

Оригинальная статья / Original article

УДК 669.1

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-30-42>

Сравнительный анализ химического состава металлоотходов из быстрорежущей стали и электроэрозионного порошка

Е.В. Агеев¹, М.Ю. Степанов¹✉, И.Р. Гладских¹, В.В. Мищенко¹,
Н.В. Табольская¹

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

✉ e-mail: hard-bass2016@yandex.ru

Резюме

Цель. Данная работа ориентирована на сопоставительный анализ химической структуры двух типов материалов: металлических отходов, образующихся при использовании сверлильного инструмента, и порошкообразного продукта, полученного в результате электроэрозионного разрушения и диспергирования указанных отходов.

Методы. В рамках экспериментальной части исследования в качестве объекта анализа были использованы металлические отходы, образованные при интенсивном износе сверлильного инструмента без установленной маркировки. Количественное содержание химических элементов и их долевое распределение в материале определялось с применением портативного рентгенофлуоресцентного анализатора Niton Goldd производства США. Процедура измерений основывалась на облучении образца рентгеновским пучком с последующей регистрацией спектрального отклика и интерпретацией параметров индуцированного флуоресцентного излучения.

При облучении материала рентгеновскими квантами в его атомной структуре возбуждались электромагнитные колебания, в результате чего возникало вторичное излучение. Спектр этого излучения содержал набор характерных пиков, индивидуальных для атомов каждого химического элемента. Идентификация элементного состава осуществлялась по положению этих спектральных линий, тогда как массовую долю компонентов определяли на основе их интенсивности.

Результаты. Использование портативного спектрометра Niton Goldd позволило установить, что металлоотходы из свёрл принадлежат к сплаву марки Р6М5К5. Полученные результаты дали возможность однозначно идентифицировать исследуемые отходы, предназначенные для последующей переработки с применением электроэрозионного метода, в результате которого формируются порошкообразные частицы преимущественно сферической формы. Полученные материалы обладают высоким прикладным потенциалом и могут эффективно использоваться в технологиях аддитивного изготовления изделий.

Сопоставительное исследование удельного содержания химических компонентов в металлоотходах из свёрл и полученном электроэрозионном порошке выявил небольшие изменения: увеличение содержания железа, кобальта, никеля и олова), а также произошло снижение концентрации вольфрама, молибдена, хрома и ванадия.

Заключение. Переработка металлоотходов, включая отходы из быстрорежущих сталей, имеет важное значение для рационального использования ресурсов, снижения зависимости от импорта, укрепления технологического суверенитета Российской Федерации.

Ключевые слова: металлоотходы; сверла; рентгенофлуоресцентный анализ; элементный анализ.

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

Для цитирования: Сравнительный анализ химического состава металлоотходов из сверл и электроэрозионного порошка / Е.В. Агеев, М.Ю. Степанов, И.Р. Гладских, В.В. Мищенко, Н.В. Таболевская // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 4. С. 30–42. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-30-42>.

Поступила в редакцию 10.11.2025

Подписана в печать 01.12.2025

Опубликована 25.12.2025

Comparative analysis of the chemical composition of metal waste from drills and electro-erosion powder

Evgeny V. Ageev¹, Mikhail Y. Stepanov¹✉, Ivan R. Gladskikh¹,
Vitaly V. Mishchenko¹, Natalia V. Tabolskaya¹

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

✉ e-mail: hard-bass2016@yandex.ru

Abstract

Purpose. This work is focused on a comparative analysis of the chemical structure of two types of materials: metal waste generated when using drilling tools, and a powdered product obtained as a result of electroerosion destruction and dispersion of these wastes.

Methods. As part of the experimental part of the study, metal waste generated during intensive wear of drilling tools without an established marking was used as an object of analysis. The quantitative content of chemical elements and their fractional distribution in the material were determined using a portable Niton Gold X-ray fluorescence analyzer manufactured in the USA. The measurement procedure was based on irradiating the sample with an X-ray beam, followed by recording the spectral response and interpreting the parameters of the induced fluorescent radiation. When the material was irradiated with X-ray quanta, electromagnetic vibrations were excited in its atomic structure, resulting in secondary radiation. The spectrum of this radiation contained a set of characteristic peaks, individual for the atoms of each chemical element. The elemental composition was identified by the position of these spectral lines, while the mass fraction of the components was determined based on their intensity.

Results. The use of a portable Niton Gold spectrometer made it possible to establish that the metal waste from the drills belongs to the alloy grade P6M5K5. The results obtained made it possible to uniquely identify the waste under study, intended for subsequent processing using the electroerosion method, which results in the formation of powdery particles of a predominantly spherical shape. The obtained materials have high application potential and can be effectively used in additive manufacturing technologies.

A comparative study of the specific content of chemical components in metal waste from drills and the resulting electroerosion powder revealed small changes: an increase in the content of Iron, Cobalt, Nickel and Tin, as well as a decrease in the concentration of Tungsten, Molybdenum, Chromium and Vanadium.

Conclusion. Recycling of metal waste, including waste from high-speed steels, is important for: rational use of resources, reducing dependence on imports, and strengthening the technological sovereignty of the Russian Federation.

Keywords: metal waste; drills; X-ray fluorescence analysis; elemental analysis.

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

For citation: Ageev E.V., Stepanov M.Y., Gladskikh I.R., Mishchenko V.V., Tabolskaya N.V. Comparative analysis of the chemical composition of metal waste from drills and electro-erosion powder. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(4):30-42. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-30-42>.

Received 10.11.2025

Accepted 01.12.2025

Published 25.12.2025

Введение

В сфере аддитивного производства остро стоит задача организации отечественного выпуска сферических порошков специального класса в малых партиях и с заданной зернистостью [1]. Особое значение имеет изготовление быстрорежущих сплавов методами аддитивных технологий [2], поскольку такие сплавы востребованы во многих отраслях промышленности.

Ценные эксплуатационные характеристики быстрорежущих сплавов обеспечиваются введением легирующих элементов – вольфрама, молибдена и кобальта [3]. В условиях импортных ограничений рециклинг металлоотходов [4], содержащих эти металлы, становится ключевым фактором ресурсосбережения и достижения технологической независимости [5].

Развитие аддитивных технологий в производстве быстрорежущих сплавов способствует укреплению промышленности и экономической устойчивости. Внедрение передовых решений и повышение качества продукции расширяют возможности выхода на международные рынки [6], а подготовка квалифицированных специалистов обеспечивает эффективное решение производственных задач [7].

Одним из наиболее перспективных направлений утилизации металлических отходов является применение электроэрозионной технологии диспергирования (ЭЭД) [8]. Данный процесс в настоящее время успешно конкурирует с альтернативными методами получения металлических порошковых материалов, включая синтез нанодисперсных частиц [9], благодаря ряду существенных преимуществ: высокой экологической безопасности, а также получению частиц с высокой степенью дисперсности – от субмикронных размеров до наноструктурированных фракций.

Преобразование быстрорежущих сплавов в порошкообразное состояние с использованием электроэрозионного диспергирования представляет собой актуальную научно-практическую задачу [10]. Вместе с тем характеристики получаемого порошка главным образом зависят от состава и структуры исходного материала, а их влияние на процесс пока изучено недостаточно.

Основной задачей настоящего исследования является определение и оценка элементного состава металлических отходов, образующихся при эксплуатации сверлильного инструмента, до их переработки с использованием электроэрозионного диспергирования, с целью получения сферических порошковых материалов, пригодных для применения в технологиях аддитивного изготовления изделий.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования элементного состава методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии выполнялись на образцах металлических отходов, использованных в качестве исследуемого материала, представленных фрагментами свёрл из неизвестного по марке сплава. На рисунке 1 показаны данные фрагменты.

В настоящем исследовании для определения химического состава был использован метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии, который выбран благодаря высокой оперативности проведения измерений и сохранности исследуемых образцов [11]. Принцип метода заключается в анализе спектрального распределения вторичного излучения, которое формируется в материале под действием рентгеновского облучения. Уникальные спектральные пики, присущие отдельным элементам, используются для определения качественного состава образца, тогда как величина их интенсивности служит осно-

вой для количественной оценки содержания компонентов [12]. Информация о реальном химическом составе сплава была получена с использованием портативного

рентгенофлуоресцентного анализатора Niton Goldd (производство США), внешний вид которого представлен на рисунке 2.



Рис. 1. Фрагменты металлоотходов из изношенных сверлильных инструментов

Fig. 1. Fragments of metal waste from worn-out drilling tools



Рис. 2. Переносной прибор для рентгенофлуоресцентного анализа Niton Goldd

Fig. 2. Portable X-ray fluorescence analysis device Niton Goldd

Niton Goldd – рентгенофлуоресцентный спектрометр экспертного класса, предназначенный для быстрого и точного определения элементного состава различных материалов в качественном и количественном выражении [13]. Ключевым достоинством прибора является неразруша-

ющий метод анализа на основе энергетической дисперсии, сохраняющий целостность образца [14]. Это свойство критически важно, когда необходимо сохранить первозданные характеристики исследуемого объекта.

Принципиальным преимуществом Niton Goldd выступает его безопасность для образцов. В отличие от химического анализа, который может приводить к изменению структуры материала, рентгенофлуоресцентный анализ обеспечивает сохранность исходных свойств [15].

Спектрометр Niton Goldd отличается высокой скоростью проведения анализа. Получение прецизионных данных занимает считанные секунды, что значительно ускоряет рабочий процесс и повышает производительность. Мобильность и возможность проведения анализа непосредственно на объекте позволяют оперативно принимать решения и сокращают сроки ожидания результатов. Эти факторы определяют эффективность прибора при работе с редкими или деликатными материалами, малейшее изменение которых может критически отразиться на их ценности [16].

Устройство оборудовано встроенной цифровой камерой, обеспечивающей визуализацию зоны анализа непосредственно на дисплее. Наличие режима коллимации Small Spot позволяет оперативно и с высокой точностью проводить идентификацию элементов в диапазоне от Mg до U на участке диаметром около 3 мм без применения дополнительной оптики. Прибор обладает высокой чувствительностью к лёгким элементам (Mg, Al, Si, P, S) и пригоден для исследования металлических сплавов, включая алюминиевые, а также геологических и почвенных образцов, полимерных материалов и других типов сред [17].

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований, отражающие как качественную, так и количественную характеристику химического состава образцов анализируемых металлоотходов, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Итоги аналитического изучения проб металлических отходов

Table 1. Results of the analytical study of metal waste samples

Химический элемент A chemical element	Процентное содержание, % Percentage content, %	Погрешность измерения, $\pm 2\sigma$ Measurement error, 2σ
Fe	72,0	1,8
W	8,1	1,5
Co	4,78	0,89
Mo	6,08	0,32
Cr	5,03	0,76
V	2,33	0,83
C	0,90	—
Cu	0,49	0,25
Mn	0,41	0,37
Ni	0,38	0,29
Si	0,35	—
Zr	0,306	0,045
Pb	0,177	0,093

Идентификация марки исследуемой стали проводилась на основе методиче-

ского алгоритма, схема которого приведена на рисунке 3.

Область поиска:

		Ag			Al			As			B			Be
		Bi			C			Ca			Cd			Ce
		Cl	3	8	Co			Cr			Cu	60	80	Fe
		H			La			Li			Mg			Mn
3	7	Mo			N			Na			Nb			Nd
		Ni			O			P			Pb			S
		Sb			Si			Sn			Ti	1	3	V
3	8	W			Y			Zn			Zr			P3M

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

Поиск.

Проведен поиск материалов, которые соответствуют ВСЕМ критериям ОДНОВРЕМЕННО:

Область поиска: все материалы.					
Хим. состав в % :	Fe 60-80	Mo 3-7	V 1-3	W 3-8	Co 3-8

Число найденных материалов = 1

Теперь найденные материалы можно не только просматривать по одному, но и сравнивать между собой.

Для сравнения отметьте 2 материала и нажмите кнопку:

Сталь инструментальная (1)	
☐	P6M5K5

Характеристика материала P6M5K5

Марка :	P6M5K5
Классификация :	Сталь инструментальная быстрорежущая
Дополнение:	Сталь имеет повышенную склонность к обезуглероживанию, хорошую вязкость, повышенное сопротивление износу, хорошую шлифуемость
Применение:	для черногового и полунитового инструмента при обработке улучшенных легированных и нержавеющей сталей в условиях повышенного разогрева режущей кромки.
Зарубежные аналоги:	Известны

Химический состав в % материала P6M5K5
[ГОСТ 19265 - 73](#)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Co	Cu
0.85 - 0.94	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	до 0.6	до 0.03	до 0.03	3.8 - 4.3	4.8 - 5.3	5.7 - 6.7	1.7 - 2.1	4.7 - 5.2	до 0.25

Рис. 3. Последовательная методика идентификации марки исследуемой стали на основе справочника сталей и сплавов

Fig. 3. A consistent method for identifying the grade of the steel under study based on the directory of steels and alloys.

В соответствии с ранее разработанным и представленным алгоритмом было установлено, что материал режущего инструмента относится к быстрорежущему сплаву марки Р6М5К5. В дальнейшем из металлоотходов указанного сплава осуществляли получение порошкового материала путём последовательной реализации ряда технологических операций.

На начальном этапе проводили комплексную предварительную подготовку металлических отходов, включающую их промывку, термическую сушку, операцию обезжиривания и контрольное взвешивание. Указанный этап технологического процесса представлен на рисунке 4.



Рис 4. Контрольное взвешивание металлоотходов

Fig. 4. Control weighing of metal waste

Реакторный объём заполняли технологической рабочей жидкостью, после чего установленные электроды присоеди-

няли к импульсному генератору. Процесс изготовления электродных элементов представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Этап технологического изготовления электродных элементов

Fig. 5. The stage of technological manufacturing of electrode elements

На втором этапе, связанном с электроэрозионным диспергированием металлоотходов сплава Р6М5К5, осуществляли запуск экспериментальной установки, а также подбор и корректировку параметров и режимов работы, обеспечивающих устойчивое протекание процесса диспергирования.

Третий этап, проиллюстрированный на рисунке 6, включал операции по удалению жидкой фазы путём выпаривания, последующую сушку полученной массы, контрольное определение её массы, а также фасовку и герметичную упаковку. После этого порошкообразный продукт подвергался комплексу исследовательских испытаний.



Рис. 6. Операция концентрирования дисперсного материала путём выпаривания

Fig. 6. The operation of concentrating dispersed material by evaporation

Сравнительный анализ массовых долей химических элементов в исследуемом сплаве Р6М5К5 и в порошковом матери-

але, полученном из исходного сырья методом электроэрозионного диспергирования, приведён в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительная характеристика массовых долей химических элементов в исходных металлоотходах и порошковом материале, полученном методом электроэрозионного диспергирования

Table 2. Comparative characteristics of the mass fractions of chemical elements in the initial metal waste and powder material obtained by electroerosion dispersion

Химический элемент A chemical element	Процентное содержание, % Percentage content, %	
	исследуемого сплава the alloy under study	электроэрозионного порошка electroerosive powder
Fe	72,0	74,62
W	8,1	7,15
Co	4,78	4,85
Mo	6,08	5,192
Cr	5,03	3,91

Окончание табл. 2.

End of Table 2.

Химический элемент A chemical element	Процентное содержание, % Percentage content, %	
	исследуемого сплава the alloy under study	электроэрозионного порошка electroerosive powder
V	2,33	1,85
C	0,9	0,9
Mn	0,41	0,38
Ni	0,38	0,39
Si	0,35	0,35
Cu	0,49	0,28
Zr	0,306	0,040
Pb	0,177	0,093

Результаты сравнительного анализа массовых долей химических элементов в металлоотходах сплава Р6М5К5 и порошковым материале, полученном методом электроэрозионного диспергирования, показали наличие незначительных расхождений. Установлено увеличение относительного содержания Fe, Co, Ni и Sn в порошке при одновременном снижении долей W, Mo, Cr и V. Вероятно, выявленные изменения обусловлены протеканием фазовых превращений [18], сопровождающихся формированием упорядоченных диссипативных наноструктур в веществе [19].

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при разработке и совершенствовании технологий упрочнения материалов, полученных с применением ресурсосберегающих подходов, с целью повышения уровня их эксплуатационных характеристик [20].

Выводы

1. При исследовании элементного состава металлоотходов из быстрорежущих сплавов, предназначенных для переработки в сферические порошковые материалы методом электроэрозионного диспергирования для целей аддитивного производства, применялся портативный спектрометр Niton Goldd. Полученные аналитические данные свидетельствуют о соответствии исследуемых образцов металлоотходов сплаву марки Р6М5К5.

2. Переработка металлоотходов, включая быстрорежущие сплавы, позволит существенно сэкономить ресурсы, снизить зависимость от импорта и укрепить потенциал страны в сфере высоких технологий.

Список литературы

1. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Алтухов А.Ю. Оценка возможности применения электроэрозионных кобальтохромовых порошков для получения изделий методом аддитивного производства // *Металлург.* 2021. № 12. С. 61-64. https://doi.org/10.52351/00260827_2021_12_61. EDN WLWUBF.
2. Кутепов С.Н., Калинин А.А., Гвоздев А.Е. Современные стали для быстрорежущей обработки металлических сплавов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2018. № 10. С. 597-607. EDN YRBJHN.

3. Агеев Е.В., Карпенко В. Ю. Исследование свойств спеченных заготовок из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов быстрорежущей стали // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 4(7). С. 10-16. EDN WXIYTD
4. Ровин С.Л. Перспективы применения ротационных печей. Рециклинг металлоторходов // Металлургия машиностроения. 2018. № 2. С. 2-8. EDN YQNKEF.
5. Тихоновска И.Д. Прогнозирование цен на лом черных металлов как ключевого фактора системы ресурсобеспечения металлургического предприятия // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2016. Т. 15, № 1. С. 97-116. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2016.15.1.006>. EDN VTIKNN.
6. Орехова С.В. Оценка устойчивости экономического роста металлургического комплекса // Вестник НГУЭУ. 2017. № 2. С. 204-220. EDN ZAOWZX.
7. Муратов Н.В. Приоритетные направления обеспечения продовольственной безопасности в условиях негативного внешнеэкономического воздействия // Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право. 2015. № 6. С. 42-45. EDN VVCJFL.
8. Дворник М.И., Михайленко Е.А. Изменение состава порошков твердого сплава при электроэрозионном диспергировании в насыпном слое // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15, № 10(178). С. 478-480. EDN PRKSML.
9. Булычев Н.А. Получение наноразмерных материалов в плазменных разрядах и ультразвуковой кавитации // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59, № 4. С. 600-633. <https://doi.org/10.31857/S0040364421040074>. EDN YLBIYT.
10. Режущий инструмент из спеченных легированных порошковых сплавов / М.Ш. Мигранов, А.М. Мигранов, А.С. Гусев, А.Ф. Садыков // Materials. Technologies. Design. 2020. Т. 2, № 1(2). С. 29-38. EDN EMJABN.
11. 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>. EDN TADUVD.
12. Рентгенофлуоресцентный анализ твердотельных плёнок и покрытий / Ю. А. Игнатова, А.Н. Еритенко, А.Г. Ревенко, А.Л. Цветянский // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15, № 2. С. 126-140. EDN NUCXSN.
13. Булавинов Е.К. Исследование элементного состава наплавленного покрытия лопатки разбрасывателя удобрений // Современные материалы, техника и технологии. 2024. № 5(56). С. 28-32. EDN JGZTTP.
14. Кругляков О.В., Степанов М.Ю., Агеева А.Е. Сравнительный анализ химического состава медьсодержащих металлоотходов и электроэрозионного порошка // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 7(290). С. 11-16. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-7-290-11-16>. EDN KASYPG.
15. Исследование элементного состава компонентов резцов дорожной фрезы методом рентгенофлуоресцентного анализа / Л.П. Кузнецова, К.Ю. Кузнецов, В.И. Колмыков, Б.А. Семенихин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 44-60. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-44-60>. EDN OJONIU.
16. Исследование элементного состава титановых металлоотходов методом рентгенофлуоресцентного анализа / Е.В. Агеев, Е.П. Новиков, В.О. Переверзев, А.Е. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 1. С. 8-18. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-8-18>. EDN ASGQES.
17. Рентгенофлуоресцентный анализ сульфат-иона в водных растворах по методу высушенной капли с использованием портативного спектрометра / Т.Н. Лубкова, О.А. Липатникова, О.Р. Филатова, И.В. Балыкова // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 2. С. 59-67. EDN SNZAGE.

18. Гареев И.С., Собко С.А., Писарев М.С. Прогнозирование зоны разрушения сварного соединения пластин из титанового сплава ОТ4 // Сварочное производство. 2021. № 3. С. 37-42. <https://doi.org/10.34641/SP.2021.1036.3.011>. EDN KGTYNT.

19. Морозов В.В., Гусев В.Г., Морозов А.В. Влияние режима лазерной обработки на упругость титанового сплава ОТ4 // Электрометаллургия. 2022. № 9. С. 2-8. <https://doi.org/10.31044/1684-5781-2022-0-9-2-8>. EDN TRRGSJ.

20. Возможности комбинированного упрочнения металлических материалов волновым деформационным воздействием и последующей термической обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.В. Яшин, С.А. Силантьев, А.О. Фоница // Транспортное машиностроение. 2022. № 11(11). С. 18-23. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-11-18-23>. EDN VYDNVX.

Reference

1. Ageev E.V., Ageeva E.V., Altukhov A.Yu. Evaluation of the possibility of using electroerosive cobalt-chromium powders for the production of products by additive manufacturing. *Metallurg = Metallurg.* 2021;(12):61-64. (In Russ.) https://doi.org/10.52351/00260827_2021_12_61. EDN WLWUBF.

2. Kutepov S.N., Gvozdev A.E. Modern steels for high-speed processing of metal alloys. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences.* 2018;(10):597-607. (In Russ.) EDN YRBJHN.

3. Ageev E.V., Karpenko V.Y. Investigation of the properties of sintered blanks from powders obtained by electroerosion dispersion of high-speed steel waste. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, machinery and technologies.* 2016;4(7):10-16. (In Russ.) EDN WXYTDT.

4. Rovin S.L. Prospects for the use of rotary kilns. Recycling of metal waste. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of mechanical engineering.* 2018;(2):2-8. (In Russ.) EDN YQNKEF.

5. Tikhonovskaya I.D. Forecasting prices for ferrous scrap as a key factor in the resource supply system of a metallurgical enterprise. *Vestnik UrFU. Seriya: Ekonomika i upravlenie = Bulletin of UrFU. Series: Economics and Management.* 2016; 15(1):97-116. (In Russ.) <https://doi.org/10.15826/vestnik.2016.15.1.006>. EDN VTIKNN.

6. Orekhova S.V. Assessment of the sustainability of the economic growth of the metallurgical complex. *Vestnik NGUEU = Bulletin of the NSUEM.* 2017;(2):204-220. (In Russ.) EDN ZAOWZX.

7. Muratov N.V. Priority areas for ensuring food security in the context of negative external economic impact. *Nauchnoe obozrenie. Seriya 1: Ekonomika i pravo = Scientific review. Series 1: Economics and Law.* 2015;(6):42-45. (In Russ.) EDN VVCJFL.

8. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A. Change in the composition of hard alloy powders during electroerosion dispersion in a bulk layer. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings.* 2019;15(10):478-480. (In Russ.) EDN PRKSML.

9. Bulychiev N.A. Production of nanoscale materials in plasma discharges and ultrasonic cavitation. *Teplofizika vysokikh temperature = High temperature thermophysics.* 2021;59(4):600-633. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0040364421040074>. EDN YLBIYT.

10. Migranov M.Sh., Migranov A.M., Gusev A.S., Sadykov A.F. Cutting tools made of sintered alloyed powder alloys. *Materials. Technologies. Design = Materials. Technologies. Design.* 2020;2(1):29-38. (In Russ.) EDN EMJABN.

11. Ageeva E.V., Loktionova O.G., Ulitin D.A. X-ray fluorescence analysis of the elemental composition of tungsten, nickel and copper metal waste. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of 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.

12. Ignatova Yu.A., Yeritenko A.N., Revenko A.G., Tsvetyansky A.L. X-ray fluorescence analysis of solid-state films and coatings. *Analitika i kontrol' = Analytics and control*. 2011;15(2):126-140. (In Russ.) EDN NUCXSN.
13. Bulavinov E.K. Investigation of the elemental composition of the deposited coating of the fertilizer spreader blade. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, machinery and technologies*. 2024;(5):28-32. (In Russ.) EDN JGZTTP.
14. Kruglyakov O.V., Stepanov M.Yu., Ageeva A.E. Comparative analysis of the chemical composition of copper-containing metal waste and electroerosion powder. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Volgograd State Technical University*. 2024;(7):11-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-7-290-11-16>. EDN KASYPG.
15. Kuznetsova L.P., Kuznetsov K.Y., Kolmykov V.I., Semenikhin B.A. The study of the elemental composition of the components of road milling cutters by X-ray fluorescence analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023;13(3):44-60. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-44-60>. EDN OJOHIU.
16. Ageev E.V., Novikov E.P., Pereverzev V.O., Ageeva A.E. Investigation of the elemental composition of titanium metal waste by X-ray fluorescence analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(1):8-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-8-18>. EDN ASGQES.
17. Lubkova T.N., Lipatnikova O.A., Filatova O.R., Balykova I.V. X-ray fluorescence analysis of sulfate ion in aqueous solutions using the dried drop method using a portable spectrometer. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya = Bulletin of the Moscow University. Series 4: Geology*. 2022;(2):59-67. (In Russ.) EDN SNZAGE.
18. Gareev I.S., Sobko S.A., Pisarev M.S. Forecasting the fracture zone of the welded joint of plates made of titanium alloy OT4. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production*. 2021;(3):37-42. (In Russ.) <https://doi.org/10.34641/SP.2021.1036.3.011>. EDN KGTYNT.
19. Morozov V.V., Gusev V.G., Morozov A.V. Influence of the laser treatment mode on the elasticity of titanium alloy OT4. *Elektrometallurgiya = Electrometallurgy*. 2022;(9):2-8. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-5781-2022-0-9-2-8>. EDN TRRGS1.
20. Kirichek A.V., Solovyov D.L., Yashin A.V., Silantyev S.A., Fonina A.O. Possibilities of combined hardening of metallic materials by wave deformation and subsequent heat treatment. *Transportnoe mashinostroenie = Transport engineering*. 2022;11(11):18-23. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-11-18-23>. EDN VYDNVX.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Степанов Михаил Юрьевич, аспирант кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: hard-bass2016@yandex.ru

Mikhail U. Stepanov, Postgraduate Student of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: hard-bass2016@yandex.ru

Гладских Иван Романович, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: gladikivan88@gmail.com

Ivan R. Gladskikh, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: gladikivan88@gmail.com

Мищенко Виталий Викторович, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vvitz0851@gmail.com

Vitaly V. Mishchenko, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vvitz0851@gmail.com

Табольская Наталья Владимировна, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: N.tabolskaya@mail.ru

Natalia V. Tabolskaya, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: N.tabolskaya@mail.ru