

31. Matyunin V. M. et al. Control of mechanical properties of dissimilar welded joints of different structure class steels. *Electron-Beam Welding and Related Technology: Proceedings of the 3rd International Conference*. 2020. pp. 530–537.
32. Syrkov A. G., Kushchenko A. N., Sillivanov M. O., Taraban V. V. Nanostructured regulation of the surface properties and hydrophobicity of nickel and iron by solid-state reduction and modifying methods. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 5. pp. 54–59.
33. Murataev F. I., Zagidullin A. D. Ensuring resistance of austenitic steel weld joints to intercrystalline corrosion. *Vestnik of Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev*. 2019. Vol. 75, No. 2. pp. 45–50.
34. Smirnov A. N. et al. Impact of extended temperature-force actions on the structural and phase state of the weld joint in steel 12Kh18N10T. *Basic Problems of Material Science*. 2018. Vol. 15, No. 3. pp. 434–441.
35. Smirnov A. N. et al. The structure of 12Kh18N10T steel weld joints and its features depending on the way heat is introduced during fusion welding. *Svarka i Diagnostika*. 2020. No. 5. pp. 24–29.
36. Timofeev A. V. et al. Operational analysis and medium-term forecasting of the greenhouse gas generation intensity in the cryolithozone. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, Iss. 11. 1466.
37. Dzhabbarov S. N., Pryakhin E. I. Development of heat treatment mode with quenching in different quenching environments for the casing pipe in order to obtain the required mechanical properties. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 836. pp. 41–45.
38. Bazhin V. Yu. et al. A contemporary view on the anomalies in the groups of metals of the Mendeleev Periodic Table. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2019. Vol. 239. pp. 520–527. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.520.

Исследование структуры и свойств серебряного рубля 1823 года

УДК 336.746.13



В. Ю. Бажин,
заведующий кафедрой металлургии,
докт. техн. наук, профессор



А. П. Суслов,
проректор по эксплуатации и развитию
имущественного комплекса



О. А. Горшкова,
студентка 4-го курса факультета переработки
минерального сырья

Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Развитие монетного дела тесно связано с обеспечением сырьем, в частности с проблемами обеднения минерально-сырьевой базы, в том числе по запасам благородных металлов. В связи с этим, наряду с современными подходами, необходимо учитывать исторические традиции в области освоения и подготовки сырья к переработке [1–4].

В связи с научно-практическим интересом и опытом предыдущих исследований [5–9] представляется актуальным изучение структуры и свойств серебряных изделий на наноразмерном уровне при помощи современного оборудования [10–12].

В России производство изделий из серебра определяется наличием рудных запасов, которые в настоящее время неуклонно снижаются [13–15]. Серебряные

Проведено исследование структуры и свойств серебряного рубля, изготовленного на Санкт-Петербургском Монетном дворе в 1823 г. под руководством выпускника Горного кадетского корпуса (Горного университета) минцмейстера Павла Данилова. Исследование выполнено на высокотехнологичном оборудовании научных центров Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. Впервые структуру серебряных монет изучали рентгеноструктурным методом анализа на наноразмерном уровне с применением сканирующего электронного микроскопа. Получены новые данные по структурным особенностям и распределению примесей, позволяющие объяснить технологические особенности серебряного передела при изготовлении монет того периода времени. Изменение твердости на некоторых участках поверхности серебряной монеты указывает на отклонение химического состава между ее реверсом и аверсом. Также исследовали образцы рудных материалов Нерчинского рудника и серебряные изделия минцкабинета Горного музея. Данная работа выполнена в рамках научного направления «Историко-культурного наследие России и развитие научного познания».

Ключевые слова: наноразмерные структуры, серебряный рубль, монетное дело, Горный институт, Горный музей, наноструктура, проба, рентгенофазовый анализ, спектроскопия, электронный микроскоп, примеси, сканирующая микроскопия.

DOI: 10.17580/tsm.2023.08.14

руды Нерчинского месторождения (Алтайский край), которые были основным сырьем для производства императорских монет и изделий, практически исчерпали себя [16]. Уже в конце XIX в. предпринимали попытки чеканки императорских монет на Монетных дворах Варшавы, Брюсселя и Парижа после переплава талеров и перечеканки других серебряных монет [17–19].

В данной работе с применением современных средств измерения и анализа выполнено исследование серебряной монеты 1823 г. Выбор материала для исследований связан с 250-летним юбилеем Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

© Бажин В. Ю., Суслов А. П., Горшкова О. А., 2023



Рис. 1. Серебряный рубль 1823 г.

Существующий уровень оборудования и технологий позволяет «заглянуть в глубь веков» и узнать истинную картину и особенности производства серебряных изделий, оценить достоинства и умения мастеров того времени по сравнению со специалистами и технологиями настоящего. Впервые применены методы электронной микроскопии для изучения структурных особенностей серебряных изделий на наноразмерном уровне.

Материалы и методика исследования

Объектом исследования является императорская серебряная монета номиналом в 1 рубль 1823 г. выпуска (рис. 1). Дизайн образца рубля относится к 3-му типу, который выпускали с 1810 г. и до конца правления Александра I (1801–1825 гг.) [20–23]. Согласно данным работы [6], только в годы правления Александра I дизайн изменялся трижды. На гурте монеты стоит знак минцмейстера Павла Данилова — ПД, который занимал эту должность на Санкт-Петербургском Монетном дворе более 13 лет (с 1820 по 1838 г.).

Павел Федорович Данилов (1791–1838) был одним из лучших учеников профессора Петра Григорьевича Соболевского [14, 15], известного российского металлурга, химика и инженера-конструктора, члена-корреспондента Петербургской Академии наук, основоположника порошковой металлургии. Следует отметить, что вместе с ним в 1828 г. впервые в истории монетного дела Павел Данилов смог наладить чеканку платиновых монет [24].

В центре аверса (см. рис. 1) размещена надпись в четыре строки: «ЧИСТАГО» «СЕРЕБРА» «4 ЗОЛОТН.» «21 ДОЛЯ.». Над надписью расположена императорская корона, под надписью под прямой чертой — обозначение Санкт-Петербургского монетного двора «С.П.Б.». Вдоль канта, не доходя до короны, изображен венок из лавровой и дубовой ветвей, которые в нижней части переплетены лентой. В центре реверса изображен Государственный герб Российской империи — двуглавый орел с поднятыми вверх распущенными крыльями. Головы орла увенчаны коронами, и непосредственно над ними находится третья большая корона.

На груди орла расположен Московский герб — щит с изображением Георгия Победоносца, поражающего копьём дракона. Вокруг щита — цепь с орденом св. апостола Андрея Первозванного. В правой лапе орла — скипетр, в левой — держава. Буквы «П» и «Д» под правой и левой лапами соответственно являются инициалами минцмейстера Павла Данилова. Слева от герба выполнена круговая надпись «МОНЕТА», справа — «РУБЛЬ». Под инициалами минцмейстера указана дата выпуска монеты «1823». Все три надписи разделены между собой

тремя шестиконечными звездами. По окружности канта имеются рельефные элементы и надписи, выполненные в виде зубцов.

На гурте расположены буквы СПБ-ПД. Диаметр монеты 35 мм, масса 20,57 г. Тираж выпуска серебряного рубля 1823 г. — 2 955 000 шт.

Значение пробы определяли историческим способом пробирного анализа — методом гидростатического взвешивания, который можно перевести в метрическую систему [24]. Пробу серебряной монеты для золотниковой системы можно перевести в современную метрическую, как и делают в настоящее время. Для этого указанное на клейме число 84 необходимо разделить на 96 и умножить 1000. Так, проба образца имеет значение $(84/96) \cdot 1000 = 875$, что подтверждено методом гидростатического взвешивания.

С целью повышения физико-химических характеристик серебра и изделий из него в расплав вводят медь и другие добавки, способствующие повышению стойкости к коррозии и улучшению механических свойств. Ввиду свойства меди снижать уровень потемнения поверхности, именно ее чаще всего использовали в качестве легирующего материала, изменяя пробу — соотношение массы чистого металла к общей массе монеты. Пробу можно обозначать различными способами, но в настоящее время общепринятым стандартом является обозначение в промилле (тысячных долях), т. е. практически на наноразмерном уровне. В дореволюционной России пробу обозначали в золотниковой системе, где 96 — чистый металл, 72 — 3/4 чистого металла, 48 — половина чистого металла. Следует отметить, что эта тенденция в ювелирном и монетном деле сохранилась до сих пор [25, 26]. В исследовании были применены электронная микроскопия [27, 28] и рентгенофазовый анализ [29]. Анализ образца серебряного рубля 1823 г. выполнили с применением сканирующего электронного микроскопа (Scanning Electron Microscope, SEM) Hitachi-3400N методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS). Изучены морфология и распределение элементов на поверхности серебряных

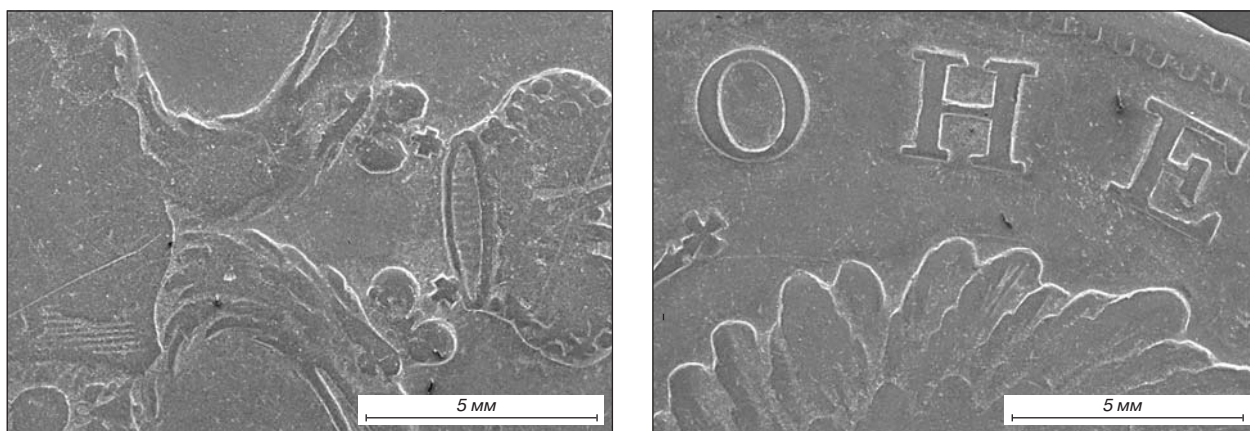


Рис. 2. SEM-изображения серебряного рубля 1823 г. при умеренном приближении (реверс)

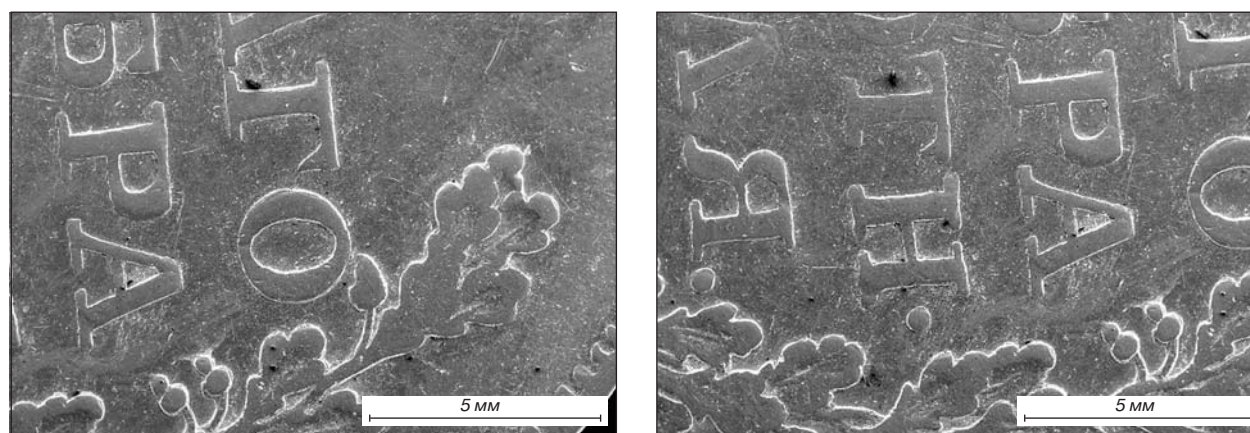


Рис. 3. SEM-изображения серебряного рубля 1823 г. при умеренном приближении (аверс)

монет. SEM-изображения получены при режимах 10 кВ и 20 мА с использованием детектора вторичных электронов (UDV) и детектора обратнорассеянных электронов (BSE). Перед проведением исследования для удаления поверхностных загрязнений образцы монет очищали ультразвуком в ацетоне, этаноле и дистиллированной деионизированной воде в течение 30 мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Первичное исследование образца после ультразвуковой очистки при умеренном приближении позволило оценить поверхность монет и выявить характерные участки для анализа (рис. 2–5). На поверхности монеты видны однородные участки, а также места коррозии, сколы, трещины и другие механические повреждения, полученные при изготовлении, полировке и использовании монеты. С применением микроскопа SEM локализованы (рис. 6–9) две области для

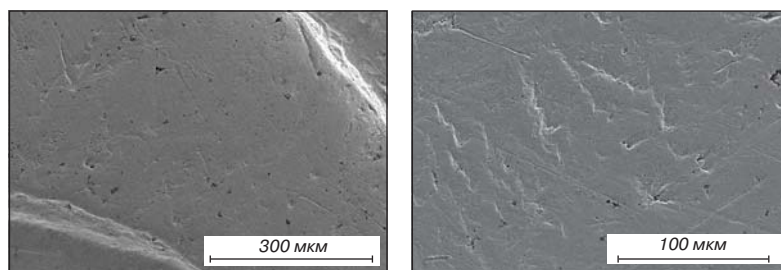


Рис. 4. SEM-изображения однородных участков поверхности серебряного рубля 1823 г.

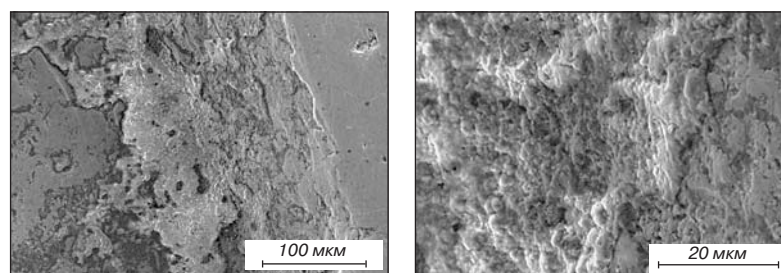


Рис. 5. SEM-изображения участков коррозии и загрязнений органического происхождения серебряного рубля 1823 г.

EDS-анализа: однородные серебряные поверхности монет и участки монет с коррозией металла и загрязнениями органического происхождения (затемненные участки на изображениях SEM). Основными

составляющими элементами однородных участков поверхности серебряных монет являются серебро и медь. Содержание серебра в образце по аверсу и реверсу изменяется от 92 до 95 %. Анализом коррозионных и загрязненных участков установлено присутствие Fe, Si, C и O [30]. Элементным картированием образцов подтверждена концентрация серебра на однородных серебряных поверхностях (желтая стрелка на рис. 9), а также содержание Cu,

Fe, Si, Cd и других элементов на загрязненных поверхностях монет. Полученные результаты SEM- и EDS-анализа соответствуют аналогичным исследованиям средневековых серебряных монет Центральной Европы [31], а также серебряных монет нашего времени [32].

Как видно из рис. 7, кадмий равномерно распределен в основной матрице, что в конечном итоге будет определять величину твердости монеты.

Таблица 1

Содержание Ag и Cu на аверсе и реверсе серебряного рубля 1823 г. на различных участках поверхности, %

Элемент		Точка		
		1	2	3
Ag	Аверс	92,68	91,59	94,56
	Реверс	91,61	91,68	94,23
Cu	Аверс	1,74	1,5	1,02
	Реверс	1,76	2,27	0,73

Далее выполнен EDS-анализ участков образца серебряного рубля 1823 г. с загрязненной поверхностью и следами патины. Полученные результаты представлены на рис. 8 и 9.

В табл. 1 представлены данные металлографического анализа аверса и реверса серебряного рубля 1823 г. в разных точках.

По результатам картирования (см. рис. 8 и 9) видно, что присутствует незначительная ликвация меди между аверсом и реверсом монеты. При этом наблюдается диффузия кадмия (см. рис. 7) в края монеты. Наличие меди, цинка и кадмия (см. рис. 6) в образцах серебряной пластины и кружков согласуется с данными отобранных проб руды Нерчинского рудника (см. рис. 1), и анализами проб Нерчинского сереброплавильного завода — основного поставщика серебряных заготовок для Монетного двора Санкт-Петербурга до 1853 г. [33]. Можно утверждать, что в те годы дополнительное

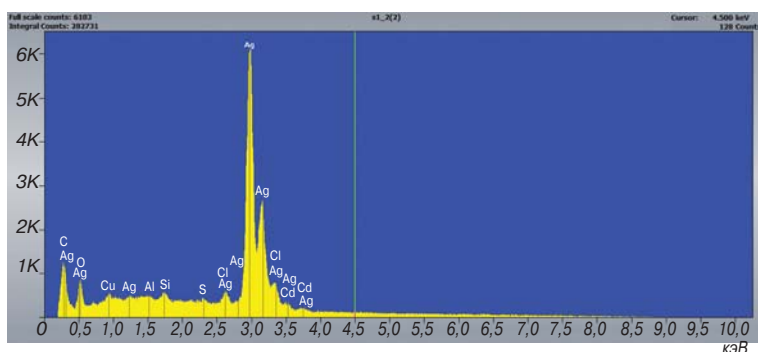


Рис. 6. EDS-анализ однородной поверхности серебряного рубля 1823 г.

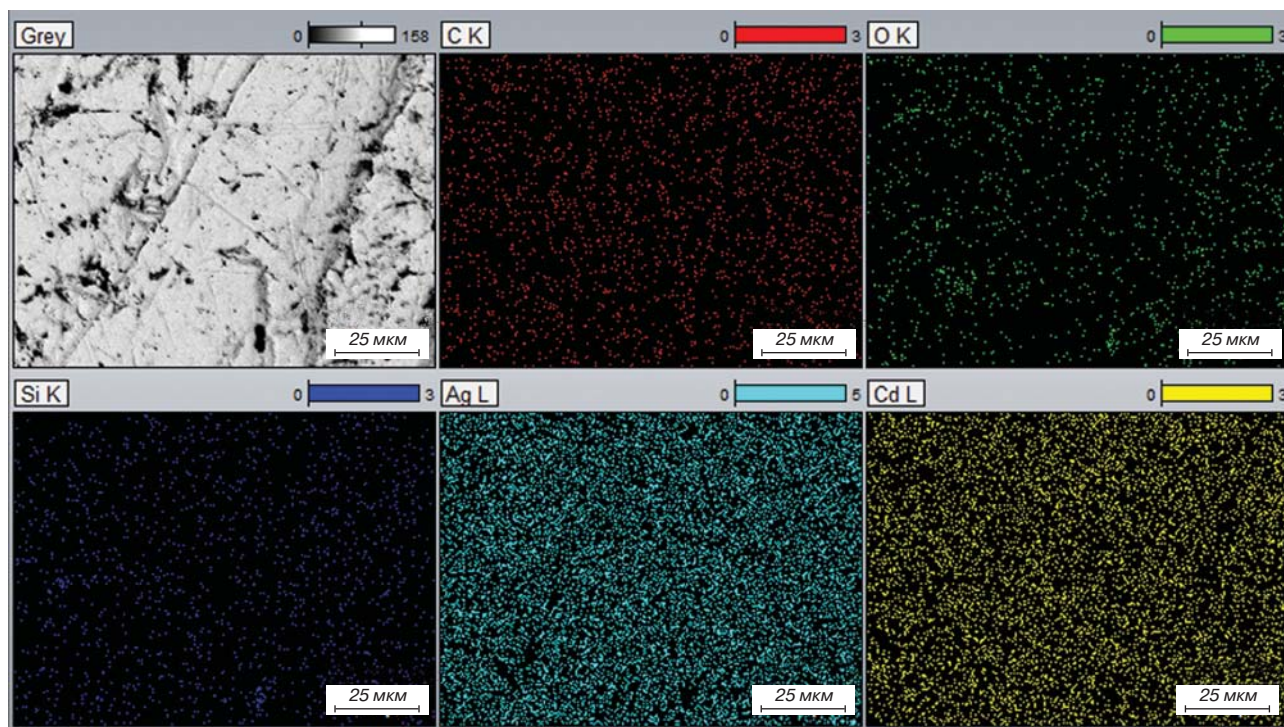


Рис. 7. Элементное картирование однородной поверхности серебряного рубля 1823 г.

легирование медью и цинком не требовалось, поскольку эти примеси присутствовали в исходной нерчинской руде [34].

На **рис. 10** представлены экспонаты минцкабинета Горного музея: серебряная полоса и вырубленные кружки (заготовка под чеканку монеты).

Химический анализ состава пробы нерчинской руды (образец 1823 г.) и металлографический анализ пластин

и кружков выполнили на оптическом и сканирующем электронном микроскопах Axio Lab.A1, Vega3 LM Tescan и спектрометре XRF-1800. Результаты анализа руды, пластин и кружков (**табл. 2**) согласуются с данными существующих месторождений арбитражного контроля «Предельно допустимые среднеквадратические погрешности по классам содержаний». Содержание серебра и меди в кружках согласуется с результатами проведенных выше измерений и распределения элементов в исследуемой монете.

В пластинах содержится до 0,02 % шлака, в котором концентрируется алюминий, кальций и никель в виде оксидов. Содержание цинка и свинца сохраняется примерно на том же уровне. Необходимо отметить, что переход свинца, меди, кадмия и цинка сохраняется до самого процесса чеканки монеты в нормируемых пределах концентрации. Доказано, что именно свинец способствует полученному качеству при производстве и характерному оттиску

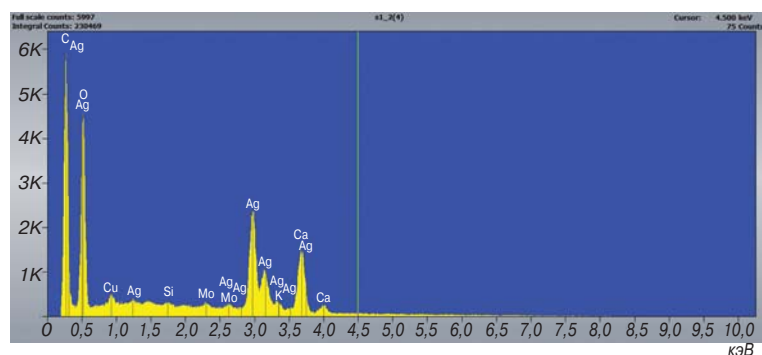


Рис. 8. EDS-анализ загрязненной поверхности серебряного рубля 1823 г.

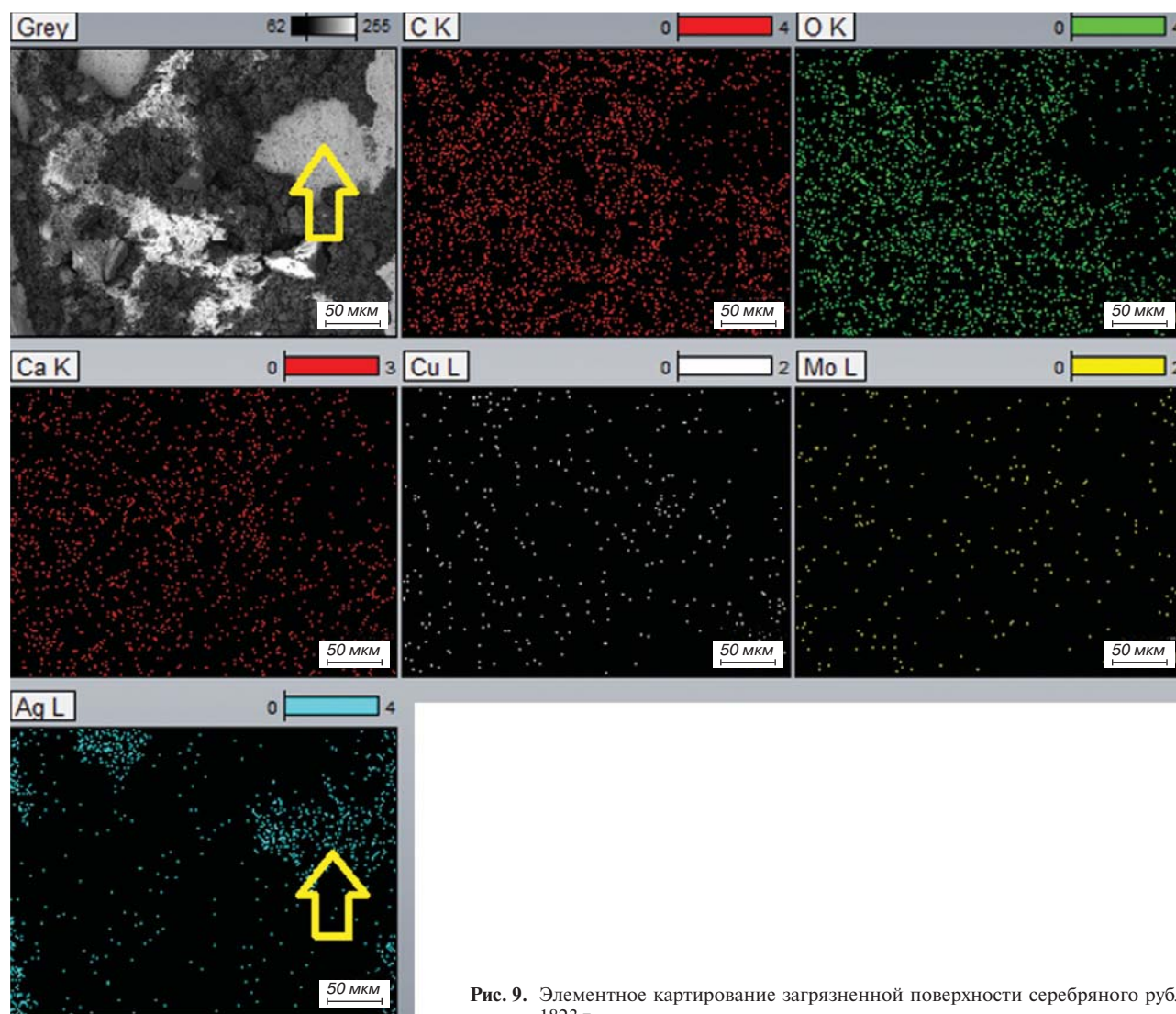


Рис. 9. Элементное картирование загрязненной поверхности серебряного рубля 1823 г.

Таблица 2

Содержание основных химических элементов в руде, серебряной пластине и кружках, % (мас.)

Материал	Ag	Pb	Zn	Cu	Cd	Vi	Au	Другие
Руда	28,25	8,950	7,850	2,36	1,250	2,22	0,16	0,200
Пластина	98,18	0,005	0,045	1,45	0,021	0,02	0,03	0,002
Монета	98,35	0,005	0,050	1,45	0,025	0,01	0,04	0,002

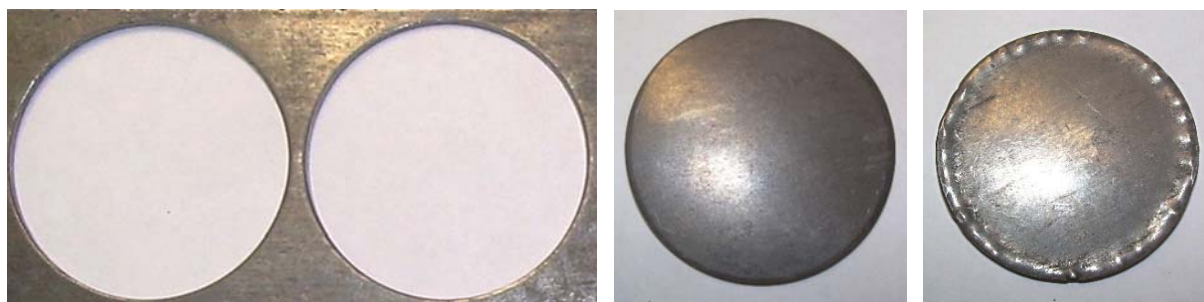


Рис. 10. Серебряная пластина и вырубленные кружки — заготовки серебряного рубля 1823 г.

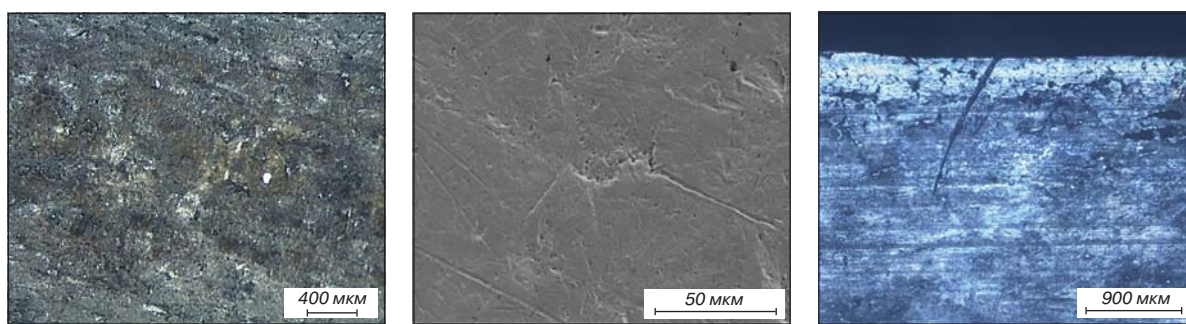


Рис. 11. Структура поверхности и поперечный разрез заготовки серебряного рубля 1823 г.

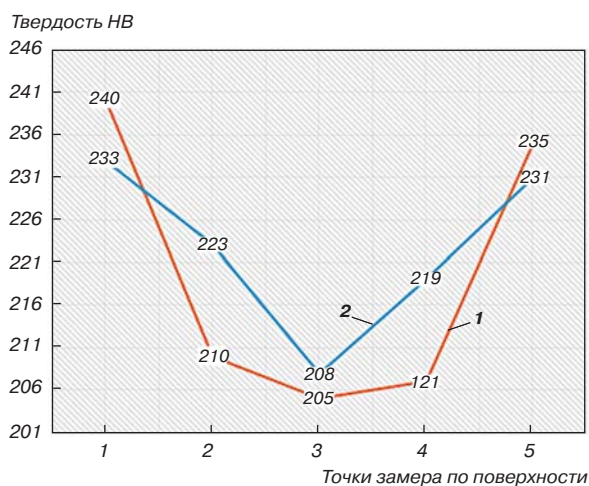


Рис. 12. Результаты испытаний на микротвердость серебряного рубля 1823 г.: 1 – аверс; 2 – реверс

после чеканки (штамповки) монеты. Медь и цинк также оказывают положительное влияние на свойства и структуру серебряных монет.

При помощи сканирующего электронного микроскопа получены микрофотографии поверхности монеты, структур в продольном и поперечном разрезе. Выявлено, что и структура, и поверхность монеты имеют

неоднородные участки, что может быть подтверждено измерениями твердости в различных участках образца (рис. 11).

Микротвердость исследуемых образцов определяли с применением нанотвердомера SHIMADZU DUH 211S по ГОСТ 9450–79 [35] и ГОСТ Р 8.748–2011 [36], что обеспечивает получение сопоставимых результатов измерения исследуемых образцов согласно требованиям стандарта ISO 14577–1 Annex A. Измерения микротвердости с различными образцами монет проводили с помощью микротвердомера, оснащенного автоматическим анализатором изображений Smart Drive MHT, с моторизованным предметным столом, турелью с объективами и индентором. Выполнено по 12 контрольных испытаний на микротвердость с двух сторон для образца монеты, и получено среднее значение. Результаты испытаний представлены на рис. 12.

Из графиков (см. рис. 12) видно, что ликвация элементов по краям для образца монеты 1823 г. минимальна. Но наибольшее значение содержания меди и свинца отмечается именно в центре всех исследуемых монет. Существенное влияние на твердость и качество чеканки оказывает и содержание алюминия, которое также в различных точках измерения имеет отклонение до 0,071–0,095 %.

Согласно полученным зависимостям, изменения микротвердости по поверхности монет, наличие и распределение таких элементов, как медь и свинец, влияет на локальную микротвердость монеты. Ликвация и диффузия кадмия к краям отражается на качестве монеты непосредственно при чеканке и определяет стойкость к износу и коррозии, значение микротвердости повышается при снижении содержания меди на 1–3 %.

Заключение

Исследование проведено в рамках научного направления Санкт-Петербургского горного университета «Историко-культурное наследие России и развитие научного познания». Объектом исследования выбрана монета 1823 г. — серебряный рубль.

На сканирующем электронном микроскопе (SEM-анализ) после ультразвуковой очистки при умеренном приближении исследована поверхность монеты и определены характерные участки для анализа.

На поверхности монеты выявлены однородные участки и места коррозии, сколы, трещины и другие механические повреждения, полученные при изготовлении, полировке и использовании монеты. С использованием SEM-микроскопии локализованы интересные места для EDS-анализа поверхности. Основными составляющими элементами поверхности монеты являются серебро и медь. Содержание серебра по поверхности изменяется от 92 до 95 %. Существенные различия в данных EDS-анализа между аверсом и реверсом не наблюдается.

Авторы выражают благодарность ректору Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II профессору Владимиру Стефановичу Литвиненко за поддержку и содействие в публикации данной статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2023. No. 8. pp. 85–92
DOI: 10.17580/tsm.2023.08.14

EXAMINING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF 1823 SILVER ROUBLE

Information about authors

V. Yu. Bazhin, Head of Metallurgy Department¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

A. P. Suslov, Vice Rector for Operation and Development of the Property Complex¹

O. A. Gorshkova, 4th Year Student at the Faculty of Minerals Processing¹

¹Empress Catherine II St Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

This paper looks at the structure and properties of the Silver Rouble produced at the Saint Petersburg Mint in 1823 under the leadership of münzmeister Pavel Danilov, the Mining Military School (Mining University) graduate. The study was carried out on high-technology equipment of the research centres owned by Empress Catherine II St Petersburg Mining University. For the first time, the structure of the silver coins was examined at the nanolevel by the X-ray diffraction method with the help of a scanning electron microscope. New data were obtained about the structure and the distribution of impurities, which give an insight into the silver mint processes of the time. Changed hardness detected at certain areas of the silver coin surface indicates a deviation in the chemical composition of the reverse versus the obverse. The authors also looked at ore samples from the Nerchinsk deposit, as well as silver items stored in the coin chamber of the Mining Museum. This research was carried out as part of the research initiative: Historical and Cultural Heritage of Russia and Promotion of Scientific Knowledge. **Key words:** nanosized structures, Silver Rouble, coin production, Mining Institute, Mining Museum, nanostructure, standard, X-ray phase analysis, spectroscopy, electron microscope, impurities, scanning microscopy.

References

- Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V. et al. Analyzing the role of the state in the control over mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. pp. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
- Aleksandrova T. N. Comprehensive processing of natural and man-made mineral materials: Current status and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 3–5.
- Litvinenko V. S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29. pp. 1521–1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.

- Shklyarskiy Ya. E., Skamyin A. N., Jimenez Carrizosa M. Energy efficiency in the mineral resources and raw materials complex. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. pp. 323–324.
- Bazhin V. Yu., Aleksandrova T. A., Kotova E. L., Gorlenkov D. V., Susorov R. S. Metallurgists of the Mining university and development of monetary industry. 245 years of history. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 230. pp. 131–138. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.131.
- Rylov I., Sobolin V. Russian coins from Nikolas II to these days. Moscow: Pruf, 2004. 504 p.
- Papp Z. J., Kovács I. Surface analysis of a modern silver coin: SEM/EDS measurements. *Revue Roumaine de Chimie*. 2013. Vol. 58, Iss. 1. pp. 65–67.
- Loranskiy A. M. A history essay about the Mining Institute. St. Petersburg, 1873.
- Borisyak A. A. On the issue of celebrating the 150th anniversary of the Mining Institute. Book on request, 2012.
- Popova A. N., Sukhomlinov V. S., Mustafaev A. S. A new intensity adjustment technique of emission spectral analysis when measured at the upper limit of the dynamic range of charge-coupled devices. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. DOI: 10.3390/app12136575.
- Petrov D. A., Ryzhkova S. O., Gembitskaya I. M. Rare minerals of precious metals in the Mining Museum collection: New data. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 255. pp. 493–500. DOI: 10.31897/PMI.2022.42.
- Bazhin V. Yu., Gorlenkov D. V., Povarov V. G., Vedernikov V. V. Composition, structure and properties of the last silver rubles of the Russian Empire in 1895–1915: continuation of the Petrine traditions of coinage. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 112–119.
- Malyshev M. V., Rummyantsev D. V. Silver. 2nd revised edition. Moscow: Metallurgiya, 1987. 320 p.
- Pańczyk E., Sartowska B., Waliś L., Dudek J. et al. The origin and chronology of medieval silver coins based on the analysis of chemical composition. *Nukleonika*. 2015. Vol. 60, Iss. 3. pp. 657–663.
- Rakhilin V. V. Money of Russia. Moscow: Slovo, 2000. 48 p.
- Bazhin V. Yu., Gorshkova O. A. Understanding the structural features of items made of silver alloys at nanoscale. *Nanophysics & Nanomaterials: Proceedings of the International Conference Marking V.B. Aleskovskiy's 110th birthday and L. A. Sen's 115th birthday*. Saint Petersburg, 2022. pp. 27–33.
- Denisov V. M., Istomin S. A., Belousova N. V., Denisova L. T. et al. Silver and its alloys. Yekaterinburg: UrO RAN, 2011. 367 p.
- Boyarskiy V. A. Nerchinsk Mining District. Mining encyclopedia: [in 5 volumes]. Ed. by E. A. Kozlovskiy. Vol. 3. Kengan – Ort. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1987. 592 p.
- Vegman E. F., Zherebin B. N., Pokhvisnev A. N. et al. Metallurgy of iron: Textbook for university students. Ed. by Yu. S. Yusfin. 3rd revised edition. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2004. 774 p.

20. Bitkin V. V. Master catalogue of Russian coins (1699–1924). Kyiv : Yunona – Moneta, 2003. 680 p.
21. Spasskiy I. G. Russian coin system. Moscow : Uchpedgiz, 1957. 122 p.
22. Aksanova S. V., Zhilkin A. V. Coins and banknotes of Russia and USSR. A complete encyclopedia of coins and banknotes. Moscow : OOO ID Vladi, RIPOL–Klassik, 2008. 232 p.
23. Uzdrenikov V. V. Coins of Russia. 1700–1917. Moscow : Finansy i statistika, 1986. 504 p.
24. Masterov V. A., Saksonov Yu. V. Silver and silver-base alloys and bimetals. Moscow : Metallurgiya, 1979. 345 p.
25. Malyshev V. M., Rummyantsev D. V. Silver. Moscow : Metallurgiya, 1987. 345 p.
26. Strizhko L. S. Metallurgy of gold and silver. A guide for university students. Moscow : MISIS, 2001. 336 p.
27. Mironov V. L. Fundamentals of scanning probe microscopy. A learner's guide. Nizhny Novgorod : Institut fiziki mikrostruktur RAN, 2004. 114 p.
28. Smerdov R., Spivak Y., Bizyaev I., Somov P. et al. Advances in novel low-macroscopic field emission electrode design based on fullerene-doped porous silicon. *Electronics*. 2021. Vol. 10. 42. DOI: 10.3390/electronics10010042.
29. Mustafaev A. S., Popova A. N., Sukhomlinov V. S. A new technique of eliminating the actual plasma background when calibrating emission spectro-
- meters with a CCD recording system. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. 2896. DOI: 10.3390/app12062896.
30. Rossina N. G., Popov N. A., Zhilyakova M. A., Korelin A. V. Corrosion and protection of metals. In 2 parts. Part 1. Corrosion process study techniques: A study guide. Yekaterinburg : Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2019. 108 p.
31. Denisov V. M., Istomin S. A., Belousova E. V., Denisova V. A. et al. Silver and its alloys. Yekaterinburg : UrO RAN, 2011. 184 p.
32. Rzaev V. P. Riddles of Russian numismatics. Versions: In 2 volumes. Moscow : Khobbi Press, 2010. 342 p.
33. Baranov A., Bugrov A., Gerasimov V. The history of monetary circulation in Russia. Catalogue in two volumes. A popular science edition. Moscow : Inter Krim–press, 2011. 1272 p.
34. Kazakov A. A., Kazakova E. I., Kur A. A. Assessment of central heterogeneity in slab to forecast centerline segregation in plate steel. *CIS Iron and Steel Review*. 2018. Vol. 16. pp. 49–52.
35. GOST 9450–79. Measurements microhardness by diamond instruments indentation. Introduced: 01.01.1977.
36. GOST R 8.748–2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1. Test method. Introduced: 01.05.2013.

Межфазные превращения на границе раздела композиции «сплав Fe – C — сплав Fe – Ni – Cr – Cu – Si – B – C»

УДК 621.762



Ф. Р. Капсаламова,
старший научный сотрудник¹,
эл. почта:
faridakapsalamova@gmail.com



С. А. Красиков,
главный научный сотрудник²,
профессор кафедры химии³,
докт. техн. наук,
эл. почта: sankr@mail.ru



Е. М. Жилина,
старший научный сотрудник²,
канд. хим. наук,
эл. почта: ezhilina@bk.ru



Ф. А. Бердикулова,
директор Департамента
координации научно-
технических проектов
и программ¹, канд. техн. наук,
эл. почта: pheruza_b@mail.ru

¹Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья, Алматы, Казахстан

²Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Выполнен физико-химический анализ фазовых превращений на границе раздела композиции «сплав Fe – C – сплав Fe – Ni – Cr – Cu – Si – B – C», что представляет интерес для перспективной металлургической технологии получения износостойкого покрытия из ультрадисперсного материала для упрочнения и восстановления изношенных деталей техники. Осуществлено газопламенное напыление порошковой композиции Fe – Ni – Cr – Cu – Si – B – C, полученной методом механохимического легирования, на железоуглеродистую подложку. Целью работы являлось изучение особенностей физико-химических превращений при формировании износостойкого покрытия для упрочнения и восстановления изношенных деталей техники. Газопламенное напыление на подложку из образца стали марки 45 выполнено под воздействием факела пропанокислородной горелки. При исследовании физико-химических свойств границы раздела «сплав Fe – C – сплав Fe – Ni – Cr – Cu – Si – B – C» проведен рентгенофазовый анализ и получены снимки на сканирующем (растровом) электронном микроскопе. Результаты показали, что структура границы раздела «сплав Fe – C – сплав Fe – Ni – Cr – Cu – Si – B – C» многофазна и включает промежуточные фазы, интерметаллиды (CrNi₃, Fe_{10,8}Ni и т. п.), карбиды (Fe₃C, (Cr, Fe)₂₃C₆ и т. п.), бориды (Ni₂B, Cr₅B₃ и т. п.), силициды (FeSi₂, Cr₅Si₃ и т. п.). Главной причиной фазообразования при осуществлении газопламенного напыления является то, что под воздействием температуры протекают сложные процессы химического взаимодействия, диффузии, структурообразования, сопровождающиеся экзотермическим эффектом. Данные сканирующей электронной микроскопии показывают, что легирующие элементы имеют неравномерное распределение между ультрадисперсными фазами.

Ключевые слова: адгезия, границы раздела, фазовые превращения, ультрадисперсные материалы механохимического легирования, газопламенное напыление, наплавочный порошок.

DOI: 10.17580/tsm.2023.08.15