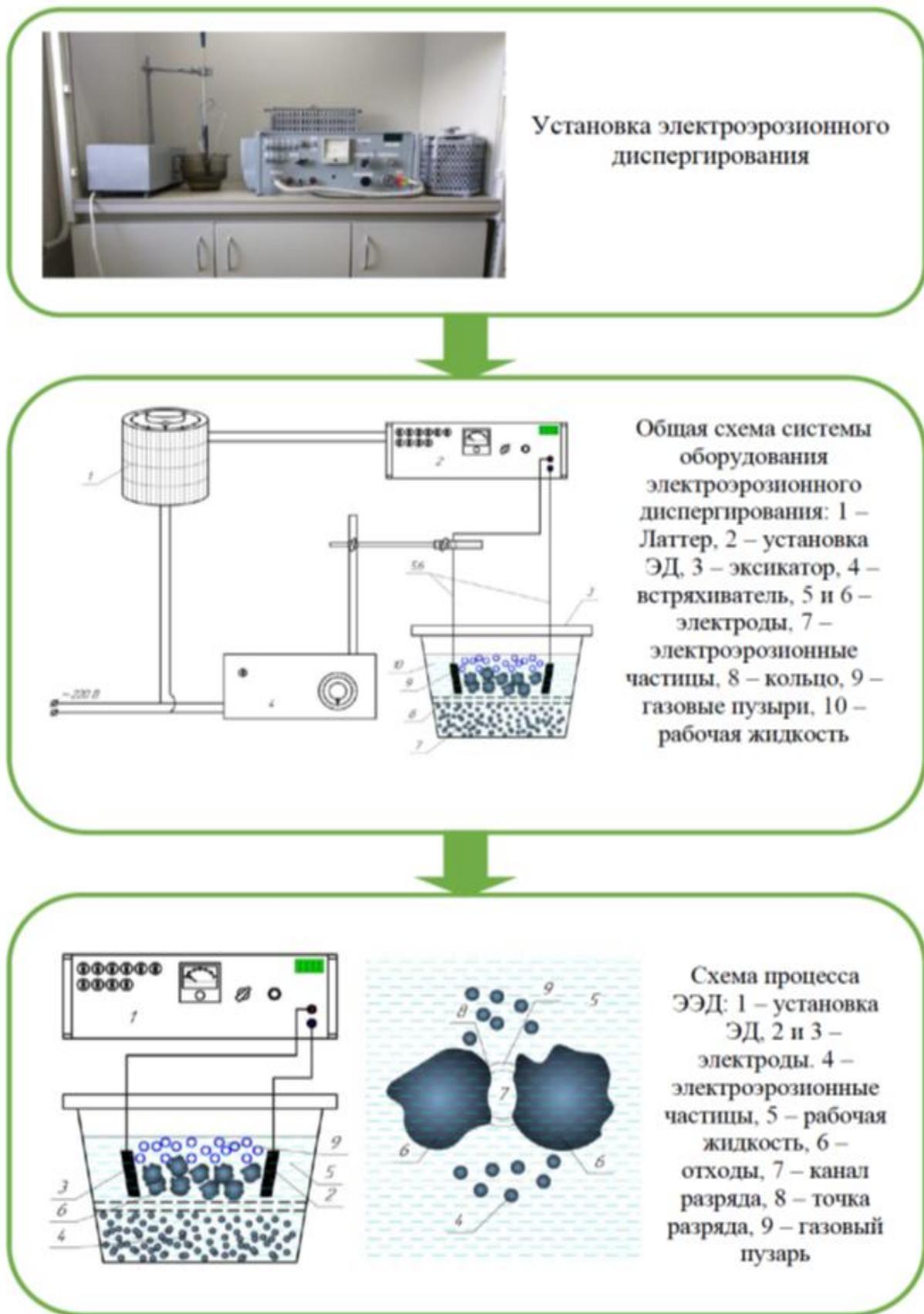


Рис. 1. Блок-схема процесса электродиспергирования металлоотходов сплава TN20

Fig. 1. Block diagram of the electrodispersion process of TN20 alloy metal waste

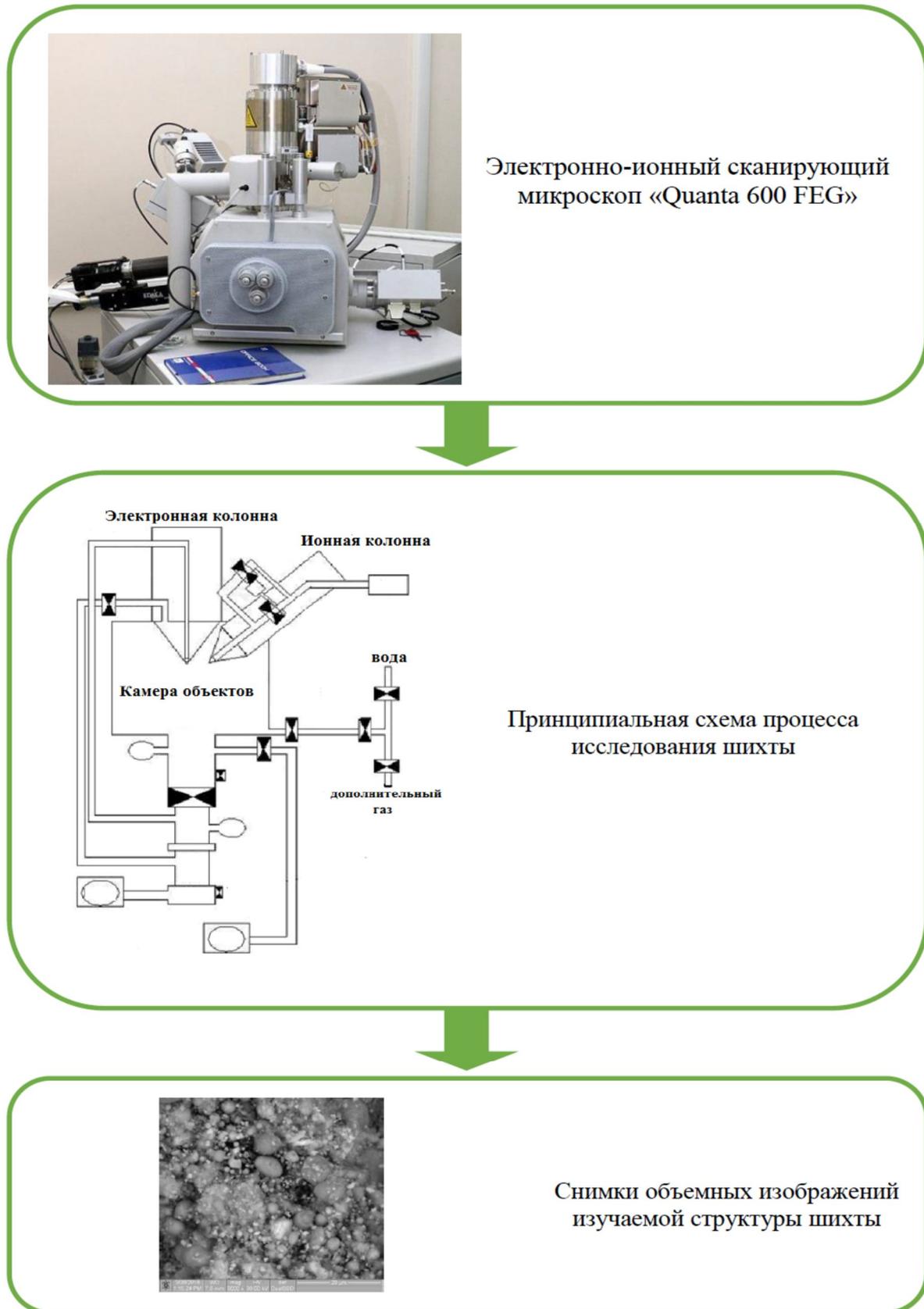


Рис. 2. Блок-схема методики исследования формы частиц

Fig. 2. Block diagram of the particle shape research methodology

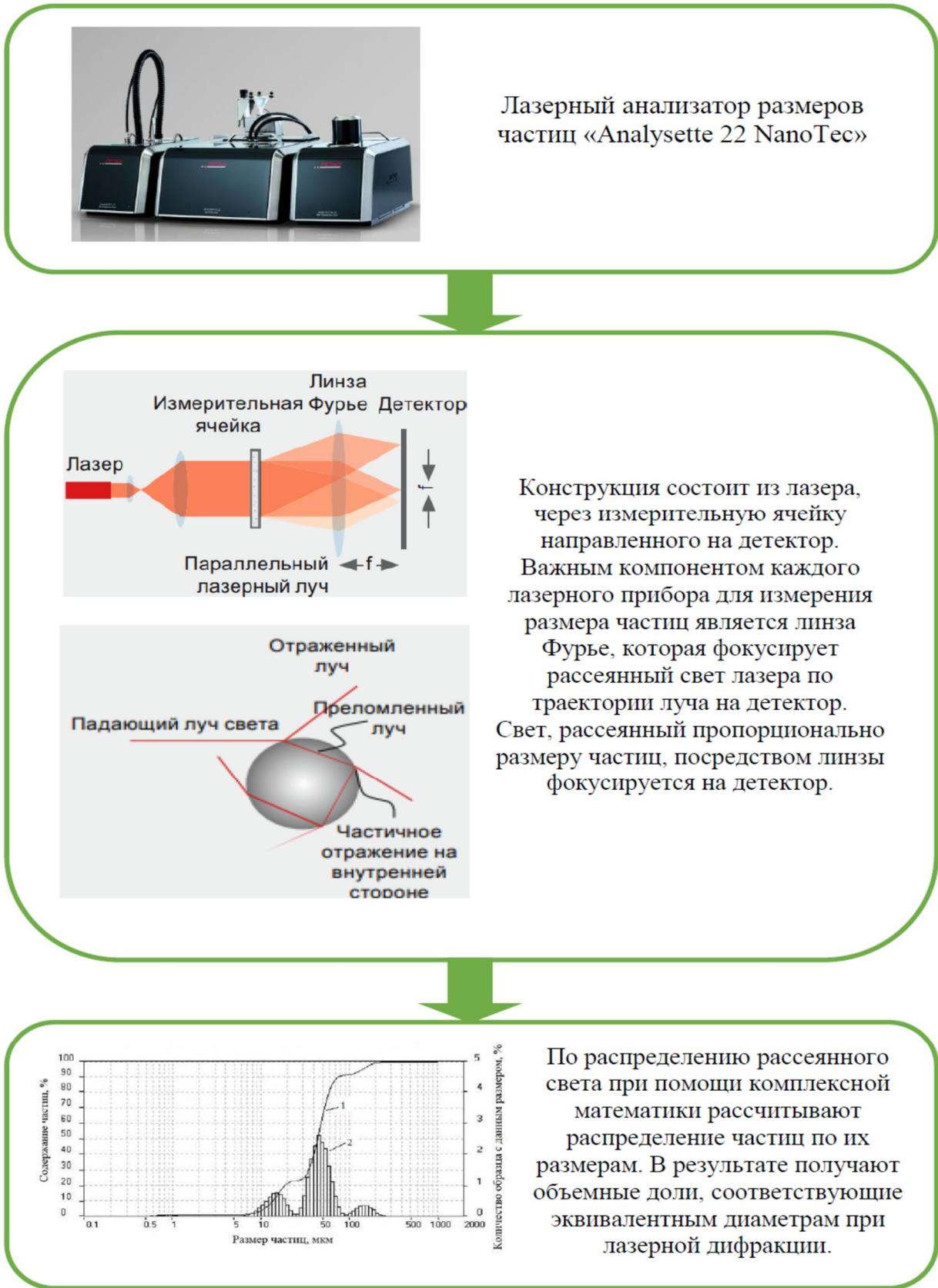


Рис. 3. Блок-схема методики определения среднего размера частиц

Fig. 3. Block diagram of the method for determining the average particle size

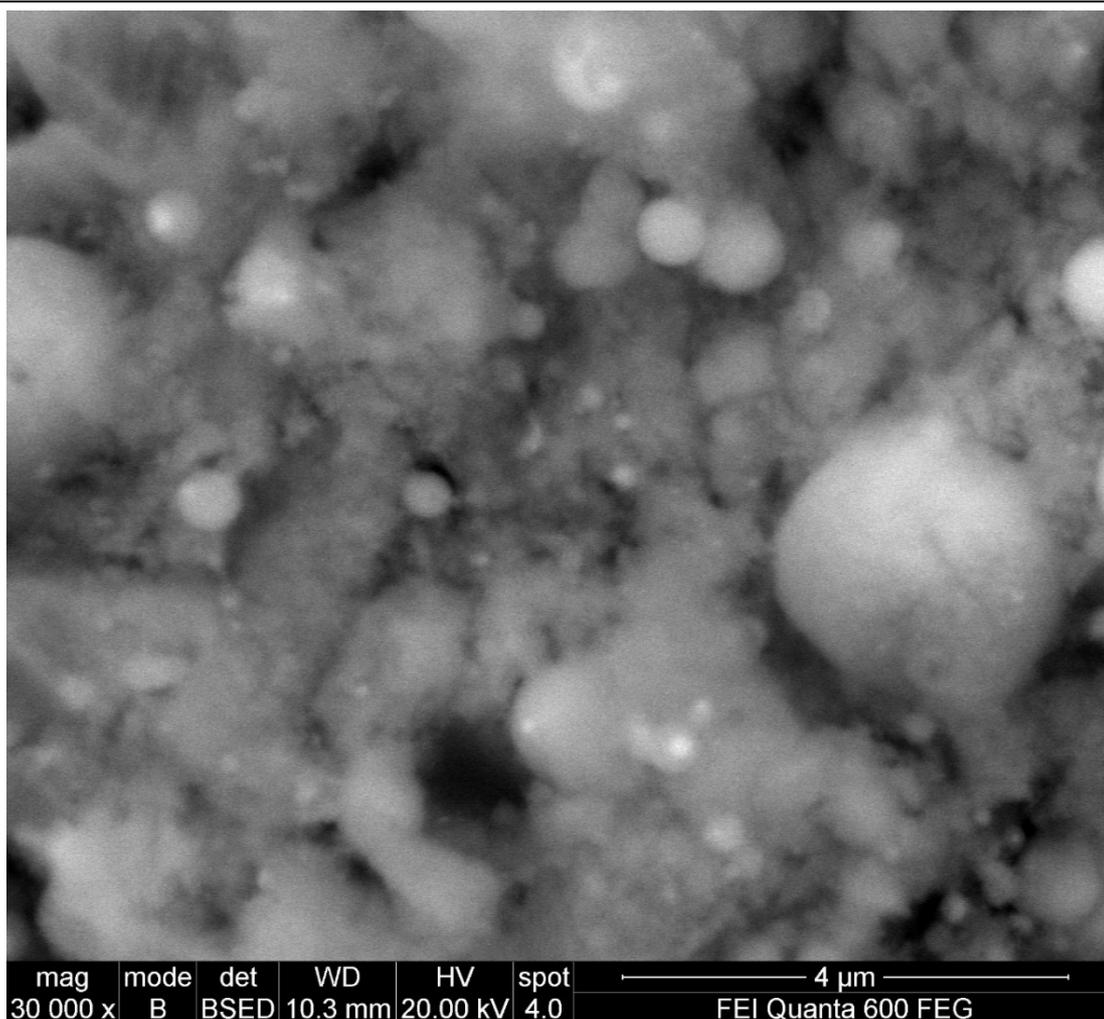


Рис. 4. Микрофотография частиц порошка

Fig. 4. Micrography of powder particles

Согласно блок-схемам методики, представленным на рис. 1-3, были выбраны уровни и интервалы варьирования

и составлена матрица планирования для экспериментов (табл. 2).

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования

Table 1. Levels and intervals of variation

Уровень варьируемых факторов / The level of variable factors	Обозначение кодовое / The designation is code	U, В	v, Гц	C, мкФ
		X ₁	X ₂	X ₃
Основной уровень	0	150	72,5	54,3
Интервал варьирования	Δx_i	50	27,5	8,7
Верхний уровень	+1	200	100	63
Нижний уровень	-1	100	45	45,5

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

Table 2. Experiment planning matrix

№ п/п	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	\bar{Y}_i	S ² _{воспр}
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,46	0,45	0,44	0,45	0,0001
2	+	+	-	-	-	-	+	+	13,4	13,1	13,1	13,2	0,03
3	+	-	+	-	-	+	-	+	3,0	3,4	3,0	3,2	0,06
4	+	+	+	-	+	-	-	-	18,6	18,7	18,5	18,6	0,01
5	+	-	-	+	+	-	-	+	7,0	7,1	7,1	7,1	0,005
6	+	+	-	+	-	+	-	-	21,3	21,0	21,0	21,1	0,03
7	+	-	+	+	-	-	+	-	11,5	11,6	11,4	11,4	0,025
8	+	+	+	+	+	+	+	+	24,4	24,6	24,0	24,3	0,095

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 X₁, X₂, X₃ – 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 (y₁, y₂, y₃).
 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 ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}_i	S ² _{воспр_i}
1	+	-	-	-	+	+	+	-					
2	+	+	-	-	-	-	+	+					
3	+	-	+	-	-	+	-	+					
4	+	+	+	-	+	-	-	-					
5	+	-	-	+	+	-	-	+					
6	+	+	-	+	-	+	-	-					
7	+	-	+	+	-	-	+	-					
8	+	+	+	+	+	+	+	+					

Рис. 5. Блок-схема постановки полного факторного эксперимента (1 этап)

Fig. 5. 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

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

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. 6. Блок-схема постановки полного факторного эксперимента (2 этап)

Fig. 6. Flowchart for setting up a complete factorial experiment (stage 2)



Рис. 7. Блок-схема расчета крутого восхождения

Fig. 7. Block diagram of calculation of steep ascent

Уравнение регрессии, моделирующее полный факторный эксперимент:

$$\hat{y} = 12,4 + 6,9X_1 + 1,9X_2 + 3,6X_3 + 0,19X_1X_2 - 0,15X_1X_3 - 0,08X_2X_3 - 0,47X_1X_2X_3. \quad (1)$$

В результате проверки статистической значимости коэффициентов все коэффициенты уравнения (1) оказались статистически значимыми. Проверку уравнений на адекватность проводили с использованием критерия Фишера [20].

В результате расчета установлено, что уравнения регрессии адекватны.

Полученные уравнения были использованы для расчета крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни).

Согласно проведенной серии опытов, результаты которых представлены

в табл. 3, определены предельные значения параметра оптимизации \hat{y} (средний размер электроэрозионных частиц) для процесса ЭЭД, которые составили: 24,4 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 63 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

Таблица 3. Расчет крутого восхождения

Table 3. Calculation of the steep ascent

Наименование / Name	X_1 (U, В)	X_2 (f, Гц)	X_3 (C, мкФ)	\hat{y} , мкм
Основной уровень	150	72,5	54,3	
Коэффициент b_i	6,9	1,9	3,6	
Интервал варьирования ξ_i	50	27,5	8,7	
$b_i \cdot \xi_i$	345	52,25	31,32	
Шаг Δ_i	17,25	2,6	1,5	
Округленный шаг	17	3	2	
Опыт 1	167	75,5	56,3	15,7
Опыт 2	184	78,5	58,3	19,1
Опыт 3	200	81,5	60,3	22,2
Опыт 4	200	84,5	62,3	23,2
Опыт 5	200	87,5	63	23,6
Опыт 6	200	90,5	63	23,7
Опыт 7	200	93,5	63	23,8
Опыт 8	200	96,5	63	24,1
Опыт 9	200	99,5	63	24,2
Опыт 10 (max)	200	100	63	24,4

Выводы

1. На основании экспериментальных исследований, направленных на численную оптимизацию процесса получения титановых порошков для аддитивных машин в условиях электроэрозионной металлургии отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20, установлено, что средний размер частиц по-

рошка 24,4 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 63 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

2. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов сплава ТН20 и повторное их использование в производстве режущего инструмента.

Список литературы

1. Патрушев А. Ю., Фарафонов Д. П., Серов М. М. Безвольфрамовые твердые сплавы: методы получения, структура и свойства (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 11(105). С. 66-81.
2. Изменение структурно-фазового состояния и физико-химических свойств безвольфрамовых твердых сплавов TiC-TiNi после различных видов ионно-лучевой обработки / В. В. Акимов, А. М. Бадамшин, С. Н. Несов [и др.] // Омский научный вестник. 2021. № 2(176). С. 5-9.
3. Панов В.С. Безвольфрамовые твердые сплавы: аналитический обзор // Материаловедение. 2019. № 10. С. 33-39.
4. Панов В.С., Ниткин Н.М. Безвольфрамовые твердые сплавы // Нанотехнологии: наука и производство. 2017. № 3. С. 65-70.
5. Агеева Е.В., Сабельников Б.Н. Материальный баланс процесса электроэрозионного диспергирования отходов безвольфрамовых твердых сплавов марки КНТ16 в воде дистиллированной // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10. № 3. С. 8-19.
6. Агеева Е.В., Сабельников Б.Н. Рентгеноспектральный микроанализ электроэрозионного порошкового материала, полученного в среде этилового спирта из отходов безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 7 (242). С. 33-36.
7. Локтионова О.Г., Агеева Е.В., Сабельников Б.Н. Результаты рентгеновских исследований спеченных образцов, полученных из электроэрозионного порошкового материала сплава КНТ16 // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10. № 4. С. 22-34.
8. Влияние ионного облучения на морфологию, элементный и химический состав поверхностных слоев безвольфрамовых твердых сплавов / А.М. Бадамшин, С.Н. Несов, В.С. Ковивчак, С.Н. Поворознюк, В.В. Акимов // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 15. С. 19-22.
9. Агеева Е.В., Сабельников Б.Н. Структура и свойства безвольфрамового твердого сплава на основе карбонитрида титана, спеченного из электроэрозионных порошков, полученных в углеродсодержащей среде // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. № 4. С. 158-162.
10. Агеева Е.В., Локтионова О.Г., Сабельников Б.Н. Оценка энергозатрат при получении шихты для производства безвольфрамового твердого сплава электродиспергированием // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021;11(1):21-35.

11. Ageev E.V., Ageeva A.E. Composition, structure and properties of hard-alloy powders obtained by electrodispersion of T5K10 alloy in water // *Metallurgist*. 2022. Vol. 66, nos. 1-2. Pp. 146-154.
12. Агеев Е.В., Агеева А. Е. Структура и свойства порошков, полученных в условиях электроэрозионной металлургии отходов твердого сплава Т5К10 в кислород- и углеродсодержащих средах // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2022. №9 (213). С. 387-392.
13. Агеев Е.В., Пыхтин А.И., Новиков Е.П., Агеева А.Е. Параметрические показатели формы частиц электрокорунда, полученного электродиспергированием отходов электротехнического алюминия марки АД0Е // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022;12(4):40-53. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-440-53>.
14. Агеев Е.В., Поданов В.О., Агеева А.Е. Оптимизация процесса изготовления жаропрочного никелевого сплава путем искрового плазменного спекания порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов ЖС6У в воде // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2023. № 4. С. 170-174.
15. Агеев Е.В., Серебровский В.И., Поданов В.О., Агеева А.Е. Исследование влияния среды диспергирования на свойства жаропрочных порошков, полученных из отходов сплава ЖСУ6 // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022;12(3):39-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-39-56>
16. Ageeva E.V. Dimensional analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U in water / E.V. Ageev, A.E. Gvozdev, E.A. Protopopov, V.O. Podanov, A.E. Ageeva // *Chebyshevskii sbornik*. 2022. Vol. 23. No. 1. Pp. 197–207.
17. Ageeva E.V. Mathematical optimization of the average particle size of powders obtained by electroerosive dispersion of heatresistant nickel alloy ZHS6U / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, A.E. Gvozdev, E.A. Protopopov, V.O. Podanov // *Chebyshevskii sbornik*. 2022. Vol. 23. No. 3. Pp. 178–193.
18. Ageev E.V. Numerical optimization of the charge production process by electrodispersion of T5K10 alloy waste / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, A.E. Gvozdev, A.A. Kalinin // *Chebyshevskii sbornik*. 2022. Vol. 23. No. 1. Pp. 183–195.
19. Агеев Е.В., Агеева А.Е. Состав, структура и свойства твердосплавных порошков, полученных электродиспергированием сплава Т5К10 в воде // *Металлург*. 2022. №2. С. 39-43.
20. Агеев Е.В., Кругляков О.В., Поданов В.О. Размерные характеристики порошков, полученных электродиспергированием сплава ЖС6У в керосине // *Вестник ВолгГТУ*. 2022. №7 (266). С. 62-66.

References

1. Patrushev A. Y., Farafonov D. P., Serov M. M. Bezvol'framovye tverdye splavy: metody polucheniya, struktura i svoistva (obzor) [Tungsten-free hard alloys: methods of preparation, structure and properties (review)]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2021, no. 11(105), pp. 66-81.
2. Akimov V. V., Badamshin A.M., Nesov S. N. [et al.] Izmenenie strukturno-fazovogo sostoyaniya i fiziko-khimicheskikh svoistv bezvol'framovykh tverdykh splavov TiC-TiNi posle razlichnykh vidov ionno-luchevoi obrabotki [Changes in the structural and phase state and physico-chemical properties of tungsten-free hard alloys TiC-TiNi after various types of ion-beam treatment]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2021, no. 2(176), pp. 5-9.
3. Panov V.S. Bezvol'framovye tverdye splavy: analiticheskii obzor [Tungsten-free hard alloys: an analytical review]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2019, no. 10, pp. 33-39.
4. Panov V.S., Nitkin N.M. Bezvol'framovye tverdye splavy [Tungsten-free hard alloys]. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo = Nanotechnology: science and production*, 2017, no. 3, pp. 65-70.
5. Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Material balance of the process of electroerosive dispersion of waste of tungsten-free hard alloys of the KNT16 brand in distilled water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologie*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 8-19.
6. Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Rentgenospektral'nyi mikroanaliz elektroerozionnogo poroshkovogo materiala, poluchennogo v srede etilovogo spirta iz otkhodov bezvol'framovogo tverdogo splava marki KNT16 [X-ray spectral microanalysis of an electroerosive powder material obtained in an ethyl alcohol medium from waste of a tungsten-free hard alloy of the KNT16 brand]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestiya Volgograd State Technical University*, 2020, no. 7 (242), pp. 33-36.
7. Loktionova O.G., Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Results of X-ray studies of sintered samples obtained from electroerosive powder material of the KNT16 alloy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologie*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 22-34.
8. Badamshin A.M., Nesov S.N., Kovivchak V.S., Povoroznyuk S.N., Akimov V.V. Vliyanie ionnogo oblucheniya na morfologiyu, elementnyi i khimicheskii sostav poverkhnostnykh sloev bezvol'framovykh tverdykh splavov [The effect of ion irradiation on the morphology, elemental and chemical composition of surface layers of tungsten-free hard alloys]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Letters to the Journal of Technical Physics*, 2021, vol. 47, no. 15, pp. 19-22.
9. Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Struktura i svoistva bezvol'framovogo tverdogo splava na osnove karbonitrida titana, spechennogo iz elektroerozionnykh poroshkov, poluchennykh v uglerodsoderzhashchei srede [Structure and properties of a tungsten-free hard alloy based

on titanium carbonitride sintered from electroerosive powders obtained in a carbon-containing medium]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*, 2021, no. 4, pp. 158-162.

10. Ageeva E.V., Loktionova O.G., Sabelnikov B.N. Comparative Analysis of the Process of Obtaining a Charge for a Tungsten-Free CST Hard Alloy by Means of Electroerosive Dispersion in Carbon-and oxygen-containing Working Fluids. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2021;11(1):21-35 (In Russ.).

11. Ageev E.V., Ageeva A.E. Composition, structure and properties of hard-alloy powders obtained by electrodispersion of T5K10 alloy in water. *Metallurgist*, 2022, vol. 66, no. 1-2, pp. 146-154.

12. Ageev E.V., Ageeva A. E. Struktura i svoistva poroshkov, poluchennykh v usloviyakh elektroerozionnoi metallurgii otkhodov tverdogo splava T5K10 v kislorod- i uglerod-soderzhashchikh sredakh [Structure and properties of powders, solid alloy T5K10 wastes obtained in the conditions of electroerosive metallurgy in oxygen- and carbon-containing media]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*, 2022, no.9 (213), pp. 387-392.

13. Ageev E.V., Pykhtin A.I., Novikov E.P., Ageeva A.E. Parametric Parameters of the Shape of Electrocorundum Particles Obtained by Electrodispensing Waste Electrical Aluminum Grade AD0E. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2022;12(4):40-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-440-53>

14. Ageev E.V., Podanov V.O., Ageeva A.E. Optimizatsiya protsessa izgotovleniya zharoprochnogo nikelovogo splava putem iskrovogo plazmennogo spekaniya poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergированием otkhodov ZhS6U v vode [Optimization of the manufacturing process of a heat-resistant nickel alloy by spark plasma sintering of powders obtained by electroerosive dispersion of waste ZHS6U in water]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening Technologies and Coatings*, 2023, no. 4, pp. 170-174.

15. Ageev E.V., Serebrovsky V.I., Podanov V.O., Ageeva A.E. Investigation of the Influence of the Dispersion Medium on the Properties of Heat-resistant Powders Obtained from the Waste of the Alloy ZHSU6. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2022;12(3):39-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-39-56>.

16. Ageev E.V., Gvozdev A.E., Protopopov E.A., Podanov V.O., Ageeva A.E. Dimensional analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U in water. *Chebyshevskii sbornik*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 197–207.

17. Ageev E.V., Ageeva E.V., Gvozdev A.E., Protopopov E.A., Podanov V.O. Mathematical optimization of the average particle size of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U. *Chebyshevskii sbornik*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 178–193.

18. Ageev E.V., Ageeva E.V., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. Numerical optimization of the charge production process by electrodispersion of T5K10 alloy waste. *Chebyshevskii sbornik*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 183-195.

19. Ageev E.V., Ageeva A.E. Sostav, struktura i svoistva tverdosplavnykh poroshkov, poluchennykh elektrodyspergirovaniem splava T5K10 v vode [Composition, structure and properties of carbide powders obtained by electrodispersion of T5K10 alloy in water]. *Metal-lurg*, 2022, no.2, pp. 39-43.

20. Ageev E.V., Kruglyakov O.V., Podanov V.O. Razmernye kharakteristiki poroshkov, poluchennykh elektrodyspergirovaniem splava ZhS6U v kerosine [Dimensional characteristics of powders obtained by electrodispersion of the ZHS6U alloy in kerosene]. *Vestnik VolgGTU = Vestnik VolgSTU*, 2022, no.7 (266), pp. 62-66.

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: <https://orcid.org/0000-0001-8457-6565>

Хорьякова Наталья Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: natali030119891@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0980-1974>

Сабельников Борис Николаевич, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sabelnikovboris1@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-699X>

Агеева Анна Евгеньевна, студентка, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru, SPIN-код: 6687-3804

Ekaterina V. Ageeva, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Technology of Materials and Transport Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8457-6565>

Natalia M. Horiakova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Materials and Transport Technology Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: natali030119891@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0980-1974>

Boris N. Sabelnikov, Senior Lecturer, Industrial and Civil Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sabelnikovboris1@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-699X>

Anna E. Ageeva, Student of the Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru, SPIN-код: 6687-3804