

Оригинальная статья / Original article

УДК 621

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-21-29>

Оптимизация технологии сплавления твердосплавных электроэрозионных порошковых материалов

Е.В. Агеев^{1✉}, Б.Н. Сабельников¹

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Цель. Оптимизация технологии спекания шихты, полученной методом электроэрозионного диспергирования отходов безвольфрамовых твердых сплавов в углеродсодержащей рабочей среде.

Методы. В качестве исходного материала для исследований были выбраны отходы безвольфрамового твердого сплава. Процесс диспергирования проводили в углеродсодержащей рабочей жидкости – метаноле. Для осуществления электроэрозионного диспергирования использовалась установка, конструкция которой защищена патентом Российской Федерации №2449859.

Электроэрозионные частицы были консолидированы с использованием установки для искрового плазменного спекания Spark Plasma Sintering system Model 25-10 (SPS 25-10), произведенной компанией Thermal Technology.

Подбор режимов консолидации (температуры, давления и времени выдержки) для нового сплава осуществляли по критерию достижения максимальной микротвердости спеченных образцов с применением метода полного факторного эксперимента типа 2³.

Результаты. Проведенные измерения показали, что микротвердость образцов, спеченных методом SPS из порошка, диспергированного в среде метилового спирта, в среднем равна 1415 HV.

Заключение. Методом полного факторного эксперимента типа 2³ проведена оптимизация параметров процесса синтеза безвольфрамового твердого сплава методом искрового плазменного спекания по критерию микротвердости готовых образцов. Варьируемыми факторами выступали ключевые параметры работы установки SPS: температура, давление и время выдержки. Оптимизация проводилась для материала, полученного путем электроэрозионного диспергирования отходов БВТС в углеродсодержащей среде (метаноле).

По результатам серии экспериментов определены оптимальные режимы спекания, обеспечивающие достижение максимальных значений микротвердости. Максимальная микротвердость композита с электроэрозионными частицами, полученными в среде метанола, достигла 1427 HV, что на 17% выше, чем у базового промышленного сплава. Этот максимум был зафиксирован после спекания при 1200°C под давлением 40 МПа с 5-минутной выдержкой.

Ключевые слова: безвольфрамовые твердые сплавы; электроэрозионное диспергирование; шихта; дисперсность; оптимизация; полный факторный эксперимент.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

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

Для цитирования: Агеев Е.В., Сабельников Б.Н. Оптимизация технологии сплавления твердосплавных электроэрозионных порошковых материалов / // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 4. С. 21–29. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-21-29>.

Поступила в редакцию 08.10.2025

Подписана в печать 26.11.2025

Опубликована 25.12.2025

© Агеев Е.В., Сабельников Б.Н., 2025

Optimization of the technology for fusing hard-alloy electro-erosion powder materials

Evgeny V. Ageev¹✉, Boris N. Sabelnikov¹

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose. Optimization the sintering process of an electroerosion charge obtained by the method of electroerosion dispersion of tungsten-free hard alloy waste in a carbon-containing working fluid.

Methods. Tungsten-free carbide waste was selected as the starting material for the study. The dispersion process was carried out in a carbon-containing working fluid—methanol. A setup whose design is protected by Russian Federation Patent No. 2449859 was used for electrical discharge dispersion.

The electro-erosion particles were consolidated using the Spark Plasma Sintering system Model 25-10 (SPS 25-10) manufactured by Thermal Technology.

The consolidation modes (temperature, pressure, and exposure time) for the new alloy were selected based on the criterion of achieving the maximum microhardness of the sintered samples using the 2³ full factorial experiment method.

Results. The measurements carried out showed that the microhardness of samples sintered by the SPS method from powder dispersed in a methyl alcohol medium is on average 1415 HV.

Conclusion. The determination of optimal parameters of the process of obtaining tungsten-free hard alloy by spark plasma sintering of particles according to the microhardness of sintered samples by conducting a full factor experiment of type 2³ has been carried out. The following parameters of the spark plasma sintering unit have been selected as factors: temperature, pressure and holding time. Optimal parameters of the unit operation have been determined for the electroerosion material previously obtained from TFHA waste in carbon-containing medium - distilled water.

Based on the results of a series of experiments, the optimal sintering conditions were determined to achieve the maximum microhardness values. The maximum microhardness of the composite with electro-eroded particles obtained in a methanol environment reached 1427 HV, which is 17% higher than that of the base industrial alloy. This maximum was achieved after sintering at 1200 °C under a pressure of 40 MPa with a 5-minute exposure.

Keywords: tungsten-free hard alloys; electrical discharge dispersion; charge; dispersion; optimization; full factorial experiment.

Funding: The work was carried out as part of the implementation of the development program of the Southwest State University under the "Priority 2030" project.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ageev E.V., Sabelnikov B.N. Optimization of the technology for fusing hard-alloy electro-erosion powder materials. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(4):21-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-21-29>.

Received 08.10.2025

Accepted 26.11.2025

Published 25.12.2025

Введение

В современных промышленных условиях спеченные твердые сплавы находят широкое применение, в том числе при изготовлении строительной техники и оборудования. Одной из значимых проблем является сокращение расхода дорогостоящего и дефицитного вольфрама. В каче-

стве решения данной задачи разработаны безвольфрамовые твердые сплавы, основу которых составляют карбиды и карбидонитриды переходных металлов, в первую очередь титана [1–3].

Актуальность переработки и повторного использования (рециклинга) таких сплавов обусловлена присутствием в их

составе ценных и дорогостоящих элементов, таких как титан, никель и молибден. Одним из наиболее перспективных методов измельчения электропроводных материалов, не нашедших пока широкого промышленного применения, является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД), который позволяет эффективно обрабатывать материалы независимо от их твердости, прочности и иных физико-механических характеристик [4–6].

Для достижения высоких показателей физико-механических свойств спеченных изделий, производимых из электроэрозионной шихты (частиц, полученных методом ЭЭД) безвольфрамовых твердых сплавов, необходима оптимизация режимных параметров процесса сплавления. В данной работе для решения этой задачи применяется метод планирования полного факторного эксперимента [7–8].

Целью исследования является оптимизация технологии спекания шихты, по-

лученной методом электроэрозионного диспергирования отходов безвольфрамовых твердых сплавов (БВТС) в углеродсодержащей рабочей среде.

Материалы и методы

В качестве исходного материала для исследований были выбраны отходы безвольфрамового твердого сплава. Процесс диспергирования проводили в углеродсодержащей рабочей жидкости – метаноле. Для осуществления электроэрозионного диспергирования использовалась установка, конструкция которой защищена патентом Российской Федерации № 2449859 [9; 10].

Консолидация полученных электроэрозионных частиц осуществлялась на оборудовании для искрового плазменного сплавления Spark Plasma Sintering system Model 25-10 (SPS 25-10) производства Thermal Technology [11–14] (рис. 1).



Рис. 1. Установка для искрового плазменного сплавления Spark Plasma Sintering system Model 25-10 (SPS 25-10)

Fig. 1. Thermal Technology Spark Plasma Sintering system Model 25-10 (SPS 25-10)

Оптимизация параметров консолидации нового сплава (температура, давление, время выдержки) проводилась по критерию микротвердости спеченных образцов с применением методики полного факторного эксперимента типа 2^3 [15].

Для анализа влияния указанных факторов и построения математической модели процесса синтеза безвольфрамового твердого сплава методом искрового плазменного сплавления использовалась полиномиальная модель первого порядка

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

где X_1 , X_2 , X_3 – кодированные значения факторов: температуры (T , °C), давления (P , МПа) и времени выдержки (t , мин) соответственно, а $\hat{y}$ – выходная переменная (микротвердость) [16; 17].

В работе были определены основные и варьируемые уровни факторов (табл. 1) и построена соответствующая матрица планирования эксперимента (рис. 2).

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования

Table 1. Levels and intervals of variation

Уровень варьируемых факторов Level of variable factors	Обозначение кодовое Code designation	T , °C	P , МПа	t , мин
		X_1	X_2	X_3
Основной уровень / Main level	0	625	30	6
Интервал варьирования / Variation interval	Δx_i	400	10	4
Верхний уровень / Top level	+1	1050	40	10
Нижний уровень / Lower level	-1	200	20	2

№	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_i^2
1	+	–	–	–	+	+	+	–	665	665	668	666	3
2	+	+	–	–	–	–	+	+	1094	1094	1096	1094,67	1,33335
3	+	–	+	–	–	+	–	+	775	773	775	774,33	1,33335
4	+	+	+	–	+	–	–	–	1200	1202	1203	1201,67	2,33335
5	+	–	–	+	+	–	–	+	881	880	883	881,33	2,33335
6	+	+	–	+	–	+	–	–	1307	1309	1309	1308,33	1,33335
7	+	–	+	+	–	–	+	–	987	989	986	987,33	2,33335
8	+	+	+	+	+	+	+	+	1413	1415	1416	1414,67	2,33335

Рис. 1. Матрица планирования эксперимента

Fig. 1. Experiment planning matrix

На основе проведенных расчетов было получено уравнение регрессии, моделирующее полный факторный экспе-

римент для спекания полученной шихты [18].

$$\hat{y} = 1041,04 + 213,79X_1 + 53,46X_2 + 106,87X_3 - 0,12X_1X_2 - 0,21X_1X_3 - 0,37X_2X_3 + 0,21X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Статистический анализ значимости коэффициентов регрессии показал, что коэффициенты при парных и тройных взаимодействиях (b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{123}) являются статистически незначимыми. После их исключения уравнение регрессии было упрощено до вида

$$\hat{y} = 1041,04 + 213,79X_1 + 53,46X_2 + 106,87X_3. \quad (3)$$

Полученные модели были использованы для проведения процедуры крутого восхождения по поверхности отклика. Для сплавления шихты исходной точкой восхождения был выбран основной уровень факторов: $X_1 = 625^\circ\text{C}$, $X_2 = 30$ МПа, $X_3 = 6$ мин. Расчет шагов и результаты экспериментов крутого восхождения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты крутого восхождения

Table 2. Calculation of steep ascent

Наименование Name	X_1 (T , $^\circ\text{C}$)	X_2 (P , МПа)	X_3 (t , мин)	Y HV
Основной уровень Main level	1050	30	4	—
Коэффициент b_i Coefficient b_i	213,79	53,46	106,87	—
Интервал варьирования ξ_i Variation interval ξ_i	150	10	1	—
$b_i \cdot \xi_i$	32068,5	534,6	106,87	—
Шаг Δ_i Step Δ_i	320,685	5,36	1,0687	—
Округленный шаг Rounded step	321	5	1	—
Реализованный опыт 1 Implemented experiment 1	1200	35	5	1388,43
Реализованный опыт 2 Implemented experiment 2 (max)	1200	40	5	1415,16

В результате серии экспериментов были определены экстремальные значения параметра оптимизации – микротвердости (Y). Для образцов, полученных из частиц, диспергированных в спирте метиловом, максимальное значение микротвердости составило 1415,16 HV при следующих режимах спекания: температура $T = 1200^\circ\text{C}$, давление $P = 40$ МПа, время выдержки $t = 5$ мин.

Измерение микротвердости спеченных образцов проводилось на автоматической системе анализа DM-8 методом Вик-

керса в соответствии с ГОСТ 9450-76. Нагрузка на индентор составляла 50 г, время выдержки под нагрузкой 15 с. Для каждого образца было выполнено по десять измерений в произвольно выбранных точках.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений микротвердости полученных образцов нового безвольфрамового твердого сплава представлены в таблице 3.

Таблица 3. Микротвердость образцов по Виккерсу**Table 3.** Vickers microhardness

Номер эксперимента Experiment No.	Микротвердость по Виккерсу Vickers microhardness
1	1318
2	1505
3	1412
4	1187
5	1474
6	1371
7	1537
8	1443
9	1599
10	1303
Среднее значение (в единицах) HV Average value (units) HV	1415

Экспериментально установлено, что среднее значение микротвердости образцов, полученных методом искрового плазменного сплавления из электроэрозионных частиц, диспергированных в дистиллированной воде, составляет 1415 HV.

Выводы

1. Методом полного факторного эксперимента типа 2^3 проведена оптимизация параметров процесса синтеза безвольфрамового твердого сплава методом искрового плазменного сплавления по критерию микротвердости готовых образцов. Варьируемыми факторами выступали ключевые параметры работы установки SPS: температура, давление и время вы-

держки. Оптимизация проводилась для материала, полученного путем электроэрозионного диспергирования отходов БВТС в углеродсодержащей среде (спирте метиловом).

2. По результатам серии экспериментов определены оптимальные режимы спекания, обеспечивающие достижение максимальных значений микротвердости. Максимальная микротвердость композита с электроэрозионными частицами, полученными в среде метанола, достигла 1427 HV, что на 17% выше, чем у базового промышленного сплава. Этот максимум был зафиксирован после спекания при 1200°C под давлением 40 МПа с 5-минутной выдержкой.

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. Наумова О.Г., Сопин К.В., Янюшкин А.С. Пути развития и проблемы создания безвольфрамовых твердых сплавов // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки – развитию регионов*. 2005. Т. 2. С. 209–212.

5. Valentov A.V., Konovodov V.V., Agafonova E.V. Forecasting residual and operating stress in soldering cutting tools with tungsten-free hard alloy inserts // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 379. P. 28–31.
6. Акимов В.В. Исследование микротвердости безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбида титана // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2005. № 3–1 (23). С. 121–124.
7. Верещака А.А., Хожаев О. Повышение эксплуатационных характеристик инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов с помощью наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2014. № 3 (43). С. 20–25.
8. Акимов В.В., Мишуров А.Ф., Акимова Е.В. Жаростойкость безвольфрамовых твердых сплавов TiC-TiNi в зависимости от объемного состава композиции при нагреве до высоких температур // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. Т. 59, № 10. С. 688–691.
9. 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.
10. Ageev E.V., Ageeva E.V., Korolev M.S. Study of the surface state of powders produced under conditions of the electroerosive metallurgy of T5K10 hard-alloy waste // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022. Vol. 16, no. 6. P. 1333–1336.
11. Бурков П.В. Спекание порошков TiC-TiNi пропусканием электрического тока // *Тяжелое машиностроение*. 2008. № 12. С. 21–23.
12. Бурков П.В., Голофинова А.В., Буркова С.П. Исследование структурной наследственности при спекании порошков TiC-TiNi пропусканием электрического тока // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2006. Т. 3, № 4. С. 94–97.
13. Бурков П.В. Спекание порошков TiC-TiNi пропусканием электрического тока // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2005. № 3 (28). С. 11–13.
14. Изменение микротвердости безвольфрамовых твердых сплавов при их облучении газометаллическим пучком ионов аргона и циркония / В.В. Акимов, А.Ф. Мишуров, Д.А. Негров, Я.А. Сидорова, В.Ю. Путинцев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2019. Т. 19, № 4. С. 19–26.
15. Агеева Е.В., Агеева А.Е., Андреева Л.П. Аттестация порошковых материалов, полученных электродиспергированием безвольфрамового твердого сплава ТН20 в спирте // *Электрометаллургия*. 2024. № 6. С. 33–40.
16. Математическая оптимизация среднего размера частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Е. Гвоздев, Е.А. Протопопов, В.О. Поданов // *Чебышевский сборник*. 2022. Т. 23, № 3. С. 178–193. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2022-23-3-178-193>.
17. Численная оптимизация процесса получения шихты электродиспергированием отходов сплава Т5К10 / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Е. Гвоздев, А.А. Калинин // *Чебышевский сборник*. 2022. Т. 23, № 1. С. 183–195. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2022-23-1-183-196>.
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 MCAXVN.

References

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 = Nanotechnology: science and production*. 2017;(3):65-70. (In Russ.)
3. Patrushev A.Yu., Farafonov D.P., Serov M.M. Tungsten-free hard alloys: methods of obtaining, structure and properties (review). *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2021;(11):66-81. (In Russ.)
4. Naumova O.G., Sopin K.V., Yanushkin A.S. Ways of development and problems of creating tungsten-free hard alloys. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov = Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural Sciences and Engineering for the development of regions*. 2005;(2):209-212. (In Russ.)
5. Valentov A.V., Konovodov V.V., Agafonova E.V. Forecasting residual and operating stress in soldering cutting tools with tungsten-free hard alloy inserts. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 379. P. 28-31.
6. Akimov V.V. Investigation of microhardness of tungsten-free hard alloys based on Titanium carbide. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2005;(3-1):121-124. (In Russ.)
7. Vereshchaka A. A., Khozhaev O. Improving the performance characteristics of tools made of tungsten-free hard alloys using nanostructured multilayer composite coatings. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2014;(3):20-25. (In Russ.)
8. Akimov V.V., Mishurov A.F., Akimova E.V. Heat resistance of tungsten-free hard TiC-TiNi alloys depending on the volume composition of the composition when heated to high temperatures. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2016; 59(10):688-691. (In Russ.)
9. Ageev E.V., Ageeva A.E. Composition, structure and properties of hard-alloy powders obtained by electrodispersion of T5K10 alloy in water. *Metallurgist*. 2022;66(1-2):146-154.
10. Ageev E.V., Ageeva E.V., Korolev M.S. Study of the surface state of powders produced under conditions of the electroerosive metallurgy of T5K10 hard-alloy waste. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022;16(6):1333-1336.
11. Burkov P.V. Sintering of TiC-TiNi powders by passing an electric current. *Tyazheloe mashinostroenie = Heavy engineering*. 2008;(12):21-23. (In Russ.)
12. Burkov P.V., Golofinova A.V., Burkova S.P. Investigation of structural heredity during sintering of TiC-TiNi powders by passing an electric current. *Fundamental'nye problemy sovremenno materialovedeniya = Fundamental problems of modern materials science*. 2006;3(4):94-97. (In Russ.)
13. Burkov P.V. Sintering of TiC-TiNi powders by passing electric current. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metalworking (technology, equipment, tools)*. 2005;(3):11-13. (In Russ.)
14. Akimov V.V., Mishurov A.F., Negrov D.A., Sidorova Ya.A., Putintsev V.Yu. Change in microhardness of tungsten-free hard alloys when they are irradiated with a gas-metallic beam of argon and zirconium ions. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya = Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*. 2019;19(4):19-26. (In Russ.)

15. Ageeva E.V., Ageeva A.E., Andreeva L.P. Certification of powder materials obtained by electrodispersion of tungsten-free hard alloy TN20 in alcohol. *Elektrometallurgiya = Electrometallurgy*. 2024;(6):33-40. (In Russ.)
16. Ageev Ye.V., Ageeva E.V., Gvozdev A.E., Protopopov Ye.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 = Chebyshevsky collection*. 2022;23(3):178-193. (In Russ.) <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2022-23-3-178-193>.
17. Ageev Ye.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 = Chebyshevsky collection*. 2022;23(1):183-196. (In Russ.) <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2022-23-1-183-196>.
18. Ageev E.V., Ageeva A.E. Composition, structure and properties of carbide powders obtained by electrodispersing T5K10 alloy in water. *Metallurg = Metallurg*. 2022;(2):39-43. (In Russ.)
19. Ageev E.V., Podanov V.O., Ageeva A.E. Optimization of the manufacturing process of heat-resistant nickel alloy by spark plasma sintering of powders, obtained by electroerosion dispersion of ZHS6U waste 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 = Proceedings of Southwest State University*. 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

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3862-8624, SPIN-код: 7007-6649

Evgeny V. Ageev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3862-8624, SPIN-код: 7007-6649

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

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