

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-20-31>

Рентгенофлуоресцентный анализ элементного состава металлоотходов вольфрама, никеля и меди

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

¹ Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Целью настоящей работы являлось проведение рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава металлоотходов вольфрама, никеля и меди с помощью портативного спектрометра Olympus Delta.

Методы. Для определения химического состава сырья были исследованы образцы металлоотходов в виде прутка из меди, прутков различного диаметра из вольфрама и обрезков никелевых пластин, предназначенных для вторичной переработки. Для определения элементного состава металлоотходов был выбран метод рентгенофлуоресцентного анализа. Метод РФА основан на соотношении интенсивности рентгеновской флуоресценции от концентрации элементов в образце. Образцы, облученные мощным излучением рентгеновской трубки, в ответ излучают характерное флуоресцентное излучение атомов, пропорциональное их концентрации в образце. Данный метод позволяет качественно оценить элементный состав сложных образцов без нарушения их физико-химических свойств с минимальными временными затратами. В качестве экспресс-анализатора металлов и сплавов был использован спектрометр Olympus Delta, с помощью которого были получены экспериментальные данные о составе металлоотходов вольфрама, никеля и меди.

Результаты. На основании проведенных исследований, направленных на проведение рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава металлоотходов вольфрама, никеля и меди с помощью портативного спектрометра Olympus Delta, установлено, что образцы исследуемых металлоотходов соответствуют следующим маркам сплавов: вольфрамовый прутки из вольфрама марки ВА; никелевая пластина из никеля марки ПНК-0Т1; медный прутки из меди марки МЗр.

Заключение. Полученные результаты позволят провести дальнейшие исследования по их переработке методом электроэрозионного диспергирования и повторному использованию при получении тяжелых вольфрамовых сплавов. Реновация металлоотходов, в том числе металлоотходов вольфрама, никеля и меди будет способствовать ресурсосбережению, импортозамещению и обеспечению технологического суверенитета Российской Федерации.

Ключевые слова: металлоотходы; вольфрам; никель; медь; рентгенофлуоресцентный метод анализа.

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

Для цитирования: Агеева Е. В., 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>.

Поступила в редакцию 26.09.2023

Подписана в печать 27.11.2023

Опубликована 25.12.2023

© Агеева Е. В., Локтионова О. Г., Улитин Д. А., 2023

X-ray Fluorescence Analysis of the Elemental Composition of Tungsten, Nickel and Copper

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

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

The purpose of this work was to conduct an X-ray fluorescence analysis of the elemental composition of tungsten, nickel and copper metal waste using an Olympus Delta portable spectrometer.

Methods. To determine the chemical composition of raw materials, samples of metal waste in the form of copper rods, tungsten rods of various diameters and scraps of nickel plates intended for recycling were examined. To determine the elemental composition of metal waste, the method of X-ray fluorescence analysis (XFA) was chosen. The X-ray fluorescence method is based on the ratio of the intensity of X-ray fluorescence to the concentration of elements in the sample. Samples irradiated with powerful X-ray tube radiation, in response, emit characteristic fluorescent radiation of atoms proportional to their concentration in the sample. This method allows us to qualitatively assess the elemental composition of complex samples without violating their physico-chemical properties with minimal time costs. The Olympus Delta spectrometer was used as an express analyzer of metals and alloys, with the help of which experimental data on the composition of metal waste of tungsten, nickel and copper were obtained.

Results. Based on the conducted studies aimed at X-ray fluorescence analysis of the elemental composition of tungsten, nickel and copper metal waste using the Olympus Delta portable spectrometer, it was found that the samples of the studied metal waste correspond to the following grades of alloys: tungsten rod made of tungsten grade VA; nickel plate made of nickel grade PNK-OT1; copper rod made of copper grade M3r.

Conclusion. The results obtained will allow further research on their processing by the method of electroerosive dispersion and reuse in the production of heavy tungsten alloys. Renovation of metal waste, including tungsten, nickel and copper metal waste, will contribute to resource conservation, import substitution and ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation.

Keywords: metal waste; tungsten; nickel; copper; X-ray fluorescence analysis method.

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. X-ray Fluorescence Analysis of the Elemental Composition 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>

Received 26.09.2023

Accepted 27.11.2023

Published 25.12.2023

Введение

В настоящее время тяжелые вольфрамовые псевдосплавы, такие как ВНМ, получили широкое распространение во многих отраслях промышленности. Особую важность вольфрамовые псевдосплавы представляют для таких отраслей, как автомобилестроение, энергетика, приборостроение, атомная энергетика, авиастрое-

ние и оборонная промышленность. Высокая востребованность тяжелых псевдосплавов обусловлена совокупностью их уникальных свойств, которые достигаются благодаря применению в составе этих сплавов дорогостоящих металлов, таких как вольфрам, никель и медь [1; 2]. В современных условиях санкционного давления реновация металлоотходов, в том числе и дорогостоящих металлов воль-

фрама, никеля и меди, будет способствовать ресурсосбережению, импортозамещению и обеспечению технологического суверенитета Российской Федерации [3–6].

Одним из наиболее перспективных методов переработки металлоотходов является электроэрозионное диспергирование. Данный метод в настоящее время в промышленности не применяется, при этом обладает рядом важных преимуществ: малой тоннажностью (возможности перерабатывать металлоотходы от 1 кг и менее), экологичностью (отсутствием сточных вод и выбросов), низкими затратами энергии (до 1 кВт·ч на 1 кг), мелкой дисперсностью получаемых порошковых материалов (с размером частиц от сотен микрон до наноразмерных) [7–10].

Электроэрозионное диспергирование металлоотходов вольфрама, никеля и меди в порошковые материалы с повторным их использованием при получении дорогостоящего и востребованного современной промышленностью тяжелого

вольфрамового сплава ВНМ вызывает большой исследовательский интерес. Однако свойства конечного продукта, т. е. свойства сплава, во многом зависят от состава, структуры и свойств исходных компонентов [11–14].

Целью настоящей работы являлось проведение рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава металлоотходов вольфрама, никеля и меди с помощью портативного спектрометра Olympus Delta.

Материалы и методы

С целью установления химического состава исходного сырья, необходимого для получения тяжелого вольфрамового псевдосплава, на одном из предприятий по сбору и рециклингу металлического лома были отобраны образцы металлоотходов в виде вольфрамового прутка (рис. 1, а), никелевых пластин (рис. 1, б) и медного прутка (рис. 1, в).

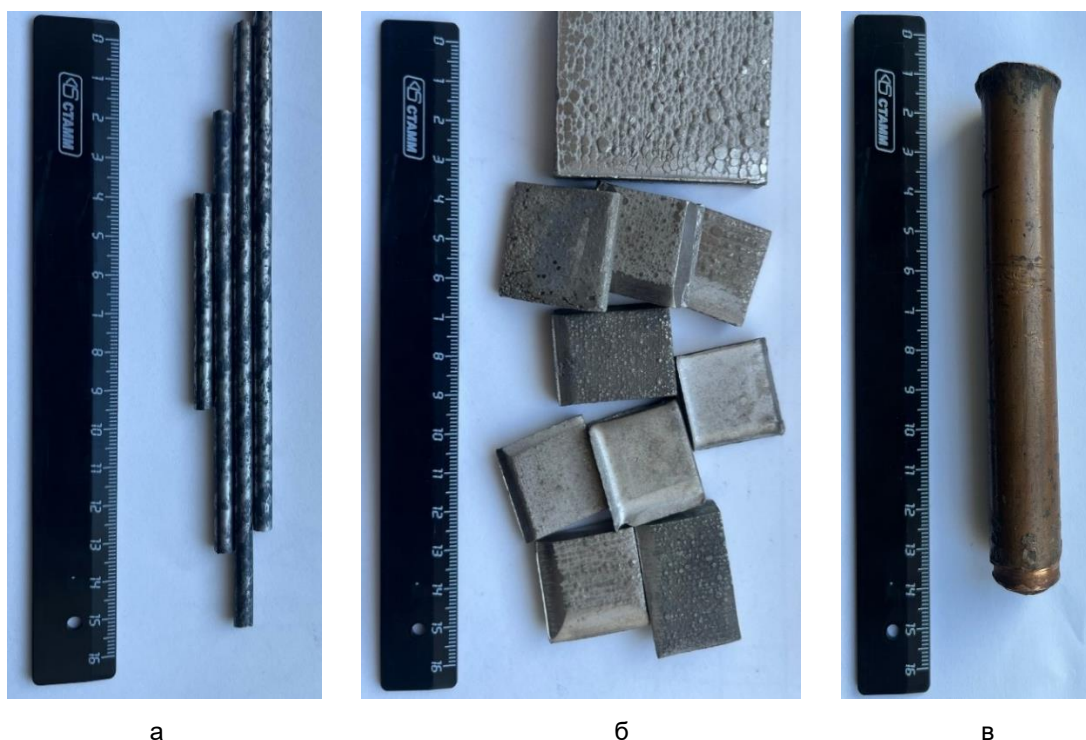


Рис. 1. Образцы металлоотходов: а – пруток вольфрамовый; б – пластина никелевая; в – пруток медный

Fig. 1. Samples of metal waste: а – tungsten rod; б – nickel plate; в – copper rod

Исследование химического состава образцов металлоотходов производилось с применением рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). РФА является физическим методом экспресс-анализа элементного состава исследуемых образцов. Отличительной особенностью данного метода является вывод информации о качественном составе образцов с указанием концентрации каждого химического элемента в его составе [15; 16].

Сущность данного метода заключается в проведении анализа характерного спектра вторичного флуоресцентного излучения пробы образца, облученного мощным рентгеновским излучением. Состав спектрального излучения в полной мере отображает элементный состав пробы образца, основанный на индивидуальных характеристических линиях, присутствующих атомам химических элементов. Наличие линий в спектре позволяет определить качественный состав, а количественный состав пробы определяется интенсивностью линий [17; 18].

Портативный рентгенофлуоресцентный спектрометр предназначен для прове-

дения неразрушающего анализа материалов на качественный и количественный состав химических элементов, содержащихся в образцах. Конструктивные особенности спектрометра позволяют производить точечный анализ поверхности образцов при необходимости [20].

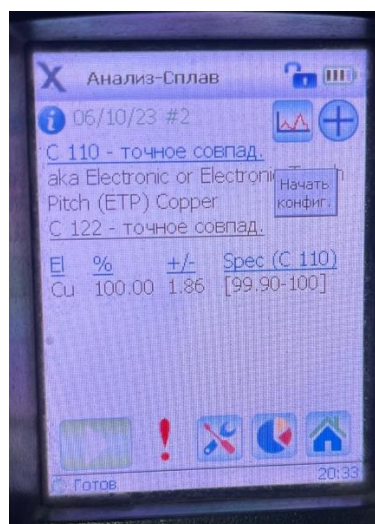
Применение портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра для определения химического состава образцов обосновано оптимальной точностью анализа и высокой производительностью процесса. Идентификация металлов и сплавов происходит в течение 1–10 с с сохранением физико-химических свойств исследуемых образцов и не требует наличия эталонного образца.

Перед проведением анализа образцы металлоотходов были предварительно зачищены и обезжирены. Точечные измерения поверхности образцов металлоотходов выполнялись не менее 5 раз.

С помощью портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра Olympus Delta определялся фактический состав металлоотходов (рис. 2, а, б) [19].



а



б

Рис. 2. Этап определения состава образцов металлоотходов: а – внешний вид спектрометра OLYMPUS DELTA; б – результаты измерений

Fig. 2. The stage of determining the composition of metal waste samples: а – appearance of the OLYMPUS DELTA spectrometer; б – measurement results

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные данные о составе образцов исследуемых металлоотходов представлены в таблице 1.

Для определения марки сплава пользовались марочником сталей и сплавов (рис. 3, а, б).

Таблица 1. Результаты исследования образцов металлоотходов

Table 1. Results of the study of metal waste samples

Химический элемент Chemical element	Процентный состав, % Percentage composition, %					Погрешность измерения, $\pm 2\delta$ Measurement error, $\pm 2\delta$
	Пруток вольфрамовый / Tungsten rod					
W	100,00	99,61	98,82	99,93	99,96	2,48
	Пластина никелевая / Nickel plate					
Ni	99,72	99,87	100,00	99,95	99,93	0,94
	Пруток медный / Copper rod					
Cu	99,32	98,91	99,97	99,54	99,93	1,86

Поиск по химическому составу материала

Внимание!	Значение ДО вводить как НОЛЬ	Пример: поиск Fe ДО 5.3% вводить как	0	5.3	Fe
	Если нет MIN-MAX, число вводить в обе ячейки	Пример: поиск Fe = 5.3% вводить как	5.3	5.3	Fe

Область поиска все материалы

		Ag			Al			As			B			Be
		Bi			C			Ca			Cd			Ce
		Cl			Co			Cr			Cu			Fe
		H			La			Li			Mg			Mn
		Mo			N			Na			Nb			Nd
		Ni			O			P			Pb			S
		Sb			Si			Sn			Ti			V
		97.52			100	W			Y			Zn		Zr
Добавлены новые элементы														
		Au			Ba			F			Ga			Hg
		In			Ir			Pd			Pt			Rh
		Se			Ta			Te			Tl			Ru
		Al+Mg			Cu+P			Ni+Co						

Выполнить поиск

Рис. 3. Определение марки сталей и сплавов. Интерфейс ввода данных о содержащихся элементах в процентном соотношении

Fig. 3. Determination of the grade of steels and alloys. Interface for entering data about the contained elements in percentage ratio

Характеристика материала ВА

Марка :	ВА
Классификация :	Вольфрам
Применение:	Для изготовления методом порошковой металлургии проволоки, предназначенной для производства электронных приборов и источников света
Зарубежные аналоги:	Нет данных

Химический состав в % материала ВА ГОСТ 19671 - 91

Fe	Si	Mo	W	Al	Ca
до 0.005	0.001 - 0.006	до 0.03	min 99.95	0.001 - 0.004	до 0.005

Примечание: Алюминий и кремний - присадки

Рис. 3. Определение марки сталей и сплавов. Наименование и элементный состав искомого материала

Fig. 3. Determination of the grade of steels and alloys. Name and elemental composition of the desired material

Согласно марочнику сталей и сплавов было установлено, что вольфрамовый пруток изготовлен из вольфрама марки ВА, никелевые пластины изготовлены из никеля марки ПНК-0Т1, а медный пруток – из меди марки МЗр.

Сопоставление экспериментально полученного состава сплавов образцов с теоретическим составом сплавов, определенных согласно марочнику сталей и сплавов, представлено в таблице 2.

Таблица 2. Сопоставление экспериментального состава сплава с теоретическим

Table 2. Comparison of the experimental composition of the alloy with the theoretical

Химический элемент Chemical element	Экспериментальный состав, % Experimental composition, %	Теоретический состав, % Theoretical composition, %
Основные элементы ВА Essential elements VA		
W	100,00	99,90
Σ	100,00	99,90
Примеси ВА Impurities VA		
Fe	0,00	до 0,005
Si	0,00	0,001-0,006
Mo	0,00	до 0,030
Al	0,00	0,001-0,004

Продолжение табл. 2

Continuation of Table 2

Химический элемент Chemical element	Экспериментальный состав, % Experimental composition, %	Теоретический состав, % Theoretical composition, %
Ca	0,00	до 0,005
Σ	0,00	[0,002; 0,050]
Основные элементы ПНК-0Т1 Essential elements PNK-0T1		
Ni	100,00	99,90
Σ	100,00	99,90
Примеси ПНК-0Т1 Impurities PNK-0T1		
Fe	0,00	до 0,0015
C	0,00	до 0,09
Si	0,00	до 0,001
Mn	0,00	до 0,0005
S	0,00	до 0,001
P	0,00	до 0,001
Co	0,00	до 0,001
Cu	0,00	до 0,001
As	0,00	до 0,001
Pb	0,00	до 0,0002
Ca	0,00	до 0,005
Mg	0,00	до 0,001
Zn	0,00	до 0,001
Sb	0,00	до 0,0003
Bi	0,00	до 0,0003
Sn	0,00	до 0,0003
Cd	0,00	до 0,0003
Σ	0,00	[0,00; 0,1064]
Основные элементы МЗр Essential elements M3r		
Cu	100,00	99,50
Σ	100,00	99,50
Fe	0,00	до 0,05
Ni	0,00	до 0,02
S	0,00	до 0,01
P	0,00	0,005–0,06

Окончание табл. 2

Ending of Table 2

Химический элемент Chemical element	Экспериментальный состав, % Experimental composition, %	Теоретический состав, % Theoretical composition, %
Примеси МЗр Impurities M3r		
As	0,00	до 0,05
Pb	0,00	до 0,03
O	0,00	до 0,01
Sb	0,00	до 0,05
Bi	0,00	до 0,003
Sn	0,00	до 0,05
Σ	0,00	[0,005; 0,333]

Сравнение теоретического и экспериментального составов исследуемых образцов металлоотходов позволило с высокой точностью, в пределах погрешности измерения прибора, определить марку металлов, использовавшихся при изготовлении данных образцов.

Выводы

1. На основании выполненных исследований, направленных на проведение рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава металлоотходов вольфрама, никеля и меди с помощью портативного спектрометра Olympus Delta, установлено, что образцы исследуемых металлоотходов соответствуют следующим маркам сплавов:

– вольфрамовый пруток из вольфрама марки ВА;

– никелевая пластина из никеля марки ПНК-0Т1;

– медный пруток из меди марки МЗр.

2. Полученные результаты позволят провести дальнейшие исследования по их переработке методом электроэрозионного диспергирования и повторному использованию при получении тяжелых вольфрамовых сплавов.

3. Реновация металлоотходов, в том числе металлоотходов вольфрама, никеля и меди, будет способствовать ресурсосбережению, импортозамещению и обеспечению технологического суверенитета Российской Федерации.

Список литературы

1. Исследование структуры и механических свойств нано- и ультрадисперсных механоактивированных тяжелых вольфрамовых сплавов / В. Н. Чувильдеев, А. В. Нохрин, Г. В. Баранов, А. В. Москвичева, М. С. Болдин, Д. Н. Котков, Н. В. Сахаров, Ю. В. Благовещенский, С. В. Шотин, Н. В. Мелехин, В. Ю. Белов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8, № 1/2. С. 94–104.

2. Сверхпрочные нанодисперсные вольфрамовые псевдосплавы, полученные методами высокоэнергетической механоактивации и электроимпульсного плазменного спекания / В. Н. Чувильдеев, А. В. Москвичева, А. В. Нохрин, Г. В. Баранов, Ю. В. Благовещенский, Д. Н. Котков, Ю. Г. Лопатин, В. Ю. Белов // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436, № 4. С. 478–482.

3. Ровин С. Л., Калинин А. С., Ровин Л. Е. Возвращение дисперсных металлоотходов в производство // Литье и металлургия. 2019. № 1. С. 45–48.

4. Тенденции и перспективы развития рециклинга металлов / А. И. Татаркин, О. А. Романова, В. Г. Дюбанов, А. В. Душин, О. С. Брянцева // *Экология и промышленность России*. 2013. № 5. С. 4–10.
5. Джандиери Г. В. Диагностика эффективности и оптимизация организационно-экономической системы рециклинга черных металлов // *Черные металлы*. 2020. № 1. С. 56–62.
6. Писарева О. М. Оценка перспектив развития национальной системы рециклинга металлов на основе сценарного моделирования // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки*. 2014. № 3 (197). С. 75–89.
7. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков / Е. В. Агеев, Г. Р. Латыпова, А. А. Давыдов, Е. В. Агеева // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 5 (44), ч. 2. С. 99–102.
8. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники / Е. В. Агеев, В. Н. Гадалов, Е. В. Агеева, Р. В. Бобрышев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 1 (40), ч. 1. С. 182–189.
9. Оценка эффективности применения твердосплавных электроэрозионных порошков в качестве электродного материала / Е. В. Агеев, Г. Р. Латыпова, А. А. Давыдов, Е. В. Агеева // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2012. № 1. С. 19–22.
10. Исследование химического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е. В. Агеев, Б. А. Семенихин, Е. В. Агеева, Р. А. Латыпов // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2011. № 5 (38), ч. 1. С. 138а–144.
11. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Пикалов С. В. Рентгеноспектральный микроанализ тяжелых вольфрамовых псевдосплавов на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ, полученных в воде // *Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции*. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2020. С. 149–150.
12. Размер зерна тяжелых вольфрамовых сплавов, полученных на основе порошковых материалов, изготовленных электродиспергированием сплава ВНЖ 95 в керосине / Е. В. Агеев, С. В. Пикалов, А. С. Переверзев, А. А. Сысоев, Б. Н. Сабельников // *Школа молодых новаторов: сборник научных статей 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 3-х т.* Курск: Университетская книга, 2021. Т. 3. С. 76–78.
13. Поварова К. Б., Алымов М. И., Дроздов А. А. Тяжелые вольфрамовые сплавы на основе нанопорошков // *Вопросы материаловедения*. 2008. № 2 (54). С. 94–99.
14. Агеева Е. В., Селютин В. Л., Андреева Л. П. Исследование влияния параметров электроэрозионного диспергирования сплава ВНЖ на средний размер получаемых частиц // *Электрометаллургия*. 2020. № 6. С. 32–40.
15. Нарцев В. М., Аткарская А. Б. Рентгенофлуоресцентный анализ состава тонких покрытий с использованием метода фундаментальных параметров // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2016. № 82(3). С. 29–35.
16. Рентгенофлуоресцентный анализ как метод определения количественного элементного состава сплавных катализаторов / Э. А. Каралин, Я. О. Желонкин, А. В. Опаркин, В. А. Васильев, Л. Т. Ахметова, Г. Р. Бадикова // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19, № 14. С. 63–65.
17. Validation of secondary fluorescence excitation in quantitative X-ray fluorescence analysis of thin alloy films / A. Wählich, C. Streeck, P. Hönicke, B. Beckhoffa // *J. Anal. At. Spectrom.* 2020. Vol. 35. P. 1664–1670. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ja/d0ja00171f>
18. Бахтияров А. В., Савельев С. К. Методика модифицированного способа стандарта-фона при рентгенофлуоресцентном анализе сложных многокомпонентных объектов // *Журнал аналитической химии*. 2020. Т. 75, № 1. С. 24–30.
19. Полякова М. А., Босикова Е. Ю. Особенности применения рентгенофлуоресцентного анализа для определения состава материалов // *Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки*. 2017. № 16. С. 92–98.

20. Рентгенофлуоресцентный анализ ванадиевого шлака после боратного сплавления / А. И. Волков, К. Б. Осипов, П. А. Жданов, А. Н. Серёгин, М. А. Большов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. № 82(1). С. 8–15.

Reference

1. Chuvildeev V. N., Nokhrin A. V., Baranov G. V., Moskvicheva A. V., Boldin M. S., Kotkov D. N., Sakharov N. V., Blagoveshchenskiy Yu. V., Shotin S. V., Melekhin N. V., Belov V. Yu. Issledovanie struktury i mekhanicheskikh svoystv nano i ul'tradispersnykh mekhano-aktivirovannykh tyazhelykh vol'framovykh splavov [Investigation of the structure and mechanical properties of nano and ultrafine mechanoactivated heavy tungsten alloys]. *Rossiiskie nanotekhnologii = Russian nanotechnologies*, 2013, vol. 8, no. 1-2, pp. 94–104.
2. Chuvildeev V. N., Moskvicheva A. V., Nokhrin A. V., Baranov G. V., Kotkov D. N., Blagoveshchenskiy Yu. V., Lopatin Yu. G., Belov V. Yu. Sverkhprochnye nanodispersnye vol'framovye psevdosplavy, poluchennye metodami vysokoenergeticheskoi mekhanoaktivatsii i elektroimpul'snogo plazmennogo spekaniya [Heavy-duty nanodisperse tungsten pseudo-alloys obtained by methods of high-energy mechanical activation and electric pulse plasma sintering]. *Doklady Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*, 2011, vol. 436, no. 4, pp. 478–482.
3. Rovin S. L., Kalinichenko A. S., Rovin L. E. Vozvrashchenie dispersnykh metallootkhodov v proizvodstvo [The return of dispersed metal waste to production]. *Lit'e i metallurgiya = Casting and metallurgy*, 2019, no. 1, pp. 45–48.
4. Tatarkin A. I., Romanova O. A., Dyubnov V. G., Dushin A. V., Bryantseva O. S. Tendentsii i perspektivy razvitiya retsiklinga metallov [Trends and prospects of metal recycling development]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*, 2013, no. 5, pp. 4–10.
5. Jandieri G. V. Diagnostika effektivnosti i optimizatsiya organizatsionno-ekonomicheskoi sistemy retsiklinga chernykh metallov [Diagnostics of efficiency and optimization of the organizational and economic system of recycling of ferrous metals]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2020, no. 1, pp. 56–62.
6. Pisareva O. M. Otsenka perspektiv razvitiya natsional'noi sistemy retsiklinga metallov na osnove stsennarnogo modelirovaniya [Assessment of the prospects for the development of the national metal recycling system based on scenario modeling]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki = Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences*, 2014, no. 3 (197), pp. 75–89.
7. Ageev E. V., Latypova G. R., Davydov A. A., Ageeva E. V. Provedenie rentgenospektral'nogo mikroanaliza tverdospлавnykh elektroerozionnykh poroshkov [Conducting X-ray spectral microanalysis of carbide electroerosion powders]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2012, no. 5 (44), pt. 2, pp. 99–102.
8. Ageev E. V., Gadalov V. N., Ageeva E. V., Bobryshev R. V. Poroshki, poluchennye elektroerozionnym dispergirovaniem otkhodov tverdykh splavov - perspektivnyi material dlya vosstanovleniya detalei avtotraktornoi tekhniki [Powders obtained by electroerosive dispersion of solid alloy waste - a promising material for the restoration of parts of automotive equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 182–189.
9. Ageev E. V., Latypova G. R., Davydov A. A., Ageeva E. V. Otsenka effektivnosti primeneniya tverdospлавnykh elektroerozionnykh poroshkov v kachestve elektrodno materiala [Evaluation of the effectiveness of the use of carbide electroerosion powders as an electrode material]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Engineering and Technology*, 2012, no. 1, pp. 19–22.
10. Ageev E. V., Semenikhin B. A., Ageeva E. V., Latypov R. A. Issledovanie khimicheskogo sostava poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem tverdogo splava [Investigation of the chemical composition of powders obtained by electroerosive dispersion of a hard alloy]. *Izvestiya Yugo-*

Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University, 2011, no. 5 (38), pt. 1, pp. 138a–144.

11. Ageeva E. V., Ageev E. V., Pikalov S. V. Rentgenospektral'nyi mikroanaliz tyazhelykh vol'framovykh psevdosplavov na osnove dispergirovannykh elektroeroziei chastits splava VNZh, poluchennykh v vode [X-ray spectral microanalysis of heavy tungsten pseudoalloys based on electroerosion dispersed particles of a residence permit alloy obtained in water]. *Sovremennye problemy mashinostroeniya. Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsi* [Modern problems of mechanical engineering. Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic Univ. Publ., 2020, pp. 149–150.

12. Ageev E. V., Pikalov S. V., Pereverzev A. S., Sysoev A. A., Sabelnikov B. N. Razmer zerna tyazhelykh vol'framovykh splavov, poluchennykh na osnove poroshkovykh materialov, izgotovlennykh elektrodispergirovaniem splava VNZh 95 v kerosine [Grain size of heavy tungsten alloys obtained on the basis of powder materials made by electrodispersing the alloy VJ 95 in kerosene]. *Shkola molodykh novatorov: Sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh* [School of Young innovators. Collection of scientific articles of the 2nd International Scientific Conference of promising developments of young scientists]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2021, vol. 3, pp. 76–78.

13. Povarova K. B., Alymov M. I., Drozdov A. A. Tyazhelye vol'framovye splavy na osnove nanoporoshkov [Heavy tungsten alloys based on nanopowders]. *Voprosy materialovedeniya = Questions of materials science*, 2008, no. 2 (54), pp. 94–99.

14. Ageeva E. V., Selyutin V. L., Andreeva L. P. Issledovanie vliyaniya parametrov elektroerozionnogo dispergirovaniya splava VNZh na srednii razmer poluchaemykh chastits [Investigation of the influence of the parameters of the electroerosive dispersion of a residence permit alloy on the average size of the resulting particles]. *Elektrometallurgiya = Electrometallurgy*, 2020, no. 6, pp. 32–40.

15. Nartsev V. M., Atkarskaya A. B. Rentgenofluorestsentnyi analiz sostava tonkikh pokrytii s ispol'zovaniem metoda fundamental'nykh parametrov [X-ray fluorescence analysis of the composition of thin coatings using the method of fundamental parameters]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2016, no. 82(3), pp. 29–35.

16. Karolin E. A., Zhelonkin Ya. O., Oparin A. V., Vasiliev V. A., Akhmetova L. T., Badikova G. R. Rentgenofluorestsentnyi analiz kak metod opredeleniya kolichestvennogo elementnogo sostava splavnykh katalizatorov [X-ray fluorescence analysis as a method for determining the quantitative elemental composition of alloy catalysts]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2016, vol. 19, no. 14, pp. 63–65.

17. Wählich A., Streeck C., Hönicke P., Beckhoff B. Validation of secondary fluorescence excitation in quantitative X-ray fluorescence analysis of thin alloy films. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2020, vol. 35, pp. 1664–1670. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ja/d0ja00171f>

18. Bakhtiarov A. V., Saveliev S. K. Metodika modifitsirovannogo sposoba standarta-fona pri rentgenofluorestsentnom analize slozhnykh mnogokomponentnykh ob"ektov [Methodology of the modified standard-background method for X-ray fluorescence analysis of complex multicomponent objects]. *Zhurnal analiticheskoi khimii = Journal of Analytical Chemistry*, 2020, vol. 75, no. 1, pp. 24–30.

19. Polyakova M. A., Baskova E. Yu. Osobennosti primeneniya rentgenofluorestsentnogo analiza dlya opredeleniya sostava materialov [Features of the use of X-ray fluorescence analysis to determine the composition of materials]. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki = Technologies of metallurgy, mechanical engineering and material processing*, 2017, no. 16, pp. 92–98.

20. Volkov A. I., Osipov K. B., Zhdanov P. A., Seregin A. N., Bolshov M. A. Rentgenofluorestsentnyi analiz vanadievogo shlaka posle boratnogo splavlения [X-ray fluorescence analysis of vanadium slag after borate fusion]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2016, vol. 82(1), pp. 8–15.

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

Локтионова Оксана Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: 0000-0002-8491-2829, SPIN-код: 1506-3988

Oksana G. Loktionova, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: 0000-0002-8491-2829, SPIN-code: 1506-3988

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

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