

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-62-75>

Оптимизация процесса изготовления безвольфрамового твердого сплава путем искрового плазменного спекания порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов сплава ТН20 в спирте

Е.В. Агеева¹✉, Н.М. Хорьякова¹, Б.Н. Сабельников¹, А.Е. Агеева¹

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 являлась оптимизация условий искрового плазменного спекания порошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава марки ТН20, для производства беспористых и высокотвердых безвольфрамовых твердых сплавов.

Методы. Диспергируемые металлоотходы – куски сплава марки ТН20 размером 20x20x5 мм. Химический состав в соответствии с ГОСТ 26530–85 следующий: Ni до 15%; Mo до 6%; Nb до 0,1%; TiC остальное. Рабочая жидкость – спирт изопропиловый. Установка для диспергирования металлоотходов – экспериментальная запатентованная. Режимы для диспергирования металлоотходов: 61,5 мкФ (емкость), 130 В (напряжение), на электродах 130 Гц (частота импульсов). Установка для сплавления порошков SPS 25-10 «Thermal Technology». Микроструктуру БВТС изучали на сканирующем электронном микроскопе QUANTA 600 FEG. Оптимизацию условий искрового плазменного сплавления порошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава марки ТН20, для производства беспористых и высокотвердых безвольфрамовых твердых сплавов осуществляли постановкой факторного эксперимента и методом крутого восхождения Бокса и Уилсона.

Результаты. В соответствии с поставленной целью, направленной на оптимизацию условий искрового плазменного спекания порошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава марки ТН20, для производства беспористых и высокотвердых безвольфрамовых твердых сплавов, установлена оптимальная твердость равная 95,2 HRA при следующих значениях факторов: температура 1250°С, давление 40 МПа, время выдержки 15 минут.

Заключение. Таким образом, поставленная цель достигнута. Результаты работы могут найти практическое применение при организации ресурсосберегающих и импортозамещающих технологий.

Ключевые слова: отходы; безвольфрамовый твердый сплав; электроэрозионное диспергирование; твердосплавный порошок; искровое плазменное спекание.

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

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

© Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Сабельников Б.Н., Агеева А.Е., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии /
Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies. 2025;15(2):62–75

Для цитирования: Оптимизация процесса изготовления безвольфрамового твердого сплава путем искрового плазменного спекания порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов сплава TN20 в спирте / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Б.Н. Сабельников, А.Е. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 2. С. 62–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-62-75>.

Поступила в редакцию 30.04.2025

Подписана в печать 28.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Optimization of the manufacturing process of a tungsten-free hard alloy by spark plasma sintering of powders obtained by electro-erosive dispersion of TN20 alloy waste in alcohol

Ekaterina V. Ageeva^{1✉}, Natalya M. Horyakova¹, Boris N. Sabelnikov¹,
Anna E. Ageeva¹

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

The purpose of this work was to optimize the conditions of spark plasma sintering of powders obtained by electrodispersion of metal waste of the TN20 alloy for the production of nonporous and high-hardness tungsten-free hard alloys. **Methods.** Dispersible metal waste is made up of 20x20x5 mm pieces of TN20 alloy. The chemical composition in accordance with GOST 26530-85 is as follows: Ni up to 15%; Mo up to 6%; Nb up to 0.1%; TiC the rest. The working fluid is isopropyl alcohol. The plant for metal waste dispersion is an experimental and patented one. The modes for dispersing metal waste are 61.5 UF (capacity), 130 V (voltage), at 130 Hz (pulse frequency). Powder fusion plant – SPS 25-10 "Thermal Technology". The BVTS microstructure was studied using a scanning electron microscope QUANTA 600 FEG. Optimization of the conditions of spark plasma fusion of powders obtained by electrodispersion of metal waste of the TN20 alloy for the production of porous and high-hardness tungsten-free hard alloys was carried out using a factor experiment and the method of steep ascent by Box and Wilson. **Results.** In accordance with the goal set, aimed at optimizing the conditions of spark plasma sintering of powders obtained by electrodispersing metal waste from a TN20 alloy for the production of nonporous and high-hardness tungsten-free hard alloys, an optimal hardness of 95.2 HRA was established at the following values of factors: temperature 1250 °C, pressure 40 MPa, holding time 15 minutes. **Conclusion.** Thus, the goal has been achieved. The results of the work can find practical application in the organization of resource-saving and import-substituting technologies.

Keywords: tungsten-free hard alloy waste; electro-erosion dispersion; carbide powder; spark plasma sintering.

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 the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00316, <https://rscf.ru/project/24-29-00316/>.

For citation: Ageeva E.V., Khoryakova N.M., Sabelnikov B.N., Ageeva A.E. Optimization of the manufacturing process of a tungsten-free hard alloy by spark plasma sintering of powders obtained by electro-erosion dispersion of TN20 alloy waste in alcohol. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(2):62–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-62-75>.

Received 30.04.2025

Accepted 28.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

В настоящее время значительное количество режущего инструмента для обработки различных материалов изготавливают из безвольфрамовых твердых сплавов (БВТС) [1] группы ТН [2]. Как следствие, накапливаются и значительные объемы металлоотходов данного сплава [3]. В своем составе данный сплав содержит значительное количество дорогостоящих компонентов, таких как: Ti, Mo и Ni [4]. Одними из наиболее перспективных методов рециклинга металлоотходов являются методы, позволяющие перерабатывать их в порошковые материалы [5].

Заслуживающим особого внимания является метод, позволяющий измельчать любые токопроводящие материалы в порошок при малых затратах электроэнергии и при отсутствии сточных вод и вредных выбросов [6]. Таковым является метод, основанный на расщеплении кусков металлоотходов за счет электрической эрозии [7]. Электроэрозионный метод к настоящему времени в промышленности практически не применяется и в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения о составе, структуре и свойствах порошковых материалов, полученных из металлоотходов сплава ТН20 [8].

В связи с этим для оценки возможности практического применения твердосплавных порошков, полученных электродиспергированием отходов сплава ТН20 [9], для производства новых качественных, т. е. беспористых и высокотвердых сплавов необходимо провести соответствующие экспериментальные исследования [10].

Но, к сожалению, традиционные методы спекания порошков не способствуют образованию беспористой структуры сплавов и стабильно высоким физико-механическим свойствам [11].

В рамках данной работы для производства беспористых и высокотвердых безвольфрамовых твердых сплавов из порошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава марки ТН20 [12], предлагается к использованию метод, сочетающий одновременное прессование и спекание путем пропускания через частицы порошка высокоамперного импульсного электрического тока [13] – искровое плазменное спекание (ИПС) [14]. Однако свойства БВТС, полученного в данных условиях из данного материала, не изучены [15].

Целью настоящей работы являлась оптимизация условий искрового плазменного спекания порошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава марки ТН20, для производства беспористых и высокотвердых безвольфрамовых твердых сплавов.

Материалы и методы

Диспергируемые металлоотходы – куски сплава марки ТН20 размером 20×20×5 мм. Химический состав в соответствии с ГОСТ 26530–85 следующий: Ni до 15%; Mo до 6 %; Nb до 0,1%; TiC остальное [16].

Рабочая жидкость – спирт изопропиловый.

Установка для диспергирования металлоотходов – экспериментальная запатентованная [17].

Режимы для диспергирования металлоотходов: 61,5 мкФ (емкость), 130 В (напряжение), на электродах 130 Гц (частота).

Установка для сплавления порошков – SPS 25-10 «Thermal Technology» (рис. 1) [18].

Микроструктуру БВТС изучали на сканирующем электронном микроскопе QUANTA 600 FEG [19].

Оптимизацию условий искрового плазменного сплавления порошков, полу-

ченых электродиспергированием металлотходов сплава марки ТН20, для производства беспористых и высокотвердых безвольфрамовых твердых сплавов осуществляли постановкой факторного экс-

перимента и методом крутого восхождения Бокса и Уилсона [20]. Алгоритм методики сплавления порошков оптимизации представлен на рисунке 2.

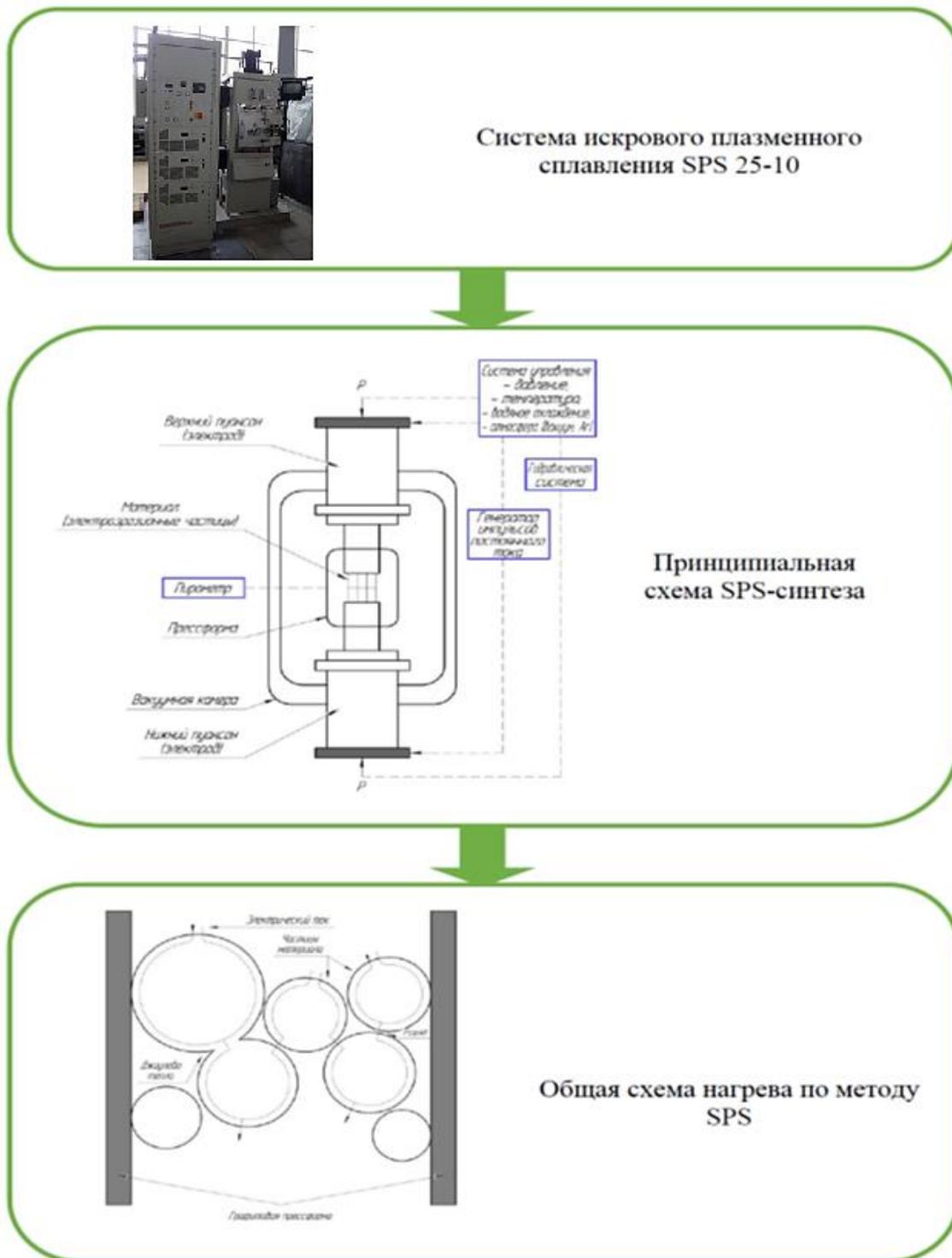


Рис. 1. Алгоритм методики сплавления порошков

Fig. 1. The algorithm of the powder fusion technique

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

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

где X_1, X_2, X_3 – факторы,

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

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

Используя уравнения $X_1 = \frac{v-0}{\Delta x_{i(v)}}$; $X_2 = \frac{v-0}{\Delta x_{i(v)}}$; $X_3 = \frac{c-0}{\Delta x_{i(c)}}$, перекодируем значения факторов и составим матрицу планирования эксперимента.

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_i	$S_{\text{воспр}_i}^2$
1	+	-	-	-	+	+	+	-					
2	+	+	-	-	-	-	+	+					
3	+	-	+	-	-	+	-	+					
4	+	+	+	-	+	-	-	-					
5	+	-	-	+	+	-	-	+					
6	+	+	-	+	-	+	-	-					
7	+	-	+	+	-	-	+	-					
8	+	+	+	+	+	+	+	+					

Рис. 2а. Алгоритм методики оптимизации. Этап 1

Fig. 2a. Optimization of the algoritе methodology. 1st stage

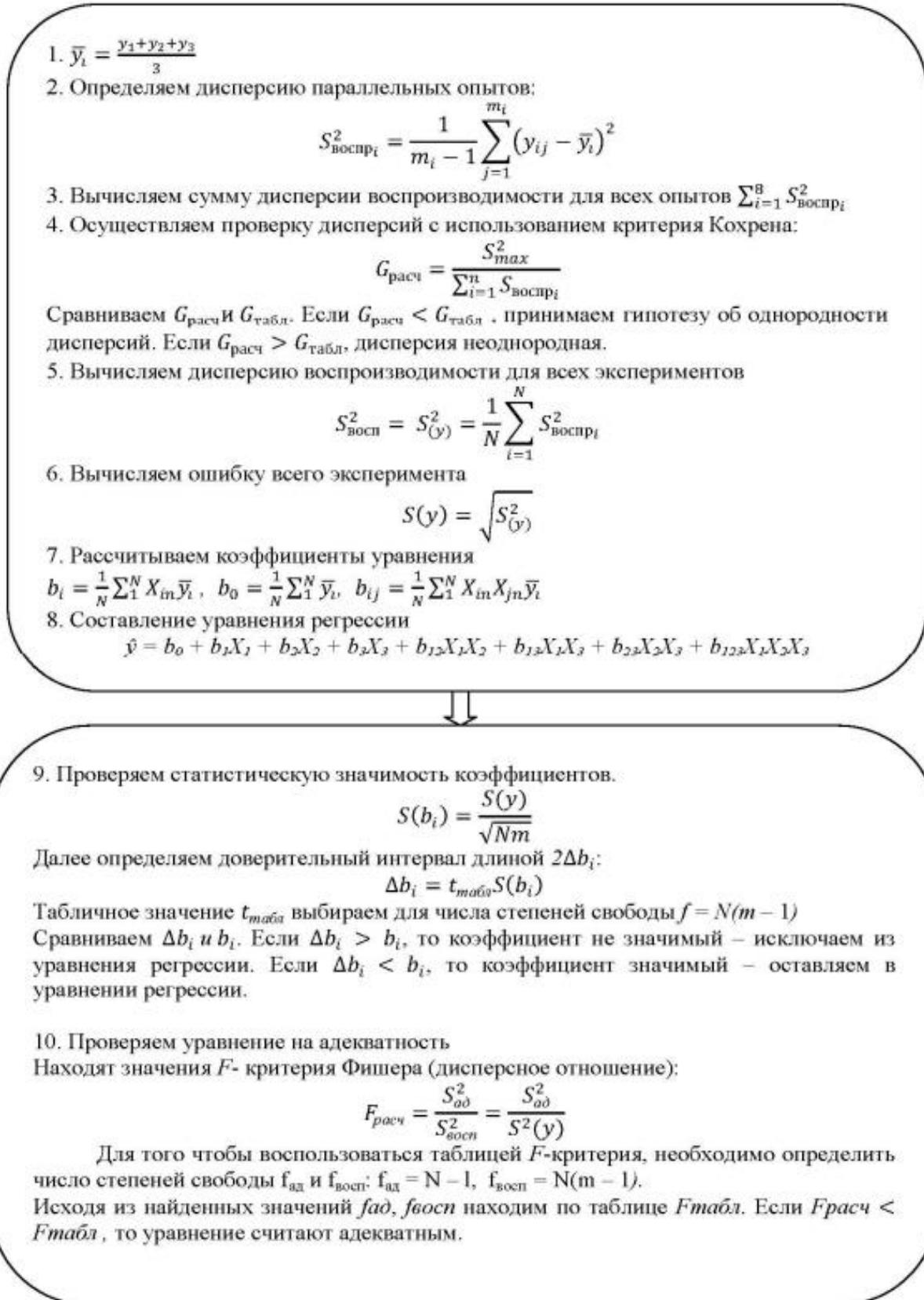


Рис. 26. Алгоритм методики оптимизации. Этап 2

Fig. 26. Optimization of the algoritme methodology. 2st stage



Рис. 2в. Алгоритм методики оптимизации. Этап 3

Fig. 2в. Optimization of the algoritе methodology. 3st stage

Результаты и их обсуждение

Оптимизацию условий искрового плазменного спекания порошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава марки ТН20, для производства беспористых и высокотвердых безвольфрамовых твердых сплавов осуществляли в два этапа: предварительный и окончательный.

На первом этапе осуществляли поиск 3-х основных факторов, влияющих на состав, структуру и свойства новых безвольфрамовых твердых сплавов. Как показали предварительные эксперименты, такими оказались следующие факторы:

1) температура спекания (T , °C); отмечено, что при низких значениях температуры частицы электроэрозионного твердосплавного порошка полностью не сплавляются, а при высоких – полностью расплавляются и после кристаллизации сплав имеет крупнозернистую структуру;

2) давление (P , МПа); отмечено, что при низких значениях давления в микроструктуре сплава наблюдается наличие значительного количества пор;

3) время выдержки (t , мин); отмечено, что при низких значениях времени выдержки частицы электроэрозионного твердосплавного порошка полностью не успевают сплавиться, а при высоких сплав начинает «течь».

На втором этапе осуществляли поиск оптимальных физико-механических свойств нового БВТС путем проведения полного факторного эксперимента (ПФЭ) с учетом ранее установленных 3-х основных факторов. При этом за критерий оптимизации была принята твердость сплава как параметр, обладающий как технологической простотой определения его значения, так и информативностью.

Для математического описания ИПС электроэрозионных твердосплавных порошков применяли модель первого порядка.

В соответствии с алгоритмом методики (см. рис. 2) установили уровни варьируемых факторов (УВФ) и интервалы варьирования факторов (ИВФ) (табл. 1) и составлены матрицы планирования экспериментов (МПЭ) (табл. 2).

Таблица 1. УВФ и ИВФ по получению БВТС

Table 1. UVF and IVF for obtaining BVTS

УВФ	Обозначение кодовое	T , °C	P , МПа	t , ч
		X_1	X_2	X_3
Главный уровень	0	1200	30	10
ИВФ	Δx_i	50	10	5
Крайний сверху	+1	1250	40	15
Нижний уровень	-1	1150	20	5

Уравнение регрессии, моделирующее ПФЭ, после расчета имеет следующий вид:

$$\hat{y} = 87,6 + 4,1X_1 + 1,46X_2 + 2,1X_3 - 0,12X_1X_2 - 0,12X_1X_3 - 0,13X_2X_3 - 0,12X_1X_2X_3. \quad (1)$$

Таблица 2. МПЭ по получению БВТС

Table 2. MPE for obtaining BVTS

Номер 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>i</i>}
1	+	-	-	-	+	+	+	-					
									79	81	80	80	1
2	+	+	-	-	-	-	+	+					
									88	88	88	88	0
3	+	-	+	-	-	+	-	+					
									84	85	80	83	7
4	+	+	+	-	+	-	-	-					
									91	92	90	91	1
5	+	-	-	+	+	-	-	+					
									84	86	82	84	4
6	+	+	-	+	-	+	-	-					
									93	93	93	93	0
7	+	-	+	+	-	-	+	-					
									86	88	87	87	1
8	+	+	+	+	+	+	+	+					
									95	97	93	95	4

Проверка коэффициентов уравнения на статическую значимость показала, что коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{123} являются малозначимыми, поэтому данные коэффициенты убираем из окончательного уравнения регрессии:

$$\hat{y} = 87,6 + 4,1X_1 + 1,46X_2 + 2,1X_3. (2)$$

Критерий Фишера показал, что полученное уравнение является адекватным. Полученное уравнение использовалось в дальнейшем для расчета крутого восхождения (РКВ) и поиска оптимальной твердости сплава (табл. 3).

Таблица 3. РКВ для определения оптимальной твердости сплава

Table 3. RCW for determining the optimal hardness of the alloy

Наименование	X ₁ (T, °C)	X ₂ (P, МПа)	X ₃ (t, мин)	\hat{y} , HRA
Основной уровень	1200	30	10	-
Коэффициент b_i	4,1	1,4	2,1	-
Интервал варьирования ξ_i	50	10	5	
$b_i \cdot \xi_i$	205	14	10,5	-
Шаг Δi	20,5	1,4	1,05	-
Округленный шаг	21	1	1	-
Опыт 1	1221	31	11	89,8
Опыт 2	1242	32	12	92,1
Опыт 3	1250	33	13	93,3
Опыт 10 (max)	1250	40	15	95,2

Экспериментально по результатам 10-ти опытов установлена оптимальная твердость нового БВТС равная 95,2 HRA при следующих значениях факторов: температура 1250°C, давление 40 МПа, времени выдержки 15 мин.

Атомно-силовая микроскопия поверхности микрошлифа нового БВТС показала мелкозернистую, бездефектную структуру (рис. 3).

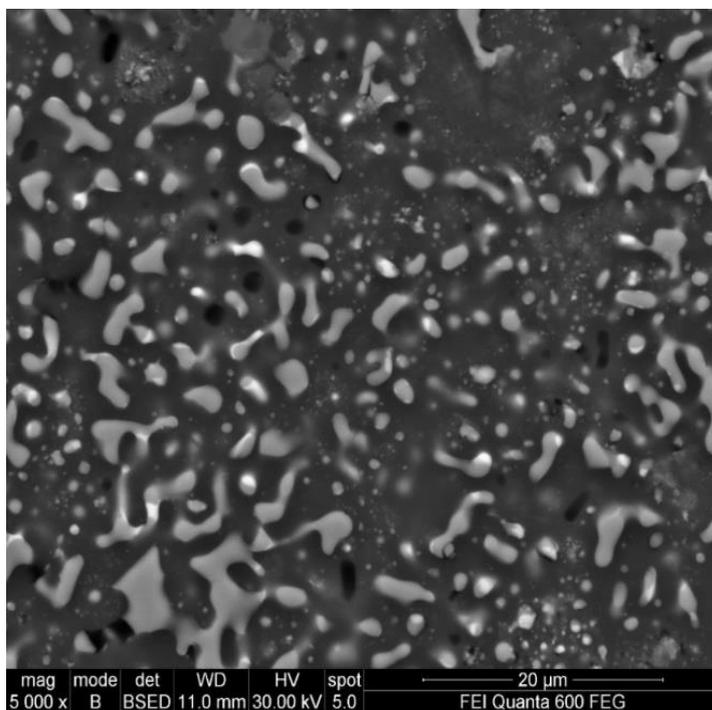


Рис. 3. Микроструктура БВТС, изготовленного ИПС твердосплавных электроэрозионных порошков, полученных в спирте

Fig. 3. Microstructure of BVTs made from carbide electroerosion powders obtained in alcohol

Таким образом, поставленная цель достигнута. Результаты работы могут найти практическое применение при организации ресурсосберегающих и импортозамещающих технологий.

Заключение

В соответствии с поставленной целью, направленной на оптимизацию условий искрового плазменного спекания по-

рошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава марки ТН20, для производства беспористых и высокотвердых безвольфрамовых твердых сплавов, установлена оптимальная твердость равная 95,2 HRA при следующих значениях факторов: температура 1250°C, давление 40 МПа, время выдержки 15 мин.

Список литературы

1. Панов В.С. Безвольфрамовые твердые сплавы: аналитический обзор // *Материаловедение*. 2019. № 10. С. 33-39.
2. Панов В.С., Ниткин Н.М. Безвольфрамовые твердые сплавы // *Нанотехнологии: наука и производство*. 2017. № 3. С. 65-70.

3. 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.
4. 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.
5. 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. Поворозюк, В.В. Акимов // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47, № 15. С. 19-22.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
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. Т. 11, № 1. С. 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, no. 1-2. P. 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. Параметрические показатели формы частиц электрокорунда, полученного электродиспергированием отходов электротехнического алюминия марки АД0Е / Е.В. Агеев, А.И. Пыхтин, Е.П. Новиков, А.Е. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 4. С. 40-53. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1528-2022-12-440-53](https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-440-53).
14. Исследование влияния среды диспергирования на свойства жаропрочных порошков, полученных из отходов сплава ЖСУ6 / Е.В. Агеев, В.И. Серебровский, В.О. Поданов, А.Е. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 3. С. 39-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-39-56>.
15. 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. P. 197–207.
16. 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. P. 178–193.

17. 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. P. 183–195.

18. Агеев Е.В., Агеева А.Е. Состав, структура и свойства твердосплавных порошков, полученных электродиспергированием сплава Т5К10 в воде // *Металлург*. 2022. № 2. С. 39-43.

19. 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.

20. Оптимизация процесса получения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава ТН20 в воде / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Б.Н. Сабельников, А.Е. Агеева // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2024. Т. 28, № 1. С. 27-43. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-27-43>. EDN MСAХVN.

Reference

1. Panov V.S. Tungsten-free hard alloys: an analytical review. *Materialovedenie = Materials Science*. 2019;(10):33-39. (In Russ.)

2. Panov V.S., Nitkin N.M. Tungsten-free hard alloys. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo = Nano-technologies: science and production*. 2017;(3):65-70. (In Russ.)

3. Patrushev A.Yu., Farafonov D.P., Serov M.M. Tungsten-free hard alloys: production methods, structure and properties (review). *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2021;(11):66-81. (In Russ.)

4. Akimov V.V., Badamshin A.M., Nesov S.N., et al. Change in the structural and phase state and physico-chemical properties of tungsten-free hard TiC-TiNi alloys after various types of ion beam treatment. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2021;(2):5-9. (In Russ.)

5. Badamshin A.M., Nesov S.N., Kovivchak V.S., Povoroznyuk S.N., Akimov V.V. 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;47(15):19-22. (In Russ.)

6. Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. The material balance of the process of electroerosion dispersion of waste of tungsten-free solid alloys of the KST16 brand in distilled water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2020;10(3):8-19. (In Russ.)

7. Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. X-ray spectral microanalysis of an electroerosive powder material obtained in an environment of ethyl alcohol from waste of a tungsten-free hard alloy of the KNT16 brand. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitet = Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;(7):33-36. (In Russ.)

8. Loktionova O.G., Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Results of X-ray studies of sintered samples obtained from electroerosion powder material of alloy KNT16. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2020;10(4):22-34. (In Russ.)

9. Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Structure and properties of a tungsten-free hard alloy based on titanium carbonitride sintered from electro-erosive powders obtained in a carbon-containing medium. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Reinforcing technologies and coatings*. 2021;(4):158-162. (In Russ.)

10. Ageeva E.V., Loktionova O.G., Sabelnikov B.N. Evaluation of energy consumption in the preparation of a charge for the production of tungsten-free hard alloy by electrodispersion. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 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. *Metallurg = Metallurgist*. 2022;66(1-2):146-154.
12. Ageev E.V., Ageeva A.E. Structure and properties of powders obtained in the conditions of electroerosion metallurgy of T5K10 hard alloy waste in oxygen- and carbon-containing media. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2022;(9):387-392. (In Russ.)
13. Ageev E.V., Pykhtin A.I., Novikov E.P., Ageeva A.E. Parametric parameters of the particle shape of electrocorundum obtained by electrodispersion of 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., Serebrovsky V.I., Podanov V.O., Ageeva A.E. Investigation of the effect of the dispersion medium on the properties of heat-resistant powders obtained from waste alloy ZHSU6. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022;12(3):39-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-39-56>.
15. Ageeva 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 = Chebyshevskii sbornik*. 2022;23(1):197-207. (In Russ.)
16. Ageeva 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 = Chebyshevskii sbornik*. 2022;23(3):178-193. (In Russ.)
17. 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 = Chebyshevskii sbornik*. 2022;23(1):183-195.
18. Ageev E.V., Ageeva A.E. Composition, structure and properties of carbide powders obtained by electrodispersing T5K10 alloy in water. *Metallurg = Metallurgist*. 2022;(2):39-43. (In Russ.)
19. Ageev E.V., Podanov V.O., Ageeva A.E. Optimization of the process of heat-resistant nickel alloy production by spark plasma sintering of powders obtained by electroerosion dispersion of ZHS6U products in water. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2023;(4):170-174. (In Russ.)
20. Ageeva E.V., Khoryakova N.M., Sabelnikov B.N., Ageeva A.E. Optimization of the process of obtaining powder materials for the production of carbide cutting tools by electrodispersing metal waste from TN20 alloy in water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;28(1):27-43. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-27-43>. EDN MCAXVN.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

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: 0000-0003-0980-1974

Сабельников Борис Николаевич, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sabelnikovboris1@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8819-699X

Агеева Анна Евгеньевна, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru,
ORCID: 0009-0001-1809-037X,
SPIN-код: 6687-3804

Natalia M. Horiakova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Materials and Transport Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: natali030119891@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-0980-1974

Boris N. Sabelnikov, Associate Professor of the Department Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail sabelnikovboris1@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8819-699X

Anna E. Ageeva, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru,
ORCID: 0009-0001-1809-037X,
SPIN-код: 6687-3804