

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-8-18>



Структура и свойства порошков, полученных электродиспергированием чистых никелевых металлоотходов в дистиллированной воде

Е. В. Агеева¹ ✉, О. Г. Локтионова¹, Д. А. Улитин¹, 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

Цель. Исследование состава, структуры и свойств порошковых материалов, полученных электродиспергированием отходов никеля марки ПНК-0Т1 в кислородсодержащей среде – дистиллированной воде.

Методы. Для определения состава, структуры и свойств порошковых материалов были исследованы образцы порошков, полученных из отходов никеля марки ПНК-0Т1. Порошковый материал был получен электроэрозионным диспергированием в воде дистиллированной. Микроанализ частиц порошка был проведен с помощью растрового электронного микроскопа. Анализ распределения по размерам частиц порошка получен с помощью анализатора размеров частиц. Рентгеноспектральный микроанализ частиц порошка проведен с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения, встроенного в растровый электронный микроскоп. Анализ фазового состава частиц порошка проведен с помощью рентгеновской дифракции на дифрактометре.

Результаты. В ходе исследования было выявлено, что форма частиц полученных никелевых порошков сферическая и эллиптическая, также на увеличении отмечены агломераты частиц более мелкого размера. В составе порошковых материалов присутствует кислород и никель. В фазовом составе отмечены фазы чистого никеля и оксида никеля NiO. Из анализа гранулометрической гистограммы следует, что разброс частиц по размерам варьируется в интервале 0,26–18,62 мкм, средний объемный диаметр частиц составил 5,2 мкм.

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

Ключевые слова: никель; металлоотходы; электроэрозионное диспергирование; дистиллированная вода; порошок; структура; свойства.

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

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-8-18>

Поступила в редакцию 23.08.2024

Подписана в печать 01.08.2024

Опубликована 24.09.2024

Structure and properties of powders obtained by electrodispersion of pure Nickel metal waste in distilled water

Ekaterina V. Ageeva¹ ✉, Oksana G. Loktionova¹, Dmitry A. Ulitin¹,
Anna E. Ageeva¹

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose. Investigation of the composition, structure and properties of powder materials obtained by electrodispersion of nickel waste of the PNK-OT1 brand in an oxygen-containing medium – distilled water.

Methods. To determine the composition, structure and properties of powder materials, samples of powders obtained from waste nickel grade PNK-OT1 were studied. The powder material was obtained by electroerosive dispersion in distilled water. Microanalysis of powder particles was carried out using a scanning electron microscope, an analysis of the size distribution of powder particles was obtained using a particle size analyzer, an X-ray spectral microanalysis of powder particles was carried out using an energy-dispersive X-ray analyzer embedded in a scanning electron microscope, an analysis of the phase composition of powder particles was carried out using X-ray diffraction on the diffractometer.

Results. During the study, it was revealed that the shape of the particles obtained from nickel powders is spherical and elliptical, and agglomerates of smaller particles are also noted on the increase. Oxygen and nickel are present in the composition of powder materials. The phases of pure nickel and nickel oxide NiO are marked in the phase composition. From the analysis of the granulometric histogram, it follows that the particle size spread varies in the range of 0.26...18.62 microns, the average volume diameter of the particles was 5.2 microns.

Conclusion. The obtained research results can be used to develop a new heavy pseudo-alloy using metal waste from expensive raw materials by the method of electroerosive dispersion, followed by improvement and optimization of the composition and structure of the alloy.

Keywords: nickel; metal waste; electroerosive dispersion; distilled water; powder; structure; properties.

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

For citation: 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 Technologies*. 2024;14(3):8–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-8-18>

Received 23.08.2024

Accepted 01.08.2024

Published 24.09.2024

Введение

Одной из динамично развивающихся отраслей металлургической промышленности, напрямую оказывающей влияние на большинство изделий технического назначения, является отрасль порошковой

металлургии [1]. На сегодняшний день развитие данной отрасли представляет собой стратегически важную задачу для обеспечения импортозамещения и технологического суверенитета Российской Фе-

дерации. Количество изделий, производимых сегодня методами порошковой металлургии, а в частности это изделия сложной для изготовления формы [2], такие как шестерни, подшипники и др., превышает количество изделий, производимых иными способами формообразования [3].

Никель – один из важнейших металлов, используемых в промышленности. Повсеместное использование никеля в качестве основы, а также легирующей добавки позволило создать уникальные сплавы, что дало толчок развитию промышленности и техники [4]. Именно благодаря содержанию в сплавах никеля стало возможно получение нержавеющей и жаростойких изделий [5]. На данный момент сферы применения никеля в промышленности очень разнообразны: автомобильная и аэрокосмическая промышленность, медицина, энергетика, детали электротехнической промышленности [6]. Значительное количество областей применения данных материалов ставит перед исследователями задачу сохранения и ресурсосбережения никельсодержащих металлоотходов [7], а относительно высокая температура плавления требует разработки и использования новых технологий и методов, способных с минимальными затратами электроэнергии и низкой операционностью получать пригодные к промышленному использованию материалы [8].

Перспективным методом порошковой металлургии, способным обеспечить оптимальное сочетание технологии переработки порошковых материалов из металлоотходов любых токопроводящих составляющих [9], в частности из металлоотходов дорогостоящего никеля, является метод электроэрозионного диспергирования [10]. Однако использование данной технологии сдерживается отсутствием фундаментальных исследований в области переработки чистого никеля электрической эрозией [11] и научно-технической

литературы по анализу состава, структуры и свойств получаемых в ходе диспергирования никелевых порошковых материалов [12].

Для разработки технологий переработки электроэрозионных порошков и оценки эффективности их использования требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований [13].

Целью исследования является определение состава, структуры и свойств порошковых материалов, полученных электродиспергированием отходов никеля в дистиллированной воде.

Материалы и методы

Для выполнения исследований состава, структуры и свойств порошковых материалов, полученных электродиспергированием отходов никеля в дистиллированной воде, использовались порошковые материалы, полученные на уникальной запатентованной установке [14] при следующих параметрах работы установки:

- напряжение на электродах 95...105 В;
- частота следования импульсов 100...110 Гц;
- ёмкость разрядных конденсаторов 60,0...62,0 мкФ;
- расстояние между электродами 100 мм.

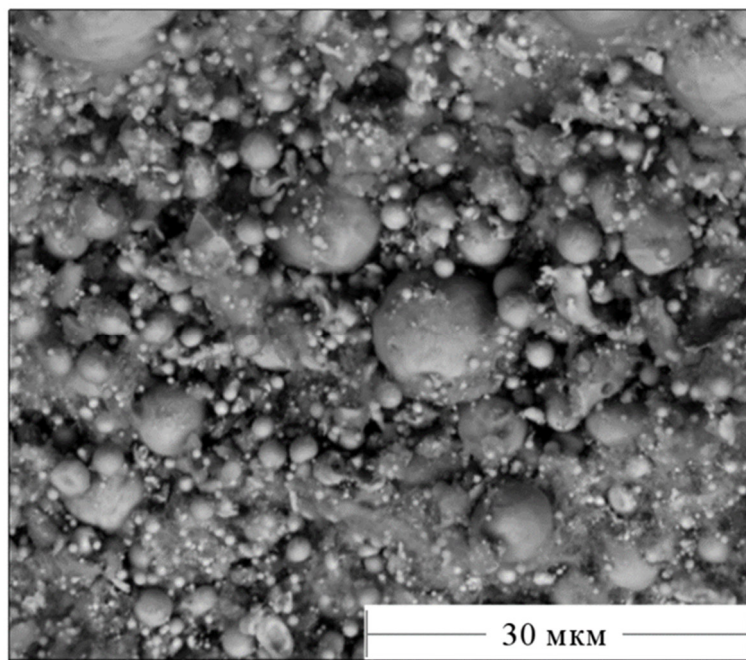
Полученные электроэрозионные частицы исследовали на электронно-ионно-сканирующем микроскопе Quanta 600 FEG [15]. На микроскопе получены увеличенные изображения металлических частиц, исследована их форма [16]. С помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп Quanta 600 FEG, были получены спектры рентгеновского излучения в различных точках на поверхности исследуемого материала [17].

С помощью лазерного анализатора размеров частиц Analysette 22 NanoTec plus исследован гранулометрический состав никелевых порошковых материалов [18].

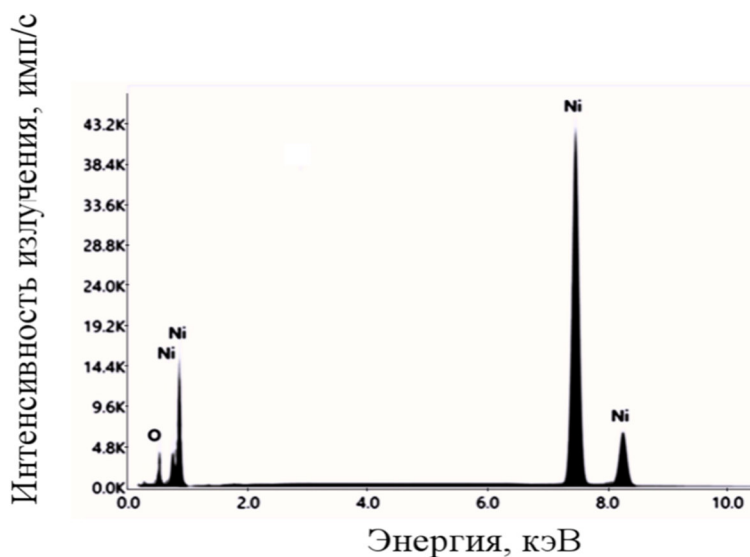
Рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV использовался для определения фазового состава полученных никелевых порошковых материалов [19].

Результаты и их обсуждение

Обобщенные данные по результатам исследования микроструктуры и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) электроэрозионных никелевых порошков, полученных в дистиллированной воде, представлены на рисунке 1.



а



б

Рис. 1. Электроэрозионный никелевый порошок: а – микроструктурный анализ; б – рентгенограмма

Fig. 1. Electroerosive nickel powder: a – microstructural analysis; б – X-ray

Из анализа микроструктуры следует, что полученный порошок состоит из частиц правильной сферической, эллиптической формы и агломератов.

Исследование элементного состава по всей области образца демонстрирует в составе порошка два элемента, причем мас-

совая доля содержания вольфрама 86,4%, а кислорода 13,6%.

Результаты исследования рентгеноструктурного (фазового) состава полученных порошков представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

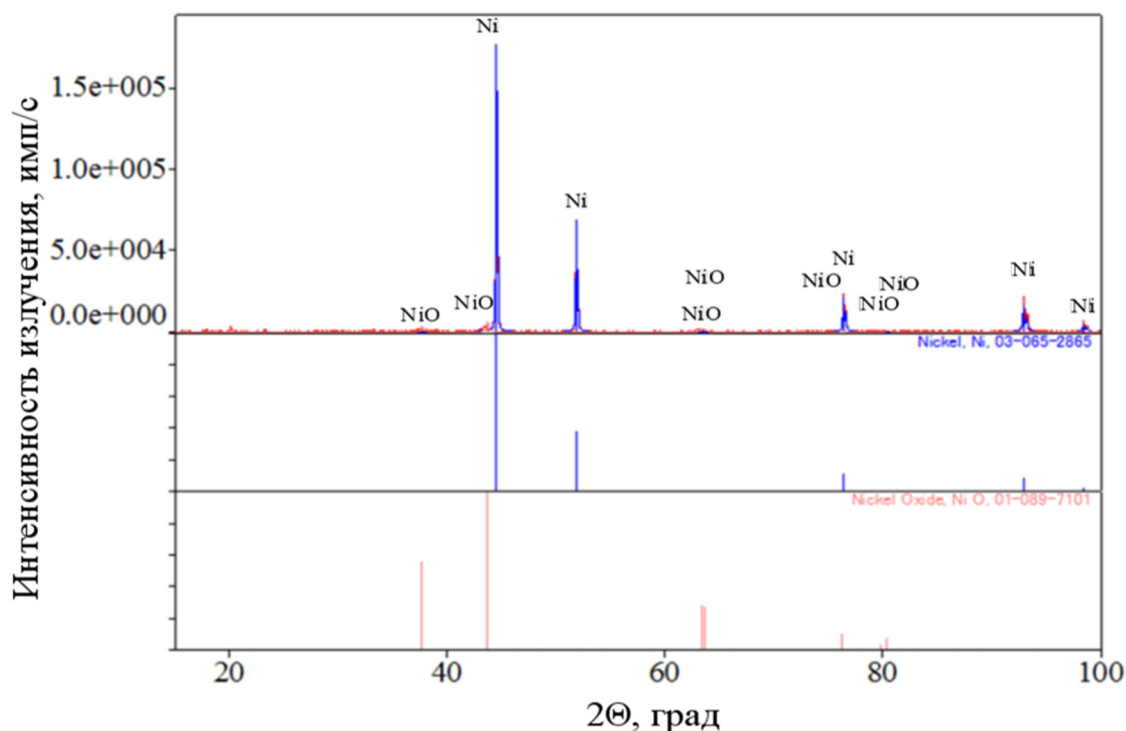


Рис. 2. Дифрактограмма никелевого порошка

Fig. 2. Diffractogram of nickel powder

Таблица 1. Результаты исследования фазового состава никелевого порошка

Table 1. The results of the study of the phase composition of nickel powder

Параметр	Наименование фазы	
	Никель	Оксид никеля
Тип кристаллической решетки	Кубическая кристаллическая решётка	Гексагональная кристаллическая решетка
Параметры кристаллической решетки, Å	$a = b = c = 3,524122$	$a = b = 5,843268, c = 7,206090$

Экспериментально установлено, что электроэрозионные никелевые порошки, полученные в дистиллированной воде, имеют в своем составе фазы чистого никеля и соединений с кислородом оксида никеля NiO. Благодаря своим уникальным свойствам оксид никеля нашел широкое

применение в различных областях промышленности: производство ферритов, используемых в электронике и радиотехнике, изготовление никелевых катализаторов, применение в топливных элементах, использование в качестве пигмента для окрашивания стекла и керамики, при-

менение в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Также оксид никеля в смеси с азидом алюминия используется в качестве пиротехнического состава для надувных подушек безопасности в автомобилях [20].

Результаты исследования гранулометрического состава полученных порошковых материалов приведены на рисунке 3 и в таблице 2.

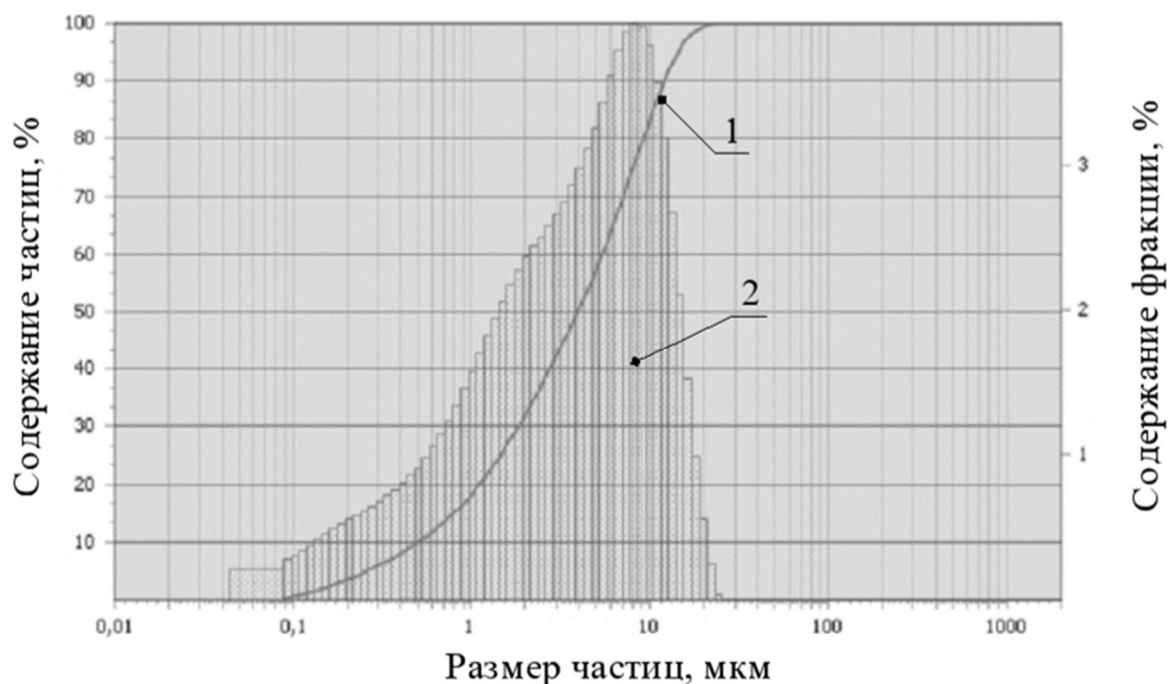


Рис. 3. Гранулометрический анализ никелевого порошка: 1 – гистограмма распределения; 2 – интегральная кривая

Fig. 3. Granulometric analysis of nickel powder: 1 – histogram of distribution; 2 – integral curve

Таблица 2. Распределение частиц порошка по размерам

Table 2. Distribution of powder particles by size

Содержание частиц, %	Средний размер частиц, мкм
D5	0,26
D10	0,50
D25	1,45
D50	3,95
D75	8,06
D90	12,00
D95	14,35
D99	18,62
Объемный средний диаметр	5,20
Модальный диаметр	8,48
Размах (d90-d10)/d50	2,91

В таблице 2 собраны размерные характеристики, выявленные в результате анализа результатов гранулометрического исследования.

Значение параметра D50 равно 5,20 мкм указывает на то, что частиц размером меньше или равно 5,20 мкм в порошке содержится 50,0% от общего объема.

В результате исследования гранулометрического состава порошков было установлено, что объемный средний диаметр частиц составляет 5,20 мкм.

Выводы

1. На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на исследование структуры и свойств электроэрозионных никелевых порошков, полученных в дистиллированной воде, показана высокая эффективность применения технологии электродиспергирования, которая обеспечивает при низких затратах электроэнергии получение пригодных к

промышленному применению новых порошковых материалов.

2. Выявлено, что форма частиц полученных никелевых порошков сферическая и эллиптическая, также на увеличении отмечены агломераты частиц более мелкого размера. В составе порошковых материалов присутствует кислород и никель. В фазовом составе отмечены фазы чистого никеля и оксида никеля NiO. Из анализа гранулометрической гистограммы следует, что разброс частиц по размерам варьируется в интервале 0,26...18,62 мкм, средний объемный диаметр частиц составил 5,2 мкм.

3. Проведенные исследования позволяют осуществить постепенный переход к передовым производственным технологиям и материалам посредством применения прогрессивной, экологически чистой, малотоннажной и безотходной технологии электроэрозионного диспергирования при получении новых порошковых материалов из никеля.

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. Восмериков, 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. Химия и материаловедение. Вып. 5. 2021. Т. 12, № 2. С. 148–153. <https://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. технический ун-т, 2022. С. 328–331. EDN CFUIGP

6. Агеева А. Е., Локтионова О. Г., Улитин Д. А. Рентгенофлуоресцентный анализ элементного состава металлоотходов вольфрама, никеля и меди // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 4. С. 20–31. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-20-31>, EDN TADUVD

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 RLPLON

8. Шишулин А. В., Шишулина А. В. Равновесный фазовый состав и взаимная растворимость компонентов в наночастицах фрактальной формы тяжелого псевдосплава W-CR // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2019. № 11. С. 380–388. EDN DGJHTM

9. Исследование порошковых материалов псевдосплава W-CU / М. Г. Криницын, А. С. Первилов, Н. Е. Торопов, М. И. Лернер // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2021: материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием / под ред. М. Ю. Орлова. Томск: Томский гос. ун-т, 2022. С. 373–377. EDN QLPREX

10. Получение износостойких порошков из отходов твердых сплавов / Е. В. Агеев, В. Н. Гадалов, Б. А. Семенихин, Е. В. Агеева, Р. А. Латыпова // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 12. С. 39–44. EDN NBXQRT

11. Получение и исследование порошков из отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов электроэрозионным диспергированием / Е. В. Агеев, Р. А. Латыпов, Е. В. Агеева, А. А. Давыдов. Курск: ИП Горохов Александр Анатольевич, 2013. 200 с. EDN RZROAL

12. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Р. А. Латыпов, Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, Е. П. Новиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 4. С. 19–22. EDN VSKPXR

13. Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Агеев Е. В. Получение и исследование композиционных медных гальванических покрытий, модифицированных медными электроэрозионными порошками микро- и нанопорошков. Курск: Университетская книга, 2016. 131 с. EDN VJFDSX

14. Electroerosion micro- and nanopowders for the production of hard alloys / R. A. Latypov, G. R. Latypova, E. V. Ageeva, O. V. Kruglyakov // Russian Metallurgy (Metally). 2016. Vol. 2016, no. 6. P. 547–549. <https://doi.org/10.1134/S0036029516060082>, EDN XFGHZN

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. Фетисов Г. В. Рентгеновские дифракционные методы структурной диагностики материалов: прогресс и достижения // Успехи физических наук. 2020. Т. 190, № 1. С. 2–36. EDN RJBIAU

17. Структурно-фазовое состояние теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного плазменной наплавкой в среде азота и высокотемпературным отпуском / Н. Н. Малущин, Д. А. Романов, А. П. Ковалев, В. Л. Осетковский, Л. П. Баченко // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 10 (742). С. 106–111. EDN OASPRJ

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. Влияние никеля на состав, структуру и свойства покрытий Ti-Cr-N / А. В. Черногор, И. В. Блинков, Д. С. Белов, В. С. Сергеев, А. П. Демиров // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2023. Т. 17, № 1. С. 63–74. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-1-63-74>, EDN PWHHPO

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. <https://doi.org/10.15350/17270529.2021.3.31>, EDN RAMIEB

References

1. Walter A.I., Kozhevnikov L.S. Comparison of the structure and mechanical properties of tungsten heavy alloy VNZH95 in solid-phase and liquid-phase sintering. *Epoha 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., Vosmerikov S.V., Devyatkina E.T. Tungsten-based pseudoalloys for protection from ionizing radiation obtained using mechanoactivated precursors. In: *Tekhnologicheskoe obespechenie mashinostroitel'nyh proizvodstv: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii = Technological support of machine-building products: collection of articles of the International Scientific and Technical Conference*. Mogilev: Belorussko-Rossiiskij 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. Khimiya i metallovedenie. Vypusk 5 = Transactions Kola Science Center. Chemistry and Materials. Series 5*. 2021;12(2):148–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/2307-5252.2021.2.5.030>, EDN JXRCTM

5. Savich V.V. Pseudo-alloys: advantages over traditional materials. *Priborostroenie – 2022: materialy 15-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii = Instrumentation – 2022: materials of the 15th International Scientific and Technical Conference*. Minsk: Belorus. nats. techn. un-t, 2022. P. 328–331. (In Russ.) EDN CFUIGP

6. Ageeva A.E., Loktionova O.G., Ulitin D.A. X-Ray fluorescence analysis of the elemental composition of metal waste of tungsten, Nickel and Copper. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023;13(4):20–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-20-31>, EDN TADUVD

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

8. Shishulin A.V., Shishulina A.V. Equilibrium phase composition and mutual solubility of components in fractal-shaped nanoparticles of a heavy pseudo-alloy W-CR. *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov = Physico-chemical aspects of studying clusters, nanostructures and nanomaterials*. 2019;(11):380–388. (In Russ.) EDN DGJHTM

9. Krinitsyn M.G., Pervikov A.S., Toropkov N.E., Lerner M.I. Investigation of powder materials of pseudo-alloy W-CU. In: Orlov M.Y. (ed.). *Aktual'nye problemy sovremennoj mekhaniki sploshnyh sred i nebesnoj mekhaniki – 2021: materialy XI Vserossiiskoj nauchnoj konferencii 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: Tomskii gos. un-t; 2022. P. 373–377. EDN QLPREX

10. Ageev E.V., Gadalog V.N., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypova R.A. Obtaining wear-resistant powders from solid alloy waste. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Procurement production in mechanical engineering*. 2010;(12);39–44. (In Russ.) EDN NBXQRT

11. Ageev E.V., Latypov R.A., Ageeva E.V., Davydov A.A. Preparation and research of powders from waste of tungsten-containing hard alloys by electroerosive dispersion. Kursk: IP Gorokhov Alexander Anatolyevich; 2013. 200 p. (In Russ.) EDN RZROAL

12. Latypov R.A., Ageev E.V., Ageeva E.V., Novikov E.P. Investigation of aluminum powder obtained by electroerosion dispersion in distilled water. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials. Encyclopedic reference book*. 2016;(4):19–22. (In Russ.) EDN VSKPXR

13. Ageeva E.V., Khoryakova N.M., Ageev E.V. Preparation and research of composite copper electroplating coatings modified with copper electroerosion powders of micro- and nanofractions. Kursk: Universitetskaya kniga; 2016. 131 p. (In Russ.) EDN VJFDSX

14. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageeva E.V., Kruglyakov O.V. Electroerosive micro- and nanopowders for the production of hard alloys. *Russian Metallurgy*. 2016;(6);547–549. <http://doi.org/10.1134/S0036029516060082>, EDN XFGHZN

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. Shestoj mezhdisciplinarnyj nauchnyj forum s mezhdunarodnym uchastiem = New materials and promising technologies. The sixth interdisciplinary scientific forum with international participation*. Moscow: Tsentr nauchno-technicheskikh reshenii; 2020. P. 433–437. (In Russ.) EDN CHJJXP

16. Fetisov G.V. X-Ray diffraction methods of structural diagnostics of materials: progress and achievements. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*. 2020;190(1):2–36. (In Russ.) EDN RJBIA Y

17. Malushin N.N., Romanov D.A., Kovalev A.P., Osetkovsky V.L., Bashchenko L.P. Structural and phase state of a heat-resistant alloy of high hardness formed by plasma surfacing in a nitrogen medium and high-temperature tempering. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2019;62(10):106–111. (In Russ.) EDN OASPR

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

19. Chernogor A.V., Blinkov I.V., Belov D.S., Sergevnin V.S., Demirov A.P. The influence of Nickel on the structure, structure and properties of hidden Ti-Cr-N. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(1):63–74. (In Russ.) <http://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-1-63-74>, EDN PWHHP O

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 Mesoscopics*. 2021;23(3):346–352. (In Russ.) <http://doi.org/10.15350/17270529.2021.3.31>, EDN RAMIEB

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: 0000-0001-8457-6565, SPIN-код: 2561-0708

Локтионова Оксана Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: log7.9@mail.ru

Улитин Дмитрий Алексеевич, аспирант кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ulitdmitr@gmail.com, SPIN-код: 6575-1033

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

Ekaterina V. Ageeva, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Materials and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8457-6565, SPIN-код: 2561-0708

Oksana G. Loktionova, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: log7.9@mail.ru

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

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