

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-71-81>

Морфология, материальный баланс и динамика накопления электроэрозионных никелевых порошков

Д.А. Улитин¹✉

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

✉ e-mail: ulitdmtr@gmail.com

Резюме

Цель. Исследование морфологии, определение материального баланса и динамики накопления электроэрозионных никелевых порошков.

Методы. Для анализа формы и морфологии поверхности частиц никелевых порошков, а также составления материального баланса и динамики их накопления были получены электроэрозионные никелевые порошки методом электроэрозионного диспергирования из отходов никеля марки ПНК-0Т1 в двух различных средах диэлектрика: керосине авиационном и воде дистиллированной. Рабочие значения параметров ЭЭД: напряжение на электродах 115–120 В для керосина и 98–105 В для воды соответственно; емкость конденсаторов 44,0–45,5 мкФ для керосина и 60,0–62,0 мкФ для воды соответственно; частота импульсов 60–65 Гц для керосина и 100–110 Гц для воды соответственно. Микроанализ частиц порошка был проведен с помощью растрового электронного микроскопа QUANTA 600 FEG.

Результаты. Морфологические исследования, направленные на определение формы поверхности частиц ЭЭНП, позволили установить, что частицы характеризуются сферической и реже – эллиптической формой, а также отмечено образование агломератов из частиц наименьшего диаметра. Максимальные потери материала в процессе ЭЭД составляют 0,7% от общей массы. Производительность процесса ЭЭД никелевых отходов составляет 4,3 г/час для воды дистиллированной и 2,3 г/час для керосина авиационного.

Заключение. Полученные результаты исследований могут быть использованы для разработки нового тяжелого псевдосплава с использованием металлоотходов дорогостоящего никелевого сырья методом электроэрозионного диспергирования с последующим совершенствованием и оптимизацией состава и структуры сплава для достижения необходимых характеристик нового тяжелого псевдосплава.

Ключевые слова: никель; металлоотходы; электроэрозионное диспергирование; дистиллированная вода; керосин; порошок; морфология; материальный баланс; динамика.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Улитин Д.А. Морфология, материальный баланс и динамика накопления электроэрозионных никелевых порошков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 71–81. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-71-81>.

Поступила в редакцию 24.01.2025

Подписана в печать 10.02.2025

Опубликована 20.03.2025

Morphology, material balance and dynamics of accumulation of electroerosion Nickel powders

Dmitry A. Ulitin¹✉

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

✉ e-mail: ulitdmtr@gmail.com

Abstract

Purpose. Investigation of morphology, determination of material balance and dynamics of accumulation of electroerosive nickel powders.

Methods. To analyze the shape and morphology of the surface of nickel powder particles, as well as to compile the material balance and dynamics of their accumulation, electroerosion nickel powders were obtained by electroerosion dispersion from PNK-OT1 nickel waste in two different dielectric media: aviation kerosene and distilled water. The operating values of the EED parameters are: voltage at the electrodes 115-120 V for kerosene and 98-105 V for water, respectively; capacitor capacity 44.0–45.5 UF for kerosene and 60.0–62.0 UF for water, respectively; pulse frequency 60-65 Hz for kerosene and 100-110 Hz for water, respectively. Microanalysis of the powder particles was performed using a QUANTA 600 FEG scanning electron microscope.

Results. Morphological studies aimed at determining the shape of the surface of the EENP particles made it possible to establish that the particles are characterized by a spherical and, more rarely, an elliptical shape, and the formation of aggregates from particles of the smallest diameter was also noted. The maximum loss of material in the EED process is 0.7% of the total mass. The efficiency of the nickel waste EED process is 4.3 g/hour for distilled water and 2.3 g/hour for aviation kerosene.

Conclusion. The obtained research results can be used to develop a new heavy pseudo-alloy using metal waste from expensive nickel raw materials by electroerosion dispersion with subsequent improvement and optimization of the alloy composition and structure to achieve the necessary characteristics of a new heavy pseudo-alloy.

Keywords: Nickel; metal waste; electroerosion dispersion; distilled water; kerosene; powder; morphology; material balance; dynamics.

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

For citation: Ulitin D.A. Morphology, material balance and dynamics of accumulation of electroerosion Nickel powders. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(1):71–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-71-81>.

Received 24.01.2025

Accepted 10.02.2025

Published 20.03.2025

Введение

Порошковая металлургия – неотъемлемая отрасль металлургической промышленности в части производства высокотехнологичных и востребованных различными отраслями промышленности изделий технического назначения [1]. Значимая часть изделий аэрокосмической промышленности, медицинского оборудования, атомной энергетики, оборонно-промышленного комплекса изготавливаются именно технологиями порошковой

металлургии [2]. Развитие отрасли порошковой металлургии носит стратегический характер для Российской Федерации [3].

Никель и сплавы с его содержанием в различном соотношении нашли применение в совершенно разных областях промышленности благодаря своим уникальным свойствам [4]. Легирование различных сплавов никелем позволило добиться таких важных свойств материалов, как стойкость к коррозии и высоким температурам, что послужило толчком в развитии техники и оборудования различного

назначения [5]. Никель является неотъемлемой частью современной автомобильной и аэрокосмической промышленности, технологий производства медицинского оборудования, энергетики, деталей электротехнической промышленности [6]. Высокая востребованность и широкая сфера применения никеля, а также относительно высокая стоимость данного металла определяет целесообразность разработки новых технологических решений [7] по рециклингу никельсодержащих металлоотходов с последующим внедрением в промышленном производстве [8].

Электроэрозионное диспергирование – перспективный метод переработки любых токопроводящих материалов, в частности металлов и сплавов, в том числе с содержанием никеля [9]. Данный метод выгодно отличается от промышленных своей низкой операционностью, экологичностью и малотоннажностью [10]. Стоит отметить отсутствие исследований в области переработки никелевых металлоотходов данным методом [11], включающих в себя данные о морфологии и форме получаемых частиц электроэрозионных порошков никеля, материального баланса и динамики их накопления [12].

Способ получения электроэрозионных никелевых порошков (ЭЭНП) методом электроэрозионного диспергирования

(ЭЭД) никелевых металлоотходов в настоящее время не получил промышленного применения, в том числе ввиду отсутствия комплексных исследований, направленных на оценку эффективности процесса ЭЭД и определение свойств порошкового материала [13].

Целью исследования является анализ формы и морфологии поверхности частиц, определение материального баланса и динамики накопления электроэрозионных никелевых порошков, полученных в керосине авиационном ТС-1 и воде дистиллированной.

Материалы и методы

С целью исследования морфологии и формы поверхности ЭЭНП, а также определения динамики прироста массы ЭЭНП и составления материального баланса (МБ) были получены электроэрозионные никелевые порошки на защищенной патентом [14] установке электроэрозионного диспергирования в различных средах диэлектриков, а именно в углеродсодержащей среде керосина авиационного ТС-1 и кислородсодержащей воде дистиллированной. Параметры работы установки при получении электроэрозионных никелевых порошков для каждой среды диэлектрика представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры работы установки электроэрозионного диспергирования

Table 1. Operating parameters of the electroerosion dispersion unit

Параметры работы / Operation parameters	Рабочая среда / Working environment	
	керосин авиационный ТС-1 / aviation kerosene TS-1	вода дистиллированная / distilled water
Рабочее напряжение на электродах, В / Operating voltage at the electrodes, V	115–120	95–105
Емкость разрядных конденсаторов, мкФ / Capacity of discharge capacitors, UF	44,0–45,5	60,0–62,0
Частота следования импульсов, Гц / Pulse repetition rate, Hz	60–65	100–110

Исследование морфологии и формы ЭЭНП проводили с помощью растрового электронно-ионного микроскопа Quanta 600 FEG [15], позволяющего получать высококачественные изображения микроструктуры исследуемого образца с высоким увеличением и разрешением [16]. Составлен материальный баланс, опреде-

лена динамика накопления электроэрозионных никелевых порошков.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования микроскопии полученных частиц ЭЭНП в среде авиационного керосина ТС-1 и дистиллированной воды представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

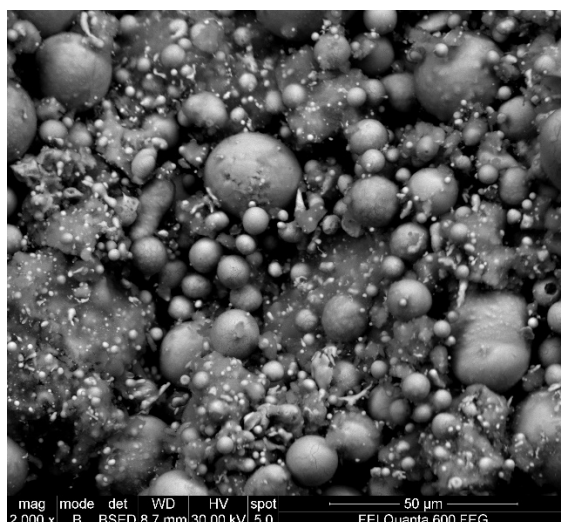


Рис. 1. Микроструктурный анализ электроэрозионного никелевого порошка в среде керосина авиационного

Fig. 1. Microstructural analysis of electroerosive nickel powder in the environment of aviation kerosene

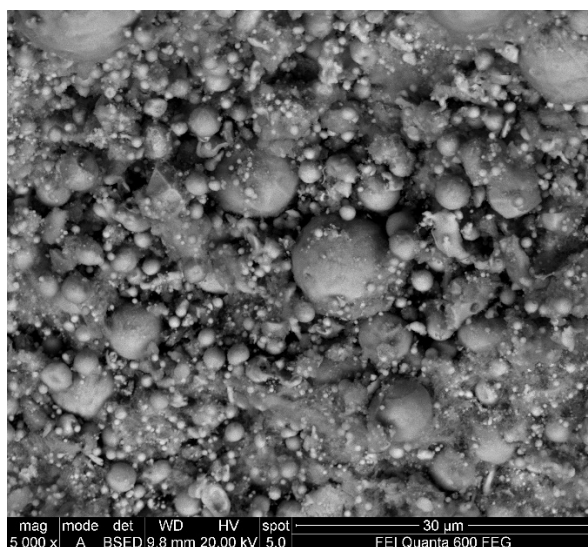


Рис. 2. Микроструктурный анализ электроэрозионного никелевого порошка в среде воды дистиллированной

Fig. 2. Microstructural analysis of electroerosive nickel powder in distilled water medium

Микроструктурный анализ, направленный на определение формы поверхности частиц ЭЭНП, позволил установить, что частицы характеризуются сферической и реже – эллиптической формой, а также отмечено образование агломератов из частиц наименьшего диаметра. Сферические частицы ЭЭНП, как правило, образуются в процессе ЭЭД в результате выброса из канала разряда в рабочую среду диэлектрика (керосина или воды) никеля в жидкой фазе с последующей быстрой кристаллизацией и закалкой. Неправильная форма частиц, меньший размер и образование агломератов объясняются кристаллизацией паровой фазы кипящего металла в среде диэлектрика [17].

С целью оценки эффективности и рентабельности процесса электроэрозионного диспергирования никелевых отходов был составлен материальный баланс, позволяющий определить выход электроэрозионного порошка и установить количество производственных потерь исходного материала [18].

В основе определения материального баланса процесса электроэрозионного диспергирования никелевых металлоотходов лежит закон сохранения массы вещества [1]:

$$\sum m_{\text{исх}} = \sum m_{\text{кон}}, \quad (1)$$

где $\sum m_{\text{исх}}$ – суммарная масса исходных продуктов процесса; $\sum m_{\text{кон}}$ – сумма масс конечных продуктов процесса в тех же единицах измерения.

Составление МБ процесса ЭЭД никелевых отходов сопровождается следующими технологическими операциями: просушивание и взвешивание исходных материалов (металлоотходов никеля и электродов); просушивание и взвешивание конечных материалов (металлоотходов никеля, электродов, полученного электроэрозионного порошка) [19].

Объективная оценка МБ требует проведения трех опытов по получению ЭЭНП при различных режимах работы установки для каждой из двух рабочих жидкостей.

Выбор параметров работы установки, представленных в таблице 2, обусловлен приемлемой стабильностью процесса ЭЭД с целью получения объективных данных по выходу порошковых материалов в единицу времени [20].

В таблице 3 представлены данные материального баланса процесса ЭЭД никелевых металлоотходов.

Таблица 2. Параметры работы установки электроэрозионного диспергирования

Table 2. Operating parameters of the electroerosion dispersion unit

Номер опыта / Experience number	Рабочее напряжение на электродах, В / Operating voltage at the electrodes, V	Емкость разрядных конденсаторов, мкФ / Capacity of discharge capacitors, UF	Частота следования импульсов, Гц / Pulse tracking frequency, Hz
<i>Керосин авиационный ТС-1 / Aviation kerosene TS-1</i>			
1	120	45	60
2	120	62	60
3	120	45	90
<i>Вода дистиллированная / Distilled water</i>			
1	100	62	100
2	100	32	100
3	100	62	50

Таблица 3. Материальный баланс процесса ЭЭД никеля**Table 3.** The material balance of the Nickel EED process

Номер опыта / Experience number	Приход / Coming			Расход / Expenditure		
	наименование / name	<i>m</i> , г / <i>m</i> , g	%	наименование / name	<i>m</i> , г / <i>m</i> , g	%
Керосин авиационный ТС-1 / Aviation kerosene TS-1						
1	Электроды	49,3	7,5	Электроды	40,0	6,1
	Материал	608,0	92,5	Материал	586,9	89,3
				Порошок	29,1	4,4
				Потери	1,3	0,2
	Итого	657,3	100	Итого	657,3	100
2	Электроды	40	6,4	Электроды	32,1	5,1
	Материал	586,9	93,6	Материал	557,2	88,9
				Порошок	33,2	5,3
				Потери	4,4	0,7
	Итого	626,9	100	Итого	626,9	100
3	Электроды	32,1	5,5	Электроды	21,0	3,6
	Материал	557,2	94,5	Материал	524,9	89,0
				Порошок	39,3	6,7
				Потери	4,1	0,7
	Итого	589,3	100	Итого	589,3	100
Вода дистиллированная / Distilled water						
1	Электроды	58,5	8	Электроды	52,6	7,2
	Материал	675,7	92	Материал	635,5	86,6
				Порошок	42,8	5,8
				Потери	3,3	0,4
	Итого	734,2	100	Итого	734,2	100
2	Электроды	52,6	7,6	Электроды	49,4	7,2
	Материал	635,5	92,4	Материал	601,0	87,3
				Порошок	34,1	5,0
				Потери	3,6	0,5
	Итого	688,1	100	Итого	688,1	100
3	Электроды	49,4	7,6	Электроды	45,5	7,0
	Материал	601,0	92,4	Материал	563,2	86,6
				Порошок	38,3	5,9
				Потери	3,4	0,5
	Итого	650,4	100	Итого	650,4	100

Составление материального баланса выявило следующие закономерности:

– массы исходных и конечных продуктов равны;

– физико-химические превращения не оказывают значительного влияния на выход целевого продукта (электроэрозийного порошка) и образование потерь исходного материала;

– процесс получения ЭЭНП в авиационном керосине сопровождается незначительной потерей массы конечного продукта и составляет 0,7% от исходной массы;

– процесс получения ЭЭНП в дистиллированной воде сопровождается незначительной потерей массы конечного продукта и составляет 0,5% от исходной массы.

Динамику прироста массы ЭЭНП в единицу времени, характеризующую производительность и эффективность процесса ЭЭД никелевых металлоотходов, определяли при стабильно и прогнозиру-

емо протекающем процессе. Оптимальные настройки установки соответствуют режимам, представленным в таблице 1.

Процесс определения динамики накопления электроэрозионных порошков заключается в выгрузке электроэрозионных материалов по истечении заданного времени диспергирования с целью определения массы полученного порошка и остаточной массы исходного материала никелевых металлоотходов и электродов.

Результаты определения динамики прироста массы ЭЭНП в единицу времени в процессе ЭЭД металлоотходов никеля представлены на рисунке 3.

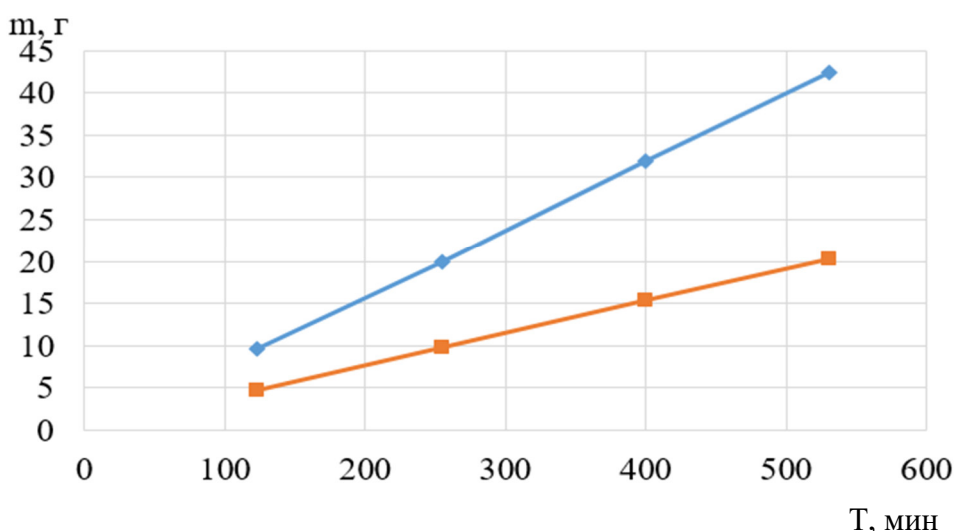


Рис. 3. Динамика прироста массы ЭЭНП: — в воде дистиллированной; — в керосине авиационном

Fig. 3. The dynamics of the increase in the mass of EENP: — in distilled water; — in aviation kerosene

Анализ динамики прироста массы ЭЭНП позволяет сделать вывод, что процесс ЭЭД в воде дистиллированной обладает производительностью 4,3 г/час, что на 87% выше, чем производительность 2,3 г/час в керосине авиационном.

Выводы

1. Исследование морфологии и формы частиц ЭЭНП, определение МБ и динамики прироста массы ЭЭНП, полученных в различных по физико-химическим свойствам рабочих жидкостях (керосине

авиационном ТС-1 и воде дистиллированной), позволяет сделать вывод о рентабельности применения экологичного и эффективного метода электроэрозионного диспергирования никелевых металлоотходов с целью получения пригодных к промышленному применению ЭЭНП.

2. Частицы ЭЭНП обладают правильной сферической и эллиптической формой. В составе электроэрозионных порошков никеля наблюдается незначительное количество агломератов и частиц не-

правильной формы. В процессе составления материального баланса процесса ЭЭД никелевых отходов установлено, что максимальные потери материала составляют 0,7% от суммы масс загрузки отходов и электродов. Определение динамики накопления электроэрозионных никелевых порошков позволило определить выход порошковых материалов в единицу времени, который составляет 4,3 г/час для

воды дистиллированной и 2,3 г/час для керосина авиационного соответственно.

3. Ряд проведенных экспериментальных научных исследований позволяет создать базу комплексных исследований в области получения порошков никеля методом электроэрозионного диспергирования с целью внедрения в промышленное производство данной прогрессивной, безотходной и экологичной технологии ЭЭД.

Список литературы

1. Вальтер А.И., Кожевников Л.С. Сравнение структуры и механических свойств вольфрамового тяжелого сплава ВНЖ95 при твердофазном и жидкофазном спекании // Эпоха науки. 2024. № 37. С. 27–30. EDN VSPMHY.
2. Псевдосплавы на основе вольфрама для защиты от ионизирующего излучения, полученные с использованием механоактивированных прекурсоров / Т.Ф. Григорьева, Л.Н. Дьячкова, А.Ф. Ильющенко, В.А. Осипов, С.В. Восмерилов, Е.Т. Девяткина // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сборник статей Международной научно-технической конференции. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2024. С. 6–12. EDN XYKGBK.
3. Электрохимическая переработка тяжелого сплава W-Ni-Fe постоянным и переменным током в аммиачно-щелочных растворах / О.Г. Кузнецова, А.М. Левин, М.А. Севостьянов, О.И. Цыбин, А.О. Больших // Металлы. 2021. № 3. С. 21–29. EDN SAKYIJ.
4. Кузнецова, О.Г., Левин А.М., Севостьянов М.А. Получение микродисперсного железоникелевого порошка в процессе электрохимической переработки тяжелых вольфрамовых сплавов типа ВНЖ // Труды Кольского научного центра РАН. 2021. Т. 12, № 2(5). С. 148–153. <http://doi.org/10.37614/2307-5252.2021.2.5.030>. EDN JXRCTM.
5. Савич В.В. Псевдосплавы: преимущества перед традиционными материалами // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции. Минск: Белорусский нац. техн. ун-т, 2022. С. 328–331. EDN CFUIGP.
6. Структура, фазовый состав и триботехнические свойства псевдосплавов различных составов, напыленных методом высокоскоростной металлизации / В.А. Кукареко, Е.В. Астрашаб, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, А.В. Сосновский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2019. С. 51–58. EDN PXBXUZ.
7. Кубанова А.Н., Гвоздев А.Е. История развития порошковой металлургии и ее применение в современных технологиях // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22, № 2 (78). С. 437–448. EDN RLPLOH.
8. 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. Т. 19, № 4(220). С. 170–174. <http://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-4-170-174>. EDN ZHOTUI.
9. Исследование порошковых материалов псевдосплава W-CU / М.Г. Криницын, А.С. Первилов, Н.Е. Торопков, М.И. Лернер // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2021: материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием. Томск: Нац. исслед. Том. гос. ун-т, 2022. С. 373–377. EDN QLPREX.

10. Бреки А.Д., Толочко О.В., Стариков Н.Е. Оценка влияния жидкого смазочного композиционного материала с наночастицами геомодификатора на трение в подшипниковом узле // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 3(16). С. 17–23. EDN UZCDRR.
11. W-Cu composites with submicron-and nanostructures: progress and challenges / C. Hou, Xiaoyan Song, Fawei Tang, Yurong Li, Lijun Cao, Jie Wang [et al.] // NPG Asia Materials. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 1–20. EDN QXPMTE.
12. Металлография металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровыми способами / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, Е.В. Агеев, Д.Н. Романенко. М.: Инфра-М, 2011. 468 с. EDN SDQRQT.
13. Структура и свойства порошков, полученных электродиспергированием чистых никелевых металлоотходов в дистиллированной воде / Е.В. Агеева, О.Г. Локтионова, Д.А. Улитин, А.Е. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 8–18. <http://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-8-18>. EDN EIEGZE.
14. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов: патент 2449859 Российская Федерация / Агеев Е.В., Латыпов Р.А. и [др.]. № 2010104316/02; заявл. 08.02.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13. 10 с.
15. Кузнецова О.Г., Левин А.М., Севостьянов М.А. Модернизация электрохимической переработки тяжелых вольфрамовых сплавов с помощью переменного тока // Новые материалы и перспективные технологии. Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием. М.: Центр научно-технических решений, 2020. С. 433–437. EDN CHJJXP.
16. Агеева А. Е., Новиков Е. П. Размерный анализ частиц порошка электрокорунда, полученного электродиспергированием отходов алюминия марки АД0Е // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 4(43). С. 12–21. EDN VKZOYY.
17. Рентгеноспектральный микроанализ нихромового порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в среде керосина / Е. В. Агеев, А. А. Горохов, А. Ю. Алтухов, А.В. Щербаков, С.В. Хардинов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1(64). С. 26-31. EDN VXDVNX.
18. Плесовских А.Ю., Крылова С.Е. Исследование структуры и свойств износостойкого газотермического покрытия с содержанием вольфрама // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 2. С. 89–101. EDN UQIPRW.
19. Аболмасова Л. С., Агеев Е.В. Материальный баланс процесса электроэрозионного диспергирования отходов твердых сплавов латуни марки ЛС58-3 в воде дистиллированной // Инновационные идеи в машиностроении: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 538–542. EDN XFUDRK.
20. Жиров Д.К. Исследование влияния времени механоактивации в центробежной мельнице на характеристики порошков оксида никеля // Химическая физика и мезоскопия. 2021. Т. 23, № 3. С. 346–352. <http://doi.org/10.15350/17270529.2021.3.31>. EDN RAMIEB.

Reference

1. Walter A.I., Kozhevnikov L.S. Comparison of the structure and mechanical properties of tungsten heavy alloy VNJ 95 in solid-phase and liquid-phase sintering. *Epokha nauki = The age of science*. 2024;37:27-30. (In Russ.) EDN VSPMHY.
2. Grigorieva T.F., Dyachkova L.N., Ilyushchenko A.F., Osipov V.A., Voronikov S.V., Devyatkina E.T. Tungsten-based pseudoalloys for protection from ionizing radiation obtained using mechanoactivated precursors. In: *Tekhnologicheskoe obespechenie mashinostroitel'nykh proizvodstv*:

sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Technological support of machine-building products: collection of articles of the International scientific and technical conference. Mogilev: Belorussko-Rossiiskii un-t; 2024. P. 6-12. (In Russ.) EDN XYKGBK.

3. Kuznetsova O.G., Levin A.M., Sevostyanov M.A., Tsybin O.I., Bolshykh A.O. Electrochemical processing of a heavy W-Ni-Fe alloy by direct and alternating current in ammonia-alkaline solutions. *Metally = Metals*. 2021;(3):21-29. (In Russ.) EDN SAKYIJ.

4. Kuznetsova O.G., Levin A.M., Sevostyanov M. A. Obtaining a microdispersed iron-nickel powder in the process of electrochemical processing of heavy tungsten alloys of the type of residence permit. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021;12(2):148-153. <http://doi.org/10.37614/2307-5252.2021.2.5.030>. (In Russ.) EDN JXRCTM.

5. Savich V.V. Pseudo-alloys: advantages over traditional materials. In: *Priborostroenie-2022: materialy 15-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Instrumentation-2022. Materials of the 15th International scientific and technical conference*. Minsk: Belorusskii nats. tekhn. un-t; 2022. P. 328-331. (In Russ.) EDN CFUIGP.

6. Kukareko V.A., Astrashab E.V., Belotserkovsky M.A., Grigorchik A.N., Sosnovsky A.V. Structure, phase composition and tribotechnical properties of psev-alloys of various compositions sprayed by the method of high-speed metallization. In: *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sbornik nauchnykh trudov = Modern methods and technologies of creation and processing of materials: collection of scientific papers*. Minsk: FTI NAN Belarusi, 2019. P. 51-58. (In Russ.) EDN PXBXUZ.

7. Kubanova A.N., Gvozdev A.E. The history of the development of powder metallurgy and its application in modern technologies. *Chebyshevskii sbornik = Chebyshevsky collection*. 2021; 22(2):437-448. (In Russ.) EDN RLPLOH.

8. 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;19(4):170-174. <http://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-4-170-174>. (In Russ.) EDN ZHOTUI.

9. Krinitsyn M.G., Permyakov A.S., Toropov N.E., Lerner M.I. Investigation of powder materials of pseudo-alloy W-CU. In: *Aktual'nye problemy sovremennoi mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoi mekhaniki – 2021: materialy XI Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Actual problems of modern continuum mechanics and celestial mechanics – 2021: materials of the XI All-Russian scientific conference with international participation*. Tomsk: Nats. issled. Tom. gos. un-t; 2022. P. 373-377. (In Russ.) EDN QLPREX.

10. Breki A.D., Tolochko O. V., Starikov N. E. Assessment of the effect of a liquid lubricating composite material with geomodifier nanoparticles on friction in a bearing assembly. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2015;(3):17-23. (In Russ.) EDN UZCDRR.

11. Hou C., Xiaoyan Song, Fawei Tang, Yurong Li, Lijun Cao, Jie Wang, et al. W-Cu composites with submicron- and nanostructures: progress and challenges. *NPG Asia Materials*. 2019;11(1):1-20. EDN QXPMTE.

12. Gadlov V.N., Salnikov V.G., Ageev E.V., Romanenko D.N. Metallography of metals, powder materials and coatings obtained by electric spark methods. Moscow: Infra-M, 2011. 468 p. (In Russ.) EDN SDQRQT.

13. Ageeva E.V., Loktionova O.G., Ulitin D.A., Ageeva A.E. Structure and properties of powders obtained by electrodispersion of pure nickel metal waste in distilled water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State*

University. Series: Engineering and Technology. 2024;14(3):8-18. <http://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-8-18>. (In Russ.) EDN EIEGZE.

14. Ageev E.V., Latypov R.A., et al. Installation for the production of nanodisperse powders from conductive materials. Russian Federation patent 2449859. 10 May 2012.

15. Kuznetsova O.G., Levin A.M., Sevostyanov M.A. Modernization of electrochemical processing of heavy tungsten alloys using alternating current. In: *Novye materialy i perspektivnye tekhnologii. Shestoi mezhdistsiplinarnyi nauchnyi forum s mezhdunarodnym uchastiem = New materials and promising technologies. The sixth interdisciplinary scientific forum with international participation*. Moscow: Tsentr nauchno-tekhnicheskikh reshenii; 2020. P. 433-437. (In Russ.) EDN CHJJXP.

16. Ageeva A. E., Novikov E. P. Dimensional analysis of particles of electrocorundum powder obtained by electrodispersing aluminum WASTE of the AD0E brand. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, machinery and technologies*. 2022;(4):12-21. (In Russ.) EDN VKZOYY.

17. Ageev E.V., Gorokhov A.A., Altukhov A.Yu., Shcherbakov A.V., Khardikov S.V. X-ray spectral microanalysis of nichrome powder obtained by electroerosion dispersion in kerosene medium. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2016;1(64):26-31. (In Russ.) EDN VXDVNX.

18. Plesovskikh A.Yu., Krylova S.E. Investigation of the structure and properties of a wear-resistant thermal gas coating with a tungsten content. *Frontier. Materials & Technologies = Frontier Materials & Technologies*. 2023;(2):89-101. (In Russ.) EDN UQIPRW.

19. Abolmasova L.S., Ageev E.V. The material balance of the process of electroerosion dispersion of waste of LS58-3 grade brass alloys in distilled water. In: *Innovatsionnye idei v mashinostroenii: sbornik nauchnykh trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh = Innovative ideas in mechanical engineering: collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists*. St. Petersburg: Polytech press; 2022. P. 538-542. (In Russ.) EDN XFUDRK.

20. Zhirov D. K. Investigation of the effect of mechanical activation time in a centrifugal mill on the characteristics of nickel oxide powders. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya = Chemical Physics and mesoscopy*. 2021;23(3):346-352. <http://doi.org/10.15350/17270529.2021.3.31>. (In Russ.) EDN RAMIEB.

Информация об авторе / Information about the Author

Улитин Дмитрий Алексеевич, аспирант
кафедры технологии материалов и транспорта,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ulitdmtr@gmail.com,
ORCID: 0009-0000-0444-298X,
SPIN-код: 6575-1033

Dmitry A. Ulitin, Post-Graduate Student of the
Department of Technology of Materials and
Transport, Southwest State University, Kursk,
Russian Federation, Kursk, Russian Federation,
e-mail: ulitdmtr@gmail.com,
ORCID: 0009-0000-0444-298X,
SPIN-код: 6575-1033