

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-22-32>

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

Е. В. Агеева¹✉, Д. А. Улитин¹, М. С. Королев¹, 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 вольфрама марки ВА в кислородсодержащей среде – дистиллированной воде.

Методы. Для определения состава, структуры и свойств порошковых материалов были исследованы образцы порошков, полученных из отходов вольфрама марки ВА. 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 порошковых вольфрамовых материалов сферическая и эллиптическая, также на увеличении отмечены агломераты частиц более мелкого размера. В составе порошковых материалов присутствует кислород и вольфрам, при этом совместных структурных составляющих не отмечено. В фазовом составе отмечены фазы чистого вольфрама в α - и β -модификациях. Из анализа гранулометрической гистограммы следует, что разброс частиц по размерам варьируется в интервале 0,092–62,59 мкм, средний же диаметр частиц составил 5,73 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: вольфрам; 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 вольфрамовых металлоотходов в дистиллированной воде / Е. В. Агеева, Д. А. Улитин, М. С. Королев, А. Е. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 2. С. 22–32. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-22-32>

Поступила в редакцию 10.04.2024

Подписана в печать 18.05.2024

Опубликована 17.06.2024

© Агеева Е. В., Улитин Д. А., Королев М. С., Агеева А. Е., 2024

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

Ekaterina V. Ageeva¹ ✉, Dmitry A. Ulitin¹, Mikhail S. Korolev¹, Anna E. Ageeva¹

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose. Investigation of the composition, structure and properties of powder materials obtained by electrodispersion of tungsten waste of the VA 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 tungsten of the VA brand 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, analysis of the size distribution of powder particles was obtained using a particle size analyzer, X-ray spectral microanalysis of powder particles was carried out using an energy dispersive X-ray analyzer integrated into a scanning electron microscope, analysis of the phase composition of powder particles was carried out using X-ray diffraction on a diffractometer.

Results. During the study, it was revealed that the shape of the particles obtained from powdered tungsten materials is spherical and elliptical, and agglomerates of smaller particles are also marked on magnification. Oxygen and tungsten are present in the composition of powder materials, while there are no joint structural components. The phases of pure tungsten in α and β modifications are noted in the phase composition. It follows from the analysis of the granulometric histogram that the particle size spread varies in the range of 0.092–62.59 microns, while the average particle diameter was 5.73 microns.

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

Keywords: tungsten; 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., Ulitin D.A., Korolev M.S., Ageeva A.E. Structure and properties of powders obtained by electrodispersion of pure tungsten 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(2):22–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-22-32>

Received 10.04.2024

Accepted 18.05.2024

Published 17.06.2024

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 технологиче-

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

Вольфрам – один из важнейших металлов, используемых в промышленности, повсеместное использования вольфрама в

качестве легирующей добавки в инструментальных сталях дало толчок для развития всей металлургической отрасли [4]. Именно благодаря содержанию в сплавах вольфрама стало возможно получение режущих инструментов высокой твердости [5]. На данный момент сферы применения вольфрама в промышленности очень разнообразны: детали авиационных двигателей, нити накаливания и детали в электроприборах. Данный металл используется для противовесов, артиллерийских снарядов, пуль и сверхскоростных роторов гироскопов для стабилизации полёта баллистических ракет и т. д. [6] Значительное количество областей применения данных материалов ставит перед исследователями задачу сохранения и ресурсосбережения вольфрамосодержащих металлоотходов [7], а высокая температура плавления и твердость 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 вольфрама, является метод электроэрозионного диспергирования [10]. Однако использование данной технологии сдерживается отсутствием фундаментальных исследований в области переработки чистого вольфрама электрической эрозией [11], и отсутствие научно-технической литературы по анализу состава, структуры и свойств получаемых в ходе диспергирования вольфрамowych 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 вольфрама в дистиллированной воде.

Материалы и методы

Для выполнения исследований состава, структуры и свойств порошковых материалов, полученных электродиспергированием отходов вольфрама 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 30,0...32,0 мкФ;
- расстояние между электродами 100 мм.

Полученные электроэрозионные частицы исследовали на электронно-ионно-сканирующем микроскопе Quanta 600 FEG, в составе которого, кстати, тоже используется вольфрам в качестве материала изготовления электронно-лучевой колонны [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].

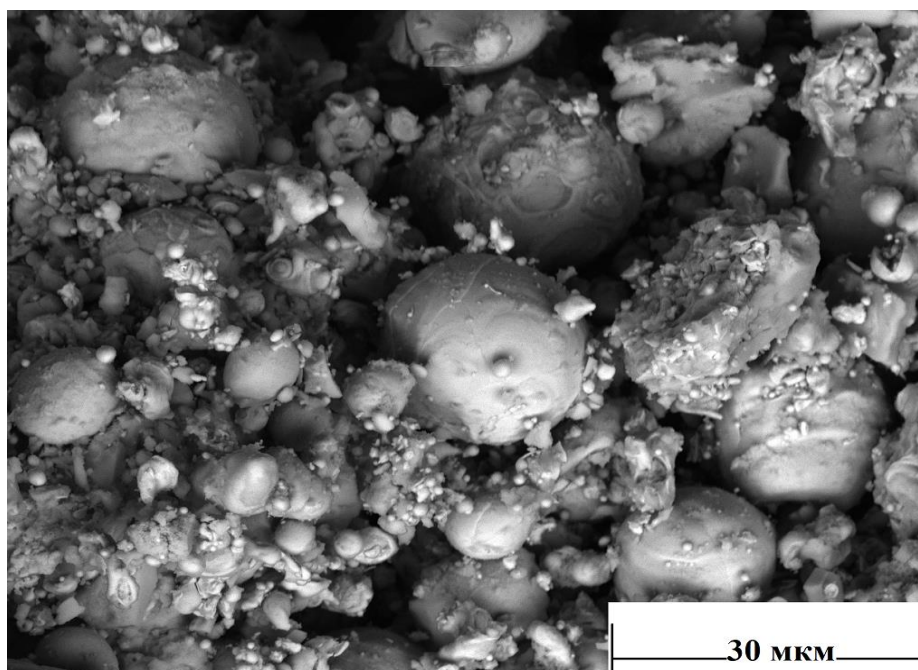
С помощью лазерного анализатора размеров частиц Analysette 22 NanoTec

plus исследован гранулометрический состав вольфрамсодержащих порошковых материалов [18].

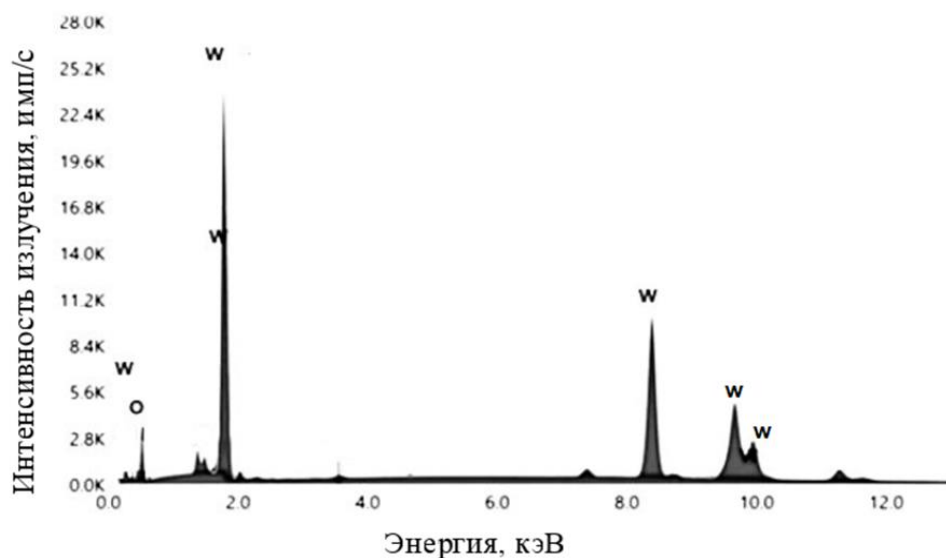
Рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV использовался для определения фазового состава полученных порошковых материалов [19].

Результаты и их обсуждение

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



а



б

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

Fig. 1. Electroerosive tungsten powder: а – 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 со-

ставе порошка два элемента, причем массовая доля содержания вольфрама 77,5%, а кислорода 22,5%.

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

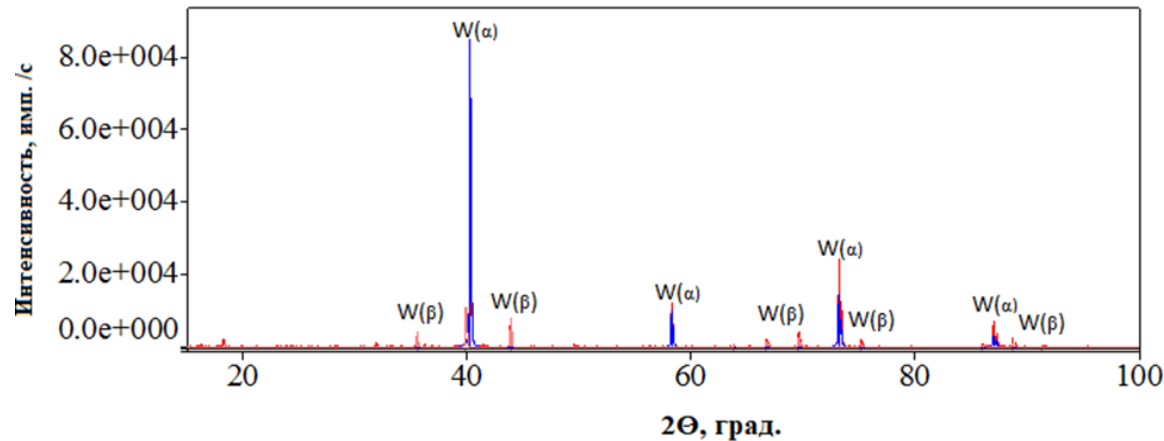


Рис. 2. Дифрактограмма вольфрамосодержащего порошка

Fig. 2. Diffractogram of tungsten-containing powder

Таблица 1. Результаты исследования фазового состава вольфрамового порошка

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

Параметр	Наименование фазы	
	α-вольфрам	β-вольфрам
Тип кристаллической решетки	Кубическая кристаллическая решётка	Кубическая кристаллическая решётка
Параметры кристаллической решетки, Å	$a = b = c = 3.165521$	$a = b = c = 5.051459$

Экспериментально установлено, что электроэрозионные вольфрамовые порошки, полученные в дистиллированной воде, имеют в своем составе фазы чистого вольфрама в α- и β-модификациях, соединений с кислородом не образуется. Известно, что вольфрам при нормальных условиях существует в двух кристаллических модификациях: устойчивая модификация (α-вольфрам) и метастабильная модификация (β-вольфрам). α-Вольфрам образует кристаллы кубической сингонии (объёмно-центрированная решётка), пространственная группа Im3m, параметры ячейки $a = 0,31589$ нм, $Z = 2$. β-Вольфрам –

кристаллы кубической сингонии, пространственная группа Pm3n, параметры ячейки $a = 0,5036$ нм, $Z = 8$, $d = 19,0$ г/см³.

Метастабильная модификация образуется при восстановлении триоксида вольфрама водородом при температурах от 440 до 520°C, а также при электролизе расплава вольфрамов, преобразуется в α-W при нагреве выше 520°C. Хотя впервые β-фаза вольфрама получена ещё в 1931 г., многие исследователи считали, что в действительности это субоксид вольфрама с формулой W14...20O или фаза, стабилизированная примесью кислорода; встречается также предположение, что эта

фаза может быть описана как ионное соединение W_3W (вольфрамид вольфрама), с атомами вольфрама в разных степенях окисления. Лишь в 1998 г. было показано, что β -вольфрам существует и при отсутствии примеси кислорода.

Некоторые физические характеристики α -вольфрама и β -вольфрама существенно отличаются. Температура перехода в сверхпроводящее состояние α -воль-

фрама равна 0,0160 К, у β -фазы эта температура составляет от 1 до 4 К; смесь фаз может становиться сверхпроводящей при промежуточных температурах, в зависимости от относительного содержания фаз. Удельное сопротивление β -вольфрама втрое выше, чем α -вольфрама [20].

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

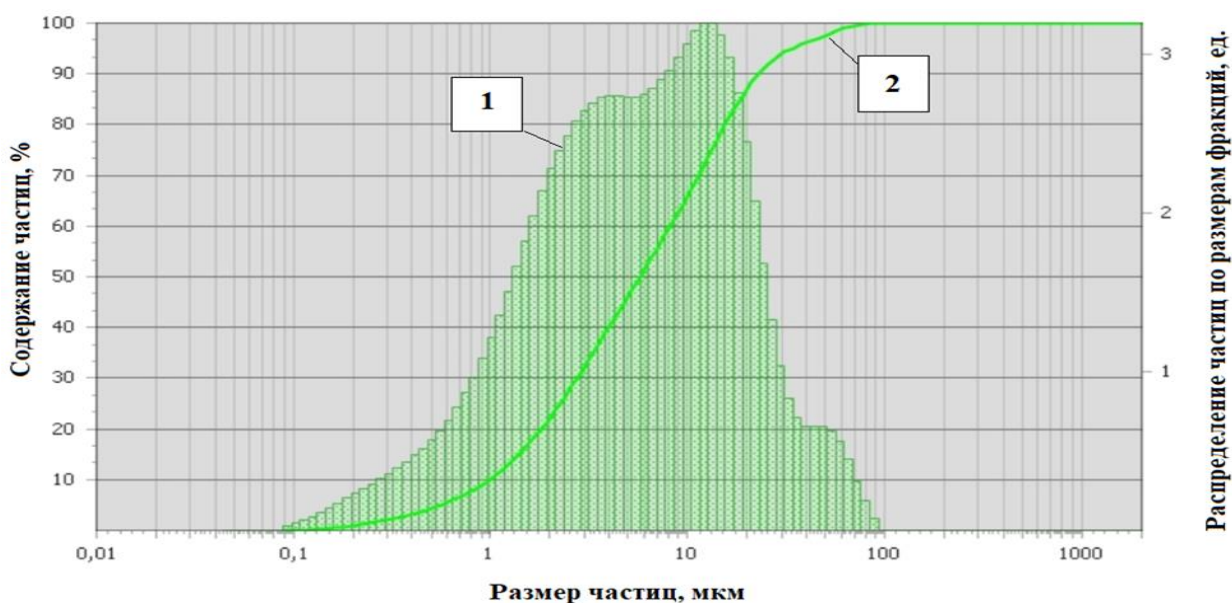


Рис. 3. Гранулометрический анализ вольфрамовых порошков: 1 – гистограмма распределения; 2 – интегральная кривая

Fig. 3. Granulometric analysis of tungsten powders: 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
D10	0,98
D25	2,25
D50	5,73
D75	13,25
D90	22,79
D95	33,81
D99	62,59
Объемный средний диаметр	5,73
Модальный диаметр, мкм	7,86
Размах $(d_{90}-d_{10})/d_{50}$	12,52
Удельная поверхность, $см^2/см^3$	3,80

В таблице 2 собраны размерные характеристики, выявленные в результате анализа результатов гранулометрического исследования. Значение параметра D50 равное 5,73 мкм указывает на то, что частиц размером меньше или равно 5,73 мкм в порошке содержится 50,0% от общего объема.

В результате исследования гранулометрического состава порошков было установлено, что объемный средний диаметр частиц составляет 5,73 мкм.

Выводы

1. На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на исследование структуры и свойств электроэрозионных вольфрамовых 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 порошковых вольфрамовых материалов сферическая и эллиптическая, также на увеличении отмечены агломераты частиц более мелкого размера. В составе порошковых материалов присутствует кислород и вольфрам, при этом совместных структурных составляющих не отмечено. В фазовом составе отмечены фазы чистого вольфрама в α - и β -модификациях. Из анализа гранулометрической гистограммы следует, что разброс частиц по размерам варьируется в интервале 0,092...62,59 мкм, средний же диаметр частиц составил 5,73 мкм.

3. Проведенные исследования позволят 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 вольфрама.

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. Электрохимический синтез наноструктурных порошков оксидов вольфрама и молибдена при электролизе переменным асимметричным синусоидальным током в растворе калиевой щелочи / Ю. А. Абраменко, В. В. Демьян, И. Ю. Жукова, Е. Н. Панина // Актуальные проблемы науки и техники: доклады национальной научно-практической конференции. Ростов н/Д: Донской гос. технический ун-т, 2017. С. 178–179. EDN XBZJJF
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. 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: Нац. исслед. Томский 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, Xiaoyang Song, F. Tang, Yurong Li, L. Cao, Jie Wang, Z. Nie // NPG Asia Materials. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 1–20. EDN QXPMTE

12. Грязнов М., Самохин А., Чувильдеев В. Получение композитного порошка системы W-Ni-Fe со сферической формой частиц и исследование возможности его использования в технологии послойного лазерного сплавления // Физика и химия обработки материалов. 2022. № 3. С. 54–66. EDN UERDWW

13. 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 Белоруссии, 2019. С. 51–58. EDN PXBXUZ

14. Патент 2449859 Российская Федерация, МПК C22F 9/14, C23H 1/02, B82Y 40/00. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов / Агеев Е. В., Семенихин Б. А., Латыпов Р. А., Аниканов В. И.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. № 2010104316/02; заявл. 08.02.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.

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. Бащенко // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 10 (742). С. 106–111. EDN OASPIR

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. Давыдов С. В., Горленко А. О. Композиционные градиентные структуры в функциональных вольфрамовых покрытиях углеродистых сталей // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2020. № 2 (104). С. 28–31. EDN RNQCTI
20. Kiss A. B. Thermoanalytical study of the composition of β -tungsten // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 1998. Vol. 54, no. 3. P. 815–824. <https://doi.org/10.1023/A:1010143904328>

Reference

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. Abramenko Yu.A., Demyan V.V., Zhukova I.Yu., Panina E.N. Electrochemical synthesis of nanostructured powders of tungsten and molybdenum oxides during electrolysis by alternating asymmetric sinusoidal current in a solution of potassium alkali. In: *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki: doklady nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii = Actual Problems of Science and Technology: Reports of the National Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don: Donskoi gos. tekhnicheskii un-t; 2017. P. 178–179. (In Russ.) EDN XBZJFF
5. Savich V.V. Pseudo-alloys: advantages over traditional materials. In: *Priborostroenie – 2022: materialy 15-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii = Instrumentation – 2022: materials of the 15th International Scientific and Technical Conference*. Minsk: Belorusskij nats. tekhnicheskii un-t; 2022. P. 328–331. 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.) 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 Vserossijskoj 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: Nats. issled. Tomskii gos. un-t; 2022. P. 373–377. 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 Technologies*. 2015;(3):17–23. (In Russ.) EDN UZCDRR

11. Hou C., Xiaoyang Song, Tang F., Yurong Li, Cao L., Jie Wang, Nie Z. W-Cu composites with submicron and nanostructures: progress and challenges. *NPG Asia Materials*. 2019;11(1):1–20. (In Russ.) EDN QXPMTE

12. Gryaznov M., Samokhin A., Chuvildeev V. Obtaining a composite powder of the W-Ni-Fe system with a spherical particle shape and exploring the possibility of its use in layered laser fusion technology. *Fizika i himiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of materials processing*. 2022;(3):54–66. (In Russ.) EDN UERDWW

13. Kukareko V.A., Astrashab E.V., Belotserkovskii M.A., Grigorchik A.N., Sosnovskii A.V. Structure, phase composition and tribotechnical properties of psevalloys 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 Belorussii; 2019. P. 51–58. EDN PXBXUZ

14. Ageev E.V., Semenikhin B.A., Latypov R.A., Anikanov V.I. Installation for the production of nanodisperse powders from conductive materials. Patent 2449859 Russian Federation, 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. Shestoj mezhdisciplinarnyj nauchnyj forum s mezhdunarodnym uchastiem = New materials and promising technologies. The sixth interdisciplinary scientific forum with international participation*. Moscow: Centr nauchno-tekhnicheskikh 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 = Successes of physical sciences*. 2020;190(1):2–36. (In Russ.) EDN RJBIAV

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 OASPIR

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. Davydov S.V., Gorlenko A.O. Composite gradient structures in functional tungsten coatings of carbon steels. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2020;(2):28–31. (In Russ.) EDN RNQCTI

20. Kiss A.B. Thermoanalytical study of the composition of β -tungsten. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 1998;54(3):815–824. <https://doi.org/10.1023/A:1010143904328>

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

Ekaterina V. Ageeva, Doctor of Sciences (Engineering), 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

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

Королев Михаил Сергеевич, аспирант кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: korolev37-31-72@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8491-2829

Mikhail S. Korolev, Post-Graduate Student of the Department of Materials and Transport Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: korolev37-31-72@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8491-2829

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

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