

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-55-64>

Рентгенофлуоресцентный анализ элементного состава металлоотходов титана

А.С. Великанов¹✉¹ Юго-Западный государственный университет

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

✉ e-mail: velikanov_alexander@mail.ru

Резюме

Целью данной работы являлось проведение рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава отобранного металлоотхода и определение маркировки сплава, преимущественно состоящего из титана, планируемого к переработке методом электроэрозионного диспергирования для получения порошка, применимого в аддитивных технологиях.

Методы. Для установления элементного состава титансодержащего сплава неизвестной марки был отобран образец в виде металлической пластины длиной 530 мм, шириной 144 мм и толщиной 4 мм. Анализ выполнялся с использованием портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра Niton XL3t. Перед измерениями поверхность образца была очищена, а каждая точка анализировалась не менее трёх раз для повышения достоверности. Метод рентгенофлуоресцентного анализа обеспечивает оперативное и неразрушающее определение элементного состава сложных материалов без применения эталонных образцов, позволяя проводить локальный точечный анализ с высокой точностью и скоростью (до 10 с), что особенно важно при исследовании потенциально неоднородных объектов.

Конструктивные особенности прибора Niton XL3t обеспечивают возможность проведения локализованного точечного анализа поверхности исследуемых объектов, что имеет принципиальное значение при работе с материалами, потенциально характеризующимися структурной или химической неоднородностью. Для определения соответствия фактического химического состава нормативным требованиям, указанным в марочнике сталей и ГОСТ 19807–91, проведено сопоставление экспериментально определённых концентраций элементов с теоретическим составом сплава.

Результаты. Проведённый рентгенофлуоресцентный анализ элементного состава титансодержащих металлоотходов с использованием портативного спектрометра Niton XL3t позволил достоверно установить, что исследуемый образец соответствует марке сплава BT1-2.

Заключение. Полученные результаты формируют научно-методическую основу для последующих исследований по переработке данных металлоотходов методом электроэрозионного диспергирования с целью получения сферических порошков, применимых в аддитивных технологиях.

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

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

Для цитирования: Великанов А.С. Рентгенофлуоресцентный анализ элементного состава металлоотходов титана // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 4. С. 55–64. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-55-64>.

Поступила в редакцию 07.11.2025

Подписана в печать 02.12.2025

Опубликована 25.12.2025

X-ray fluorescence analysis of the elemental composition of Titanium metal waste

Aleksandr S. Velikanov¹

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

✉ e-mail: velikanov_alexander@mail.ru

Abstract

The purpose of this work was to conduct X-ray fluorescence analysis of the elemental composition of a sample of metal waste and determine the alloy grade, primarily titanium, planned for processing by electrical discharge dispersion to produce powder suitable for additive manufacturing.

Methods. To determine the elemental composition of a titanium-containing alloy of unknown grade, a metal plate sample measuring 530 mm in length, 144 mm in width, and 4 mm in thickness was collected. Analysis was performed using a Niton XL3t portable X-ray fluorescence spectrometer. Before measurements, the sample surface was cleaned, and each point was analyzed at least three times to enhance reliability. X-ray fluorescence analysis provides rapid and non-destructive determination of the elemental composition of complex materials without the use of reference samples, enabling localized spot analysis with high accuracy and speed (up to 10 seconds), which is especially important when studying potentially heterogeneous objects.

The design features of the Niton XL3t instrument enable localized spot analysis of the surface of the test objects, which is crucial when working with materials potentially characterized by structural or chemical heterogeneity. To determine whether the actual chemical composition complies with the regulatory requirements specified in the steel grade list and GOST 19807–91, a comparison was made between the experimentally determined concentrations of elements and the theoretical composition of the alloy.

Results. X-ray fluorescence analysis of the elemental composition of titanium-containing metal waste using a Niton XL3t portable spectrometer reliably established that the sample corresponds to the VT1-2 alloy grade.

Conclusion. The obtained results form the scientific and methodological basis for subsequent research on the processing of these metal wastes using electrical discharge dispersion to produce spherical powders applicable in additive manufacturing.

Keywords: titanium; waste; X-ray fluorescence analysis; elemental analysis.

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

For citation: Velikanov A.S. X-ray fluorescence analysis of the elemental composition of Titanium waste. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(4):55-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-55-64>.

Received 07.11.2025

Accepted 02.12.2025

Published 25.12.2025

Введение

Высокая интенсивность развития технологии аддитивного производства формирует комплекс научно-технических задач, решение которых требует своевременной проработки и практической реализации [1].

В условиях усиления внешних санкционных ограничений одним из приоритетных направлений является создание

отечественных технологических процессов по переработке металлоотходов путем выпуска из них малотоннажных партий сферических металлических порошков регламентированных марок и дисперсного состава [2]. К числу металлических отходов, рециклинг которых способствует снижению технологической зависимости и укреплению импортозамещения Российской Федерации, относятся отходы титановых сплавов [3]. Их востребованность

определяется совокупностью эксплуатационных характеристик, обеспечиваемых использованием дорогостоящих легирующих элементов [4]. Титановые сплавы занимают ключевые позиции среди материалов, применяемых в аддитивных технологиях [5], и широко используются в машиностроении, авиационно-космической отрасли, энергетике и других высокотехнологичных сферах [6–8].

Электроэрозионное диспергирование (ЭЭД) титаносодержащих металлоотходов с последующим применением полученных порошков вызывает значительный научный и практический интерес [9]. Метод ЭЭД, несмотря на отсутствие промышленного внедрения, обладает рядом существенных преимуществ. Получаемый порошок обладает высокой дисперсностью. Переработку металлоотходов можно производить малыми партиями с низким потреблением электроэнергии, при этом сохраняя высокий показатель экологичности процесса [10].

Однако свойства целевого порошкового материала и, соответственно, каче-

ство восстановленного сплава в значительной степени зависят от структурного и элементарного состава исходных отходов, которые на сегодняшний день могут быть получены методом рентгенофлуоресцентного анализа образцов [11].

Целью данного исследования являлось проведение рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава отобранного металлоотхода и определения маркировки сплава, преимущественно состоящего из титана, планируемого к переработке методом электроэрозионного диспергирования для получения порошка, применимого в аддитивных технологиях.

Материалы и методы

Для установления элементарного химического состава сплава неизвестной марки, преимущественно состоящего из титана, на предприятии, специализирующемся на сборе и рециклинге металлического лома, был отобран образец металлической пластины длиной 530 мм, шириной 144 мм и толщиной 4 мм (рис. 1).



Рис. 1. Образец титановой пластины

Fig. 1. Sample of titanium plate

Определение фактического химического состава металлоотходов выполнялось с использованием портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра Niton XL3t (рис. 2, а, б) [12; 13]. Перед проведением измерений поверхность ти-

танового образца была предварительно очищена для исключения влияния следов поверхностных загрязнений. Для повышения достоверности результатов каждая точка анализировалась не менее трёх раз [14].



Рис. 2. Процесс измерения образца: а – используемая модель спектрометра Niton XL3t; б – отображаемые показатели элементарного состава

Fig. 2. Sample measurement process: а – Niton XL3t spectrometer model used; б – elemental composition readings displayed

Применение портативного рентгенофлуоресцентного анализа обосновано его высокой точностью, скоростью и производительностью [15]. Идентификация металлов и сплавов осуществляется в коротком временном диапазоне (до 10 с), при этом исследуемые образцы сохраняют свои физико-химические характеристики, а метод не предполагает использование внешних эталонных образцов [16].

Рентгенофлуоресцентный метод основан на регистрации спектра вторичного излучения, возникающего при воздей-

ствии на материал рентгеновского излучения высокой интенсивности. Конструктивные параметры прибора обеспечивают выполнение локального точечного анализа поверхности исследуемых объектов, что особенно важно при изучении потенциально неоднородных материалов [17; 18].

Результаты и их обсуждение

Данные об элементарном составе образцов исследуемой титановой пластины представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследования образцов металлоотходов

Table 1. Results of the study of metal waste samples

Химический элемент A chemical element	Процентное содержание, % Percentage content, %	Погрешность измерения, $\pm 2\delta$ Measurement error, 2δ
Ti	98,95	0,26
Fe	0,658	0,068
Cu	0,018	0,003
Zn	0,030	0,010
Zr	0,003	0,001
Pb	0,023	0,006
Прочие	0,32	—

С помощью марочника сталей, в который были введены полученные спектрометром данные об химическом составе,

был произведен поиск материалов, соответствующих критериям (рис. 3).

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	
				0.4	1
Cl	Co	Cr	Cu	Fe	
H	La	Li	Mg	Mn	
Mo	N	Na	Nb	Nd	
Ni	O	P	Pb	S	
			98.95	99.95	
Sb	Si	Sn	Ti	V	
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

а

Поиск.

Произведен поиск материалов, которые соответствуют ВСЕМ критериям ОДНОВРЕМЕННО:

Область поиска: все материалы.		
Хим. состав в % :	Fe 0.4-1	Ti 98.95-99.95

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: Сравнить свойства материалов

Титан, сплав титана (1)
☒ BT1-2

б

Рис. 3. Процесс идентификации марки сплава: а – ввод данных о массовой доле химических элементов; б – результаты поиска с отображением наименования материала и его элементного состава

Fig. 3. The process of identifying the alloy grade: а – entering data on the mass fraction of chemical elements; б – search results displaying the name of the material and its elemental composition

Характеристика материала ВТ1-2

Марка :	ВТ1-2
Классификация :	Титан технический
Применение:	для изготовления полуфабрикатов (листов, лент, фольги, полос, плит, прутков, профилей, труб, поковок и штампованных заготовок) методом деформации, а также слитков
Зарубежные аналоги:	Нет данных

Химический состав в % материала ВТ1-2
ГОСТ 19807 - 91

Fe	C	Si	N	Ti	O	H	Примесей
до 1.5	до 0.1	до 0.15	до 0.15	97.8 - 99.7	до 0.3	до 0.01	прочих 0.3

Примечание: Ti - основа; процентное содержание Ti дано приблизительно

Механические свойства при T=20°C материала ВТ1-2 .

Сортамент	Размер	Напр.	σ_B	σ_T	δ_5	ψ	КСУ	Термообр.
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	-
Пруток отожжен., ГОСТ 26492-85			590-930		8	17	250	

В

Рис. 3. Процесс идентификации марки сплава: в – наименование полученного сплава**Fig. 3.** The process of identifying the alloy grade: в – the name of the resulting alloy

Для оценки соответствия фактического химического состава нормативным требованиям проведено сопоставление экспериментально определённых концентраций элементов с теоретическим (регламентированным) составом сплава, представленным в марочнике. Было установ-

лено, что исследуемый образец изготовлен из титаносодержащего сплава марки ВТ1-2. Результаты сравнительного анализа, позволяющие выявить отклонения и оценить точность соответствия фактического состава установленным стандартам, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение химического состава сплава, полученного экспериментально, с теоретически рассчитанными значениями**Table 2.** Comparison of the chemical composition of the alloy obtained experimentally with theoretically calculated values

Химический элемент A chemical element	Процентное содержание, % Percentage content, %	
	исследуемый сплав the alloy under study	сплав ВТ1-2 по ГОСТ 19807-91 alloy VT1-2 according to GOST 19807-91
Ti	98,95	97,8 – 99,7
Fe	0,658	до 1,5
Cu	0,018	до 0,3
Zn	0,030	до 0,3
Zr	0,003	до 0,3
Pb	0,023	до 0,3

Окончание табл. 2**End of Table 2**

Химический элемент A chemical element	Процентное содержание, % Percentage content, %	
	исследуемого сплава the alloy under study	сплава BT1-2 по ГОСТ 19807-91 alloy VT1-2 according to GOST 19807-91
O	–	до 0,2
Si	–	до 0,1
C	–	до 0,07
N	–	до 0,04
H	–	до 0,01
Прочие	0,32	0,3

Сравнительный анализ массового содержания химических элементов в исследуемом металлоотходе относительно нормативного состава титансодержащего сплава BT1-2 показал наличие незначительных расхождений. Так, в образце не были выявлены элементы O, Si, C, N и H. Это может свидетельствовать о том, что их концентрации находятся на пределе обнаружения метода (не превышают 0,1%) либо полностью отсутствуют, что объясняет зарегистрированные отклонения от нормативного состава [19; 20].

Подобные результаты подтверждают высокую степень соответствия исследуемого металлоотхода установленным стандартам и позволяют заключить о его пригодности для последующей переработки.

Выводы

Проведённый рентгенофлуоресцентный анализ элементного состава титан-

содержащих металлоотходов с использованием портативного спектрометра Niton XL3t позволил достоверно установить, что исследуемый образец соответствует марке сплава BT1-2. Полученные результаты формируют научно-методическую основу для последующих исследований по переработке данных металлоотходов методом электроэрозионного диспергирования с целью получения сферических порошков, применимых в аддитивных технологиях. Реализация процессов реновации титансодержащих отходов способствует эффективному использованию ресурсов, поддерживает политику импортозамещения и укрепляет технологический суверенитет Российской Федерации, что подчёркивает актуальность и практическую значимость проведённого исследования.

Список литературы

1. Ловшенко Ф.Г., Федосенко А.С., Марукович Е.И. Теоретические и технологические аспекты получения механически легированных порошков для производства покрытий и изделий аддитивными методами // Литье и металлургия. 2021. № 4. С. 90-105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-4-90-105>. EDN ETYEQU.
2. Ровин С.Л., Калинин А.С., Ровин Л.Е. Возвращение дисперсных металлоотходов в производство // Литье и металлургия. 2019. № 1. С. 45-48.

3. 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.
4. Исследование условий горячей деформации аддитивно выращенных заготовок из титанового сплава ВТ6 с применением конечно-элементного моделирования / А.Н. Кошмин, А.С. Алещенко, П.В. Патрин, П.Ю. Соколов, А.В. Зиновьев // Metallurg. 2020. № 11. С. 100-106. EDN WEMEVE.
5. Джандиери Г.В. Диагностика эффективности и оптимизация организационно-экономической системы рециклинга черных металлов // Черные металлы. 2020. № 1. С. 56-62.
6. Различные методы повышения износостойкости титановых сплавов и сравнительный анализ их эффективности применительно к титановому сплаву ВТ23М / С.В. Путырский, А.А. Арисланов, Н.И. Артеменко, А.Л. Яковлев // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1(50). С. 19-24. <https://doi.org/10.18577/2071-9240-2018-0-1-19-24>. EDN YNGXOH.
7. Орыщенко А.С., Леонов В.П., Михайлов В.И. Титановые сплавы для глубоководной морской техники // Вопросы материаловедения. 2021. № 3(107). С. 238-246. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2021-107-3-238-246>. EDN YOLEKN.
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. № 1-1 (40). С. 182-189.
9. Романов И.В., Задорожний Р.Н. Выделение мелкодисперсной фракции порошков, полученных методом электроэрозионного диспергирования // Технический сервис машин. 2020. № 3(140). С. 119-127. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-3-119-127>. EDN CRMZLZ.
10. 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.
11. 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. № 5-1 (38). С. 138а-144.
12. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 5-2 (44). С. 99-102.
13. Ревенко А.Г., Пашкова Г.В. Рентгенофлуоресцентный анализ: современное состояние и перспективы развития // Журнал аналитической химии. 2023. Т. 78, № 11. С. 980-1001. <https://doi.org/10.31857/S0044450223110130>. EDN MNFDQX.
14. 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.
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. 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. Бадинова // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19, № 14. С. 63-65.

17. Бахтиаров 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.
18. Полякова М.А., Босикова Е.Ю. Особенности применения рентгенофлуоресцентного анализа для определения состава материалов // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2017. № 16. С. 92-98.
19. Агеева Е.В., Королев М.С., Воробьев Ю.С. Исследование элементного состава свинцово-сурьмянистых сплавов методом рентгенофлуоресцентного анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10, № 4. С. 8-21. EDN AHKNLQ.
20. Математическое моделирование процесса упрочняющей обработки титановых сплавов BT20 и OT4 / А.В. Филонович, И.В. Ворначева, А.А. Чуйченко, Е.А. Болотников // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17, № 10(202). С. 476-480. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-10-476-480>. EDN KNUDWX.

Reference

1. Lovshenko F.G., Fedosenko A.S., Marukovich E.I. Theoretical and technological aspects of obtaining mechanically alloyed powders for the production of coatings and products by additive methods. *Lit'e i metallurgiya = Casting and metallurgy*. 2021;(4):90-105. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-4-90-105>. EDN ETYEQU.
2. Rovin S.L., Kalinichenko A.S., Rovin L.E. The return of dispersed metal waste to production. *Lit'e i metallurgiya = Casting and metallurgy*. 2019;(1):45-48. (In Russ.)
3. Tatarkin A.I., Romanova O.A., Dyubarov V.G., Dushin A.V., Bryantseva O.S. Trends and prospects of metal recycling development. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2013;(5):4-10. (In Russ.)
4. Koshmin A.N., Aleshchenko A.S., Patrino P.V., Sokolov P.Yu., Zinoviev A.V. Investigation of the conditions of hot deformation of additively grown billets from titanium alloy VT6 using finite element modeling. *Metallurg = Metallurg*. 2020;(11):100-106. (In Russ.) EDN WEMEEV.
5. Jandieri G.V. Diagnostics of efficiency and optimization of the organizational and economic system of recycling of ferrous metals. *Chernye metally = Ferrous metals*. 2020;(1):56-62. (In Russ.)
6. Putyrsky S.V., Arislanov A.A., Artemenko N.I., Yakovlev A.L. Various methods of increasing the wear resistance of titanium alloys and a comparative analysis of their effectiveness in relation to the VT23M Titanium alloy. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2018;(1):19-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2071-9240-2018-0-1-19-24>. EDN YNGXOH.
7. Oryshchenko A.S., Leonov V.P., Mikhailov V.I. Titanium alloys for deep-sea marine engineering. *Voprosy materialovedeniya = Issues of materials science*. 2021;(3):238-246. (In Russ.) <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2021-107-3-238-246>. EDN YOLEKN.
8. Ageev E.V., Gadalov V.N., Ageeva E.V., Bobryshev R.V. 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 Southwest State University*. 2012;(1-1):182-189. (In Russ.)
9. Romanov I.V., Zadorozhny R.N. Isolation of the fine fraction of powders obtained by the method of electroerosive dispersion. *Tekhnicheskii servis mashin = Technical service of machines*. 2020;(3):119-127. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-3-119-127>. EDN CRMZLZ.
10. Ageev E.V., Latypova G.R., Davydov A.A., Ageeva E.V. Evaluation of the effectiveness of the use of carbide electroerosion powders as an electrode material. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Southwest State University*. 2025;15(4):55-64.

darstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = *Proceedings of Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2012;(1):19-22. (In Russ.)

11. Ageev E.V., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. Investigation of the chemical composition of powders obtained by electroerosive dispersion of a hard alloy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Southwest State University*. 2011;(5-1):138a-144. (In Russ.)

12. Ageev E.V., Latypova G.R., Davydov A.A., Ageeva E.V. Conducting X-ray spectral micro-analysis of carbide electroerosion powders. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Southwest State University*. 2012;(5-2):099-102. (In Russ.)

13. Revenko A.G., Pashkova G.V. X-ray fluorescence analysis: current state and prospects of development. *Zhurnal analiticheskoi khimii = Journal of Analytical Chemistry*. 2023;78(11):980-1001. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0044450223110130>. EDN MNFDQX.

14. Nartsev V.M., Atkarskaya A.B. 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;82(3):29-35. (In Russ.)

15. Kuznetsova L.P., Kuznetsov K.Yu., Kolmykov V.I., Semenikhin B.A. Investigation 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. Karolin E.A., Zhelonkin Ya.O., Oparin A.V., Vasiliev V.A., Akhmetova L.T., Badikova G.R. 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;19(14):63-65 (In Russ.)

17. Bakhtiarov A.V., Saveliev S.K. Methodology of the modified standard-background method for X-ray fluorescence analysis of complex multicomponent objects. *Zhurnal analiticheskoi khimii = Journal of Analytical Chemistry*. 2020;75(1):24-30. (In Russ.)

18. Polyakova M.A., Baskova E.Yu. 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;16:92-98. (In Russ.)

19. Ageeva E.V., Korolev M.S., Vorobyov Yu.S. Investigation of the elemental composition of lead-antimony alloys by X-ray fluorescence analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2020;10(4):8-21. (In Russ.) EDN AHKNLQ.

20. Filonovich A.V., Vornacheva I.V., Chuichenko A.A., Bolotnikov E.A. Mathematical modeling of the process of hardening treatment of Titanium alloys VT20 and OT4. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2021;17(10):476-480. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-10-476-480>. EDN KNUDWX.

Информация об авторе / Information about the Author

Великанов Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры архитектуры, градостроительства и графики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: velikanov_alexander@mail.ru,
ORCID: 0009-0006-3226-7473

Aleksandr S. Velikanov, Senior Lecturer at the Department of Architecture, Urban Planning and Graphics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: velikanov_alexander@mail.ru,
ORCID: 0009-0006-3226-7473