

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-40-46>

УДК 681.7.069.223:069.44

Лазерная очистка поверхности серебряных монет

Канд. техн. наук, доц. Р. В. Фёдорцев^{1,4)}, канд. физ.-мат. наук Д. В. Горбач^{2,4)}, студ. Д. Е. Лукашов^{3,4)}, Ю. Ю. Талайковская⁴⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Унитарное предприятие «НТЦ “ЛЭМТ” БелОМО» (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾УО «Национальный детский технопарк» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Выполнен анализ причин образования внутренней и наружной коррозии серебряных монет, основу которых составляют примеси меди (23–70 %) и железа Fe (11 %) различной концентрации в зависимости от ранга и номинала. Существующие химические методы очистки с применением кислот и солей в основном эффективны при снятии окисных пленок небольшой толщины и могут привести к разрушению внутренней структуры монет. Экспериментальные исследования проводились на двух серебряных монетах номиналом 20 копеек из сплава металлов: 50 % серебра и 50 % меди в исходном оценочном состоянии VF (Very Fine) с пленками толщиной от 0,1 до 0,5 мкм из карбоната серебра Ag_2CO_3 , арсенида Ag_2S и оксида серебра Ag_2O . В качестве оборудования для очистки использован лазерный маркер Wattsan FL TT с волоконным иттербиевым излучателем IPG (рабочая длина волны 1064 нм, выходная мощность 15,5 Вт). Для управления параметрами перемещения луча лазерного маркера использовалось программное обеспечение EzCAD 2.14. При обработке серебряных монет оптимальными параметрами являются: скорость 5000 мм/с; частота следования импульсов 200 кГц и шаг между линиями обработки 0,01 мм, обеспечивающий двукратное перекрытие обрабатываемого излучения по оси x , пятикратное перекрытие по оси y . При этом для большей однородности воздействия лазерного излучения на поверхность целесообразно проводить обработку в несколько проходов с чередующимися направлениями. Наилучшее качество поверхности было получено при общем количестве проходов 6: из которых – 3 параллельно базовой оси x , 3 – под углом 45°. Визуальная оценка качества поверхности монет в процессе очистки проводилась на портативном цифровом USB микроскопе GUANMOU AN104/F210 при увеличении 50 крат. Оценку качества сформированной зеркальной поверхности осуществляли посредством измерения коэффициента отражения по стороне аверс в видимом спектральном диапазоне на спектрофотометре Photon RT Essentoptics. Применение лазерного метода очистки серебряных монет позволило улучшить их состояние с исходного VF (Very Fine) до XF или EF (Extremely Fine), а в сочетании с финишным полированием («Фторопол М» зернистостью 0,6–0,8 мкм в растворе глицерина $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) до состояния UNC (Uncirculated), что подтверждается существенным возрастанием в 4–6 раз коэффициента отражения зеркальной поверхности.

Ключевые слова: серебряная монета, окисная пленка, коррозионный слой, волоконный лазер, очистка металлов, частота следования импульсов, скорость перемещения луча

Для цитирования: Лазерная очистка поверхности серебряных монет / Р. В. Фёдорцев [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 1. С. 40–46. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-40-46>

Laser Cleaning of Silver Coin Surfaces

R. V. Feodortsau^{1,4)}, D. V. Gorbach^{2,4)}, D. E. Lukashov^{3,4)}, Yu. Yu. Talaykovskaya⁴⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Unitary Enterprise «STC “LEMT” BelOMO» (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus),

⁴⁾Educational Institution “National Children's Technopark” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. An analysis has been made of the reasons for the formation of internal and external corrosion of silver coins, which are based on copper (23–70 %) and iron (11 %) impurities of varying concentrations depending on the rank and denomination. Existing chemical cleaning methods using acids and salts are mainly effective in removing thin oxide films and can lead to destruction of the internal structure of coins. Experimental studies were conducted on two silver coins with a face value of 20 kopecks; their metal alloy: 50 % silver and 50 % copper in the original VF (Very Fine) rating condition with films

Адрес для переписки

Фёдорцев Ростислав Валерьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-74
mtools@bntu.by

Address for correspondence

Feodortsau Rastislav V.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-74
mtools@bntu.by

of 0.1 to 0.5 mm thickness made of silver carbonate Ag_2CO_3 , argentite Ag_2S , and silver oxide Ag_2O . A Wattsan FL TT laser marker with an IPG ytterbium fiber emitter (operating wavelength 1064 nm, output power 15.5 W) was used for cleaning. The EzCAD 2.14 software was used to control the parameters for moving the laser marker beam. The optimal parameters for processing silver coins are: speed of 5000 mm/s; the pulse repetition frequency of 200 kHz and the step between the processing lines of 0.01 mm, which ensures a two-fold overlap of the processing radiation along the x -axis and a five-fold overlap along the y -axis. In this case, for greater uniformity of the effect of laser radiation on the surface, it is advisable to carry out processing in several passes with alternating directions. The best surface quality was obtained with a total of 6 passes: 3 of which were parallel to the base axis x , 3 were at an angle of 45° . A visual assessment of the coin surface quality during cleaning process was carried out using a portable digital USB microscope GUANMOU AN104/F210 at 50x magnification. The quality of the formed mirror surface was assessed by measuring the reflection coefficient on the obverse side in the visible spectral range on a Photon RT Essentoptics spectrophotometer. The use of a laser cleaning method for silver coins has improved their condition from the original VF (Very Fine) to XF or EF (Extremely fine), and in combination with final polishing (Fluoropol M with a grain size of $0.6\text{--}0.8\ \mu\text{m}$ in a solution of Glycerin $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) to the UNC (Uncirculated) condition, which is confirmed by a significant increase of 4–6 times in the reflection coefficient of the mirror surface.

Keywords: silver coin, oxide film, corrosion layer, fiber laser, metal cleaning, pulse repetition rate, beam speed

For citation: Feodortsau R. V., Gorbach D. V., Lukashov D. E., Talaykovskaya Yu.Yu. (2025) Laser Cleaning of Silver Coin Surfaces. *Science and Technique*. 24 (1), 40–46. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-40-46> (in Russian)

Введение

Анализ археологических находок XVI–XIX веков показывает, что монеты первого ранга и максимального номинала (дукаты, гульден) в основном изготавливались из золота Au (95–98 %) как наиболее ценного и значимого материала; монеты второго ранга (талеры и тестоны) – преимущественно из серебра Ag (90–98 %). Монеты третьего ранга – это мелкие разменные монеты: деньга (100 % Ag), гроши (78 % Ag и 23 % Cu), тымфы (55 % Ag и 45 % Cu), копейки (50 % Ag и 50 % Cu или 100 % Cu) [1].

Основная причина образования внутренней или наружной коррозии в таких монетах – присутствие примесей меди Cu (1–10 %) и иногда железа Fe (11 %). Кроме того, проводимая политика «порчи монет» приводила к снижению количества благородных металлов за счет лигатуры (преимущественно меди). В монетах мелкого достоинства (грош, шестак, тымф, копейка или полтора) количество примесей меди достигало 23–70 %, а также могло присутствовать незначительное количество олова, никеля и железа.

Со временем поверхность серебряных монет темнеет. Это связано со взаимодействием примесей серебра и меди с кислородом, сероводородом, углекислым газом и влагой в воздухе.

Восстановление поверхности серебряных монет традиционными методами в основном зависит от степени их загрязнения. Для легких случаев загрязнения применяют зубную пасту (без абразивных кристаллов и отбеливающего эффекта, процесс очистки занимает примерно 30 мин) или мыльный раствор ($\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOK}$, длительность очистки 60–90 мин, метод применим только для чистого серебра без примесей меди). Для более сложных случаев загрязнения рекомендуется использовать различные химические реагенты, например с погружением

в растворы: уксусной кислоты (CH_3COOH) концентрацией 6 или 9 %, лимонной кислоты ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$), поваренной соли ($\text{Na}_{40\%}\text{Cl}_{60\%}$) в воде в соотношении 1:1 с основой на алюминиевой фольге и выдержкой в течение 2–3 ч. Практический опыт показывает, что данные химические методы очистки в основном эффективны при снятии окисных пленок небольшой толщины и в ряде случаев могут привести к разрушению внутренней структуры монет [2].

Актуальность исследования заключается в необходимости разработки эффективной технологии очистки поверхностей металлических изделий, например серебряных монет, относящихся к культурно-историческому наследию, раскрывающих национальные традиции славян, показывающих торгово-экономические взаимоотношения людей, проживавших на территории Беларуси с древних времен до наших дней.

Цель исследования – разработка эффективной методики очистки монет из благородных металлов с использованием излучения импульсного волоконного лазера, оценка качества очищенной/полученной поверхности и определение оптимальных параметров мощности, скорости и частоты лазерного излучения, обеспечивающих эффективное энергетическое воздействие на поверхность для удаления коррозионных и окисных пленок без повреждения основной структуры материала.

Анализ дефектов поверхности

На открытом воздухе без воздействия агрессивных сред и в диапазоне обычных температур на серебряных монетах образуются бесцветные окисные пассивные пленки толщиной до $12\ \text{Å}$, с повышением температур их толщина может увеличиться до $100\text{--}200\ \text{Å}$ [1]. Присутствие в воздухе газообразного сероводорода вызывает

потускнение и потемнение поверхности с образованием черного сульфида серебра толщиной пленки в 400 Å [1]. Цвет ее меняется со временем от желтого (тонкий слой) до темно-коричневого, почти черного (толстый слой) (рис. 1g, k).

Результаты микроскопического сканирования в ряде научных работ показывают также

образование белых налетов в виде хлорида серебра и сульфидов неблагородных металлов. Если содержание меди в серебряном сплаве больше 10 %, то можно наблюдать зеленые продукты коррозии: гидрокарбонаты, гидросульфиды, сульфаты и силикаты, толщиной от 0,1 до 0,5 мм (рис. 1a) [2].

Внешний вид и состояние монеты (с оценкой по международной шкале)		
Исходное	После лазерной очистки	После финишного абразивного полирования
20 копейка 1915 и 1913 гг. (Российская империя)		
a 	b 	c 
d 	e 	f 
g 	h 	j 
k 	l 	m 
VF (Very Fine)	XF или EF Extremely Fine	UNC (Uncirculated)

Рис. 1. Образцы серебряных монет для проведения экспериментальных исследований по очистке

Fig. 1. Samples of silver coins for experimental cleaning studies

В археологических находках продукты коррозии монет имеют сложное строение и состав. В основном это комбинации оксидов и солей меди, олова и других элементов, входящих в сплав, из которого сделано изделие. Одним из способов восстановления контуров рельефа поверхности монет может быть применение метода лазерной очистки металлов [3].

Оценка исходного состояния и критерии выбора образцов

При выборе образцов рассматривали варианты, при которых монеты имели максимально сохранившийся рельеф изображений, ровный гурт и значительную толщину окисных пленок и коррозионного слоя.

В качестве образцов для исследования выбраны две монеты: 20 копеек (двугривенник, Российская империя, 1913 и 1915 гг.). Каталожный номер: Биткин-117; Конрос-146/92. Материал монет – сплав металлов: 50 % серебра и 50 % меди. Диаметр 22 мм, масса 3,6 г. В табл. 1 представлены зафиксированные количественные продажи монет данного вида на международных аукционах в различных оценочных состояниях [4].

Таблица 1

Количество монет в различных состояниях сохранности
Number of coins in different states of preservation

VG	F	VF	XF	AU	UNC	UNC PL	PROOF
83	146	202	256	364	1758	44 000	221 993

Большая часть монет данного вида в основном встречается в достаточно хорошем и отличном состоянии. Однако для проверки эффективности методики очистки были выбраны монеты, имеющие равномерно распределенные серные и карбонатные коррозионные окисные пленки толщиной 5–20 мкм в исходном оценочном состоянии VF (Very Fine) (табл. 2). Пленка карбоната серебра Ag_2CO_3 представляет собой серебряную соль, образованную в результате взаимодействия с угольной кислотой. Серная пленка (аргентит) Ag_2S представляет собой кубическую модификацию сульфида серебра. Пленка оксида серебра Ag_2O образуется

в результате взаимодействия нитрата серебра со щелочью в водном растворе.

Таблица 2

Характеристики исходных образцов серебряных монет с коррозионной пленкой

Characteristics of the original silver coin samples with corrosion film

Номер образца	Химическое и минералогическое название и формула	Цвет
Монета 1 (1915 г.)	Пленка карбоната серебра Ag_2CO_3	Зеленый
Монета 2 (1913 г.)	Серная пленка (аргентит) Ag_2S	Черный, свинцово-серый
	Пленка оксида серебра Ag_2O	Коричневый

Визуальную оценку качества поверхности монет проводили на портативном цифровом USB микроскопе GUANMOU AN104/F210 при увеличении 50 крат.

Методика лазерной очистки

Большинство лазерных технологий обработки материалов основано на локализации мощности излучения на малой площади поверхности объекта и последующем ее рассеивании в виде теплоты во внутренней структуре изделия. Поэтому главной характеристикой лазера, используемого в таких технологиях, является его выходная мощность. Для импульсных лазеров рассматривают мощность в импульсе и среднюю мощность, которая зависит от длительности и частоты следования импульсов [5–7].

Загрязненный слой на поверхности монеты представляет собой совокупность микроскопических частиц, удерживаемых адгезионными силами Ван-дер-Ваальса. Основным механизмом взаимодействия сухой лазерной очистки является быстрое тепловое расширение материала подложки и частиц на ее поверхности, которое при разной скорости поглощения энергии приводит к возникновению механических напряжений в загрязняющем слое. В результате возникает инерционная сила, которая прижимает частицу к поверхности во время действия переднего фронта импульса и отрывает ее во время действия заднего фронта [8].

Для проведения экспериментальных исследований выбран настольный лазерный маркер Wattsan FL TT с волоконным иттербиевым излучателем IPG и встроенной воздушной систе-

мой охлаждения. Рабочая длина волны излучения 1064 нм, длительность импульса 10 нс, заявленная производителем выходная мощность 20 Вт, скорость луча 0–7000 мм/с, минимальная ширина линии 0,012 мм. Система управления лазерным лучом: 2-координатный сканатор (дефлектор) и F-Theta фокусирующий объектив D80 с ручным механизмом регулировки фокусного расстояния ($f_{об} = 330$ мм).

Базовые модификации иттербиевых волоконных маркеров имеют ключевую особенность: с увеличением частоты следования импульсов падает пиковая выходная мощность лазера. Для повышения эффективности очистки необходимо устанавливать максимальное значение выходной мощности. С помощью измерителя оптической мощности лазерного излучения SSP-TS50-TP100 определено фактическое значение максимальной средней мощности 15,5 Вт (при частоте следования импульсов 200 кГц).

Для настройки оптимальных технологических параметров лазерного маркера использовалось программное обеспечение EzCAD 2.14. Для очистки монет задавали рабочее поле диаметром 30 мм (Field Size) с учетом коэффициента запаса на исправление возможного образования положительной или отрицательной дисторсии.

В базовой конфигурации настроек расстояние между линиями обработки (Line Space) 0,1 мм. Как показали пробные эксперименты, в результате взаимодействия лазерного луча с поверхностью металла латунной монеты формируется четко различимый массив белых линий, состоящий из отдельных точек.

Визуальную оценку качества поверхности монет в процессе очистки проводили на портативном цифровом USB микроскопе GUANMOU AN104/F210 при увеличении 50 крат (рис. 2).



Рис. 2. Дефекты очистки поверхности в виде полос при шаге 0,1 мм

Fig. 2. Surface cleaning defects in the form of stripes at 0.1 mm pitch

Полученная картина позволяет оценить размер области эффективного воздействия лазерного луча $d = 50$ мкм. Для полной обработки поверхности следует проводить воздействие с перекрытием областей воздействия. Зона перекрытия лазерного излучения Δd и шаг сканирования S [9] показаны на рис. 3.

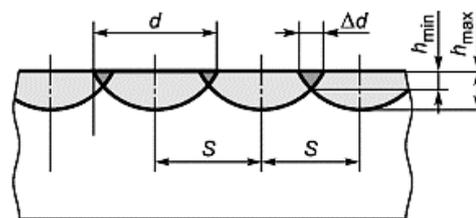


Рис. 3. Зоны воздействия лазерным пучком на поверхность с перекрытием

Fig. 3. Laser beam impact zones on the surface with overlap

Исходя из технологических параметров комплекса можно рассчитать коэффициент перекрытия зон воздействия и шаг обработки по следующим формулам [10]:

$$\eta_x = \frac{\Delta d_x}{d} = \left(1 - \frac{v_{ск}}{fd}\right) \cdot 100\%;$$

$$\eta_y = \frac{\Delta d_y}{d} = \left(1 - \frac{1}{Nd}\right) \cdot 100\%;$$

$$S_x = \frac{v_{ск}}{f}; \quad S_y = \frac{1}{N},$$

где η_x, η_y – коэффициенты перекрытия по осям x и y ; $v_{ск}$ – скорость сканирования; f – частота следования импульсов; N – количество линий на один миллиметр.

Визуализация процесса лазерной очистки серебряной монеты на маркере Wattsan FL TT показана на рис. 4.



Рис. 4. Процесс лазерной очистки

Fig. 4. Laser cleaning process

Серия пробных экспериментов показала, что при обработке серебряных монет оптимальными параметрами являются: скорость 5000 мм/с, частота следования импульсов 200 кГц, обеспечивающие двукратное перекрытие обрабатываемого излучения по оси x , а также расстояние между линиями (шаг по оси y) $S = 0,01$ мм (рис. 5), обеспечивающий пятикратное перекрытие излучения по оси y . Кроме того, для устранения явно выраженной линейности обработанной области недостаточно одного прохода лазерного луча в определенном направлении. Целесообразно проводить обработку в несколько проходов с чередующимися направлениями. Наилучшее качество поверхности было получено при общем количестве проходов 6: из которых – 3 параллельно базовой оси x , 3 – под углом 45° .

После лазерной очистки с поверхности монет удалось снять черные серые пленки (аргентит Ag_2S), коричневые пленки оксида серебра (аргированный оксид Ag_2O) и зеленый налет карбоната серебра (летаргирит Ag_2CO_3). Однако из-за состава (50 % Ag и 50 % Cu) образовался соломенно-желтый цвет побежалости (появляется при температуре 240°C) (рис. 1b, e, h, l). Данный налет имеет тонкую поверхностную пленку в несколько нанометров и в последующем легко снимается механическим финишным полированием ватным валиком в течение 15–20 мин. Рекомендуемый состав: порошок «Фторопол М» зернистостью 0,6–0,8 мкм (ТУ 344–97) в растворе глицерина $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ (ГОСТ 6259–75) обеспечивает зеркальный блеск гладкого фонового поля поверхности монеты. Результаты окончательной очистки поверхности монет представлены на рис. 1с, f, j, m.

Измерение коэффициента отражения

Оценку качества сформированной зеркальной поверхности осуществляли посредством измерения коэффициента отражения по стороне аверс в видимом спектральном диапазоне на спектрофотометре Photon RT Essentoptics [10, 11]. Образцы устанавливали в специальном приспособлении (рис. 5) под углом 8° к источнику излучения и соответственно аналогичным углом входной щели приемного канала монохроматора.

Калибровку производили с использованием эталона – один канадский доллар (1977 г., 50 % Ag и 50 % Cu , состояние Proof) (кривая 1 на рис. 6).



Рис. 5. Схема установки и ориентации монеты для измерения коэффициента отражения

Fig. 5. Coin installation and orientation diagram for measuring reflection coefficient

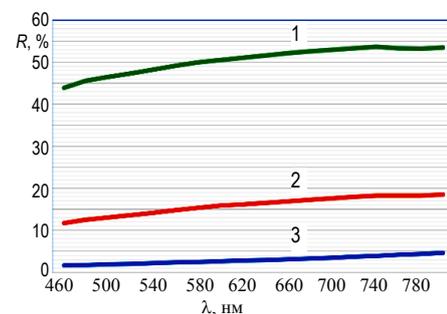


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента отражения от рабочей длины волны для серебряных монет:

- 1 – один канадский доллар (состояние Proof, эталон);
- 2 – 20 копеек (Российская империя, после очистки);
- 3 – 20 копеек (Российская империя, исходное состояние)

Fig. 6. Graphs of reflection coefficient dependence on the operating wavelength for silver coins:

- 1 – one Canadian dollar (Proof condition, standard);
- 2 – 20 kopecks (Russian Empire, after cleaning);
- 3 – 20 kopecks (Russian Empire, initial state)

В спектральной области 400–1400 нм коэффициент отражения постепенно возрастает с исходного значения $R = 45\%$ при $\lambda = 400$ нм до максимального значения $R = 55\%$ при $\lambda = 1450$ нм в ближнем инфракрасном диапазоне. Далее измеряли коэффициент отражения монеты 20 копеек (Российская империя, 1913 г.) в исходном состоянии с загрязненной поверхностью (кривая 3 на рис. 6). В видимом спектральном диапазоне 400–800 нм коэффициент отражения оказался достаточно низким и не превысил $R = 2\text{--}5\%$, однако ближе к инфракрасной области наблюдался незначительный рост до $R = 10\%$. Образец серебряной монеты после лазерной очистки и финишного полирования (кривая 2 на рис. 6) показал существенное увеличение коэффициента отражения в видимом спектральном диапазоне $R = 12\text{--}20\%$ с последующим возрастанием до $R = 25\%$ в инфракрасной области.

ВЫВОДЫ

1. Проведена серия экспериментов по очистке поверхности серебряных монет с помощью лазерного маркировщика WATTSAN FL TT20W M, показавшая высокую эффективность сухой лазерной очистки. Наилучшие результаты получены при настройке выходных параметров: мощность 20 Вт (фактически 15,5 Вт), частота следования импульсов 200 кГц, расстояние между линиями обработки 0,01 мм. Оптимальная скорость для очистки серебра 5000 мм/с. Однородность очистки без видимых следов необработанной поверхности достигается последовательным повторением (3 прямых и 3 диагональных проходов с углом поворота 45°).

2. Применение лазерного метода очистки серебряных монет позволило улучшить их состояние с исходного VF (Very Fine) до XF или EF (Extremely Fine), а в сочетании с финишным полированием («Фторопол М» зернистостью 0,6–0,8 мкм в растворе глицерина C₃H₈O₃) до состояния UNC (Uncirculated), что подтверждается существенным возрастанием (в 4–6 раз) коэффициента отражения зеркальной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шемаханская, М. С. Реставрация металла: метод. рекомендации / М. С. Шемаханская; под ред. В. Н. Дедик. М.: ВНИИР, 1989. 157 с.
2. Малкиель, И. К. Применение лазерных технологий при реставрации предметов искусства / И. К. Малкиель // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 2. С. 69–74.
3. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В. П. Вейко, В. Н. Смирнов, А. М. Чирков, Е. А. Шахно. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 103 с.
4. Международная система оценки монет. URL: <https://fildtorg.ru/articles/mezhdunarodnaya-sistema-ocenki-sostoyaniya-monet/>. Дата публ.: 10.10.2018.
5. Вейко, В. П. Сборник задач по лазерным технологиям / В. П. Вейко, Е. А. Шахно. Изд. 3-е, испр. и доп. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 67 с.
6. Баландина, Л. Н. Исследование очистки окислов с медной поверхности методом лазерной абляции / Л. Н. Баландина, К. Л. Попов, М. А. Коротаева // Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии: четвертая Всерос. науч.-техн. конф. студентов, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 4–6 апр. 2012 г. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. URL: https://studvesna.ru/db_files/articles/652/article.pdf.
7. Парфенов, В. А. Физические основы лазерной очистки произведений искусства / В. А. Парфенов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 10. С. 62–74.
8. Лазерная очистка поверхностей металлов: физические процессы и применение / В. П. Вейко, Т. Ю. Мутин, В. Н. Смирнов [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 4. С. 30–36.
9. Лазерное термоупрочнение деталей машиностроения. Технологический процесс: ГОСТ Р 58432–2019. Введ. 27.09.2019. Москва: Стандартинформ, 2019. 16 с.

10. Лабораторный практикум по лазерным микротехнологиям. Ч. I: Лазерная обработка конструкционных материалов: учеб. пособие / Э. И. Агеев, В. П. Вейко, С. Г. Горный [и др.]. СПб.: Ун-т ИТМО, 2017. 79 с.
11. PHOTON RT UV-VIS-MWIR Спектрофотометры для оптиков / ООО «ЭссентОптикс». URL: https://www.essentoptics.com/f/file/PhotonRT_%D1%80%D1%83%D1%81_092019.pdf.

Поступила 15.08.2024

Подписана в печать 18.10.2024

Опубликована онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Shemakhaskaya M. S. (1989) *Metal Restoration: Method, Recommendations*. Moscow, All-Union Scientific-Research Institute of Restoration. 157 (in Russian).
2. Malkiel I. K. (2011) Application of Laser Technologies in the Restoration of Art Objects. *Journal of Instrument Engineering*, 54 (2), 69–74 (in Russian).
3. Veiko V. P., Smirnov V. N., Chirkov A. M., Shakhno E. A. (2013) *Laser Cleaning in Mechanical Engineering and Instrument Making*. Saint Petersburg, National Research University Information Technologies, Mechanics and Optics. 103 (in Russian).
4. *International Coin Grading System* (2018). Available at: <https://fildtorg.ru/articles/mezhdunarodnaya-sistema-ocenki-sostoyaniya-monet/> (in Russian).
5. Veyko V. P., Shakhno E. A. (2007) *Collection of Problems on Laser Technologies*. 3rd Ed. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University Information Technologies, Mechanics and Optics. 67 (in Russian).
6. Balandina L. N., Popov K. L., Korotaeva M. A. (2012) Study of Cleaning Oxides from A Copper Surface Using Laser Ablation. *Studencheskaya Nauchnaya Vesna 2012: Mashinostroitel'nye tekhnologii: chetvertaya Vseros. nauch.-tekh. konf. studentov, MGTU im. N. E. Baumana, 4-6 apr. 2012 g.* [Student Scientific Spring 2012: Mechanical Engineering Technologies. All-Russian Scientific and Technical Conference of Students]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University. Available at: URL: https://studvesna.ru/db_files/articles/652/article.pdf (in Russian).
7. Parfenov V. A. (2017) Physical Basis of Laser Cleaning of Works of Art. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, (10), 62–74 (in Russian).
8. Veiko V. P., Mutin T. Yu., Smirnov V. N., Shakhno E. A., Batishche S. A. (2008) Laser Cleaning of Metal Surfaces: Physical Processes and Applications. *Journal of Instrument Engineering*, 51 (4), 30–36 (in Russian).
9. State Standard P 58432–2019. *Laser Thermal Hardening of Mechanical Engineering Parts*. Technological Process. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 16 (in Russian).
10. Ageev E. I., Veiko V. P., Gornyi S. G., Odintsova G. V., Petrov A. A. (2017) *Laboratory Workshop on Laser Microtechnologies. Part I: Laser Processing of Structural Materials*. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University Information Technologies, Mechanics and Optics. 79 (in Russian).
11. LLC “EssentOptics” (2019) *PHOTON RT UV-VIS-MWIR Spectrophotometers for Opticians*. Available at: https://www.essentoptics.com/f/file/PhotonRT_%D1%80%D1%83%D1%81_092019.pdf (in Russian).

Received: 15.08.2024

Accepted: 18.10.2024

Published online: 31.01.2025