

УДК 621.375.826

Применение лазерного излучения для расчистки металлической поверхности политехнических предметов на примере рейсфедера

Богданов Александр Владимирович

mtbmstu@mail.ru

Михайлова Анна Владимировна

mikhannavlad11@gmail.com

Сидельникова Софья Дмитриевна

khomenko.sofa.120702@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматривается процесс послойного удаления продуктов коррозии с металлических изделий для разработки оптимальной методики лазерной очистки. Исследуется влияние длины волны и длительности импульса инфракрасного излучения (1064 нм, наносекундный диапазон) при различных мощностях. Для анализа применяются оптическая и сканирующая электронная микроскопия, а также микрорентгеновская спектрометрия. Полученные результаты позволяют комплексно понять механизмы лазерной очистки и служат основой для выбора оптимальных режимов обработки исследуемых материалов.

Ключевые слова: лазерная расчистка, лазерное излучение, нейзильбер, морфология поверхности

The use of laser radiation for cleaning the metal surface of polytechnic objects using the example of a reysfeder

Bogdanov Alexander Vladimirovich

mtbmstu@mail.ru

Mikhailova Anna Vladimirovna

mikhannavlad11@gmail.com

Sidelnikova Sofya Dmitrievna

khomenko.sofa.120702@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This article examines the process of layer-by-layer removal of corrosion products from metal objects in order to develop an optimal laser cleaning methodology. The influence of wavelength and pulse duration of infrared radiation (1064 nm, nanosecond range) at different power levels is studied. Optical and scanning electron microscopy, as well as micro-X-ray spectrometry, are used for analysis. The results provide a comprehensive understanding of laser cleaning mechanisms and serve as a basis for selecting optimal treatment modes for the materials under study.

Keywords: laser cleaning, laser radiation, nickel silver, surface morphology

Введение. Цель работы — разработка оптимального метода очистки музейных предметов на примере рейсфедера, требующего удаления продуктов коррозии без повреждения металлической основы и декоративных элементов [1]. Традиционные механические способы часто оказываются слишком агрессивными, тогда как лазерная очистка обеспечивает высокую избиратель-

ность, минимальный контакт и контроль процесса [2]. Несмотря на широкое применение лазеров в сохранении культурного наследия, остаются нерешенными вопросы сохранности первоначальной поверхности, предотвращения нежелательных слоев, контроля морфологии после обработки и выработки практической методологии.

Материалы и методы. Для проведения эксперимента был выбран рейсфедер (рис. 1), составляющие части которого выполнены из различных сплавов [3, 4]. Кончик выполнен из стали, в то время как фиксирующая гайка — из нейзильбера. У двух выбранных сплавов сильно отличаются химический состав и свойства коррозионного слоя, а также сами металлы обладают различными теплопроводностью, коэффициентами отражения и др. [5, 6].



Рис. 1. Фотофиксация рейсфедера

В данной работе проведено исследование того, как изменение мощности импульса при постоянной длине волны и длительности импульса может влиять на удаление с помощью лазера различных слоев коррозии, образовавшихся на старинных металлических предметах. Поверхность рейсфедера, выполненного из стали, используется для оценки выбранного режима лазерной очистки. Пороговые значения повреждения и удаления определяются как для металлической подложки, так и для коррозионных слоев, а химический анализ облученных поверхностей направлен на выявление любых изменений, вызванных лазером. Конкретная цель состоит в том, чтобы определить значения интенсивности, достаточные для контролируемого удаления продуктов коррозии с металлической подложки без изменения первоначальной поверхности объекта или повреждения металлической подложки. В план проекта входит изучение инфракрасного (1064 нм) лазерного излучения с различной мощностью излучения. В работе были рассмотрены следующие режимы расчистки: скорость — 1000 мм/с, частота — 80 кГц, повторы — 10, мощность 15–20 % (максимальная мощность установки 55 Вт). Работа была проведена с помощью лазерного комплекса «SharpMark», Nd:YAG-лазера с длительностью импульса до 120 нс и максимальной частотой повторения 200 кГц [7].

Для оценки состояния поверхности до и после расчистки, а также исследования химического состава был использован метод микрорентгеновской спектроскопии с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM4000Plus, оснащенного SE-, BSE- и EDS-детекторами.

Результаты и обсуждения. В работе приведены составы поверхности до и после расчистки как стального участка, так и поверхности, выполненной из нейзильбера. В табл. 1 даны результаты элементного анализа материала кончика рейсфедера, а в табл. 2 — состав сплава гайки.

Таблица 1

Результаты элементного анализа сплава наконечника, [%, масс.]

Fe	Mn	S	Si	Cl
97,5	0,7	0,2	1,2	0,2

Таблица 2

Результаты элементного анализа сплава гайки, [%, масс.]

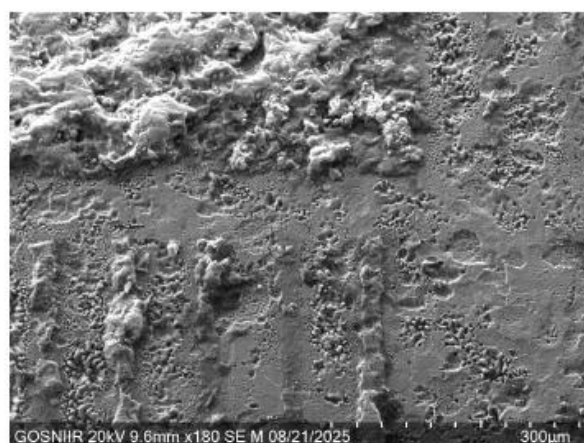
Cu	Zn	Ni	Fe	Si	Mn
57,5	24,3	15,7	0,7	0,4	0,1

Элементный анализ не позволяет нам получить данные о марке стали, так как данный метод не фиксирует точное количество углерода в пробе. Химический анализ коррозионного слоя, расположенного на металле, показал, что в его состав входят кислород, натрий, калий, кальций и повышенное содержание хлора.

Полученные данные указывают на то, что деталь изготовлена из нейзильбера. Химический анализ корродировавшей поверхности гайки показал, что на поверхности присутствуют соединения меди и цинка с кислородом, а также углерод, сера и хлор.

На снимках стальной поверхности, где зафиксировано состояние металла до и после расчистки (рис. 2), видно, что при мощности 15 % и выбранном количестве повторений поверхность обрабатываемого участка оплавляется, формируются борозды от прохождения луча. Такое существенное изменение морфологии поверхности недопустимо при работе с музейными предметами. На снимке также видно, что в промежутках между следами прохождения лазера остались продукты коррозии. Это говорит о том, что помимо изменений в мощности необходимо изменить размер пятна или расстояние между линиями.

Фотофиксация поверхности гайки до и после расчистки показано на рис. 3. Обработка поверхности была проведена при 20 % от полной мощности лазерной установки.

**Рис. 2.** BSE-изображение поверхности стального наконечника рейсфедера ($\times 180$)

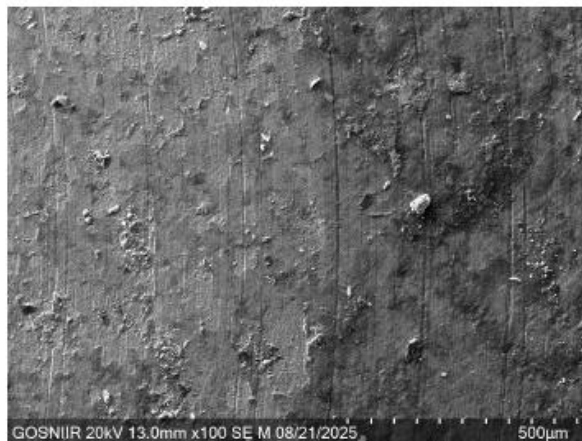


Рис. 3. BSE-изображение поверхности гайки до и после расчистки ($\times 100$)

При работе с гайкой из нейзильбера коррозия удаляется не полностью и оплавления поверхности не происходит.

Заключение. По итогам проведенной работы было установлено, что для обработки стального участка требуется снижение мощности излучения или сокращение количества повторений. Также важно изменить расстояние между линиями или размер пятна для достижения более качественного удаления коррозионного слоя и загрязнений с поверхности. Режим расчистки для нейзильбера также необходимо скорректировать, поскольку продукты коррозии фрагментарно сохранились на поверхности.

Список источников

- [1] Buccolieri G., Nassisi V., Torrisi L. et al. Analysis of selective laser cleaning of patina on bronze coins. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2014, vol. 508, art. no. 012032.
- [2] Marczak J., Koss A., Targowski P., Góra M., Strzelec M., Sarzyński A., Skrzeczanowski W., Ostrowski R., Rycyk A. Characterization of Laser Cleaning of Artworks. *Sensors*, 2008, vol. 8, pp. 6507–6548. <https://doi.org/10.3390/s8106507>
- [3] Ботвинников А.Д. *Современные средства механизации графических работ*. Москва, Высшая школа, 1963, 173 с., рис. 178.
- [4] Паначев В.Д., Бушуев А.Ю., Саэтгалиев Р.Р. *Рейсфедер*. Авторское свидетельство № 1391959 А1 СССР, МПК В43К 17/00, 1988. EDN: TYVOEK
- [5] Базанчук Г.А., Кураков С.В., Котельников П.Н. Применение аддитивных технологий в реставрации предметов политехнического типа с периодическим зубчатым профилем. *Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение*, 2024, № 1 (9), с. 7–18. EDN: LTFBSW
- [6] Базанчук Г.А., Кураков С.В., Тихомиров Г.В. Пантограф: история универсальной конструкции. *Жизнь Земли*, 2024, т. 46, № 1, с. 81–89. https://doi.org/10.29003/m3776.0514-7468.2024_46_1/81-89
- [7] Кудрявцев И.В., Привезенцев В.И. Расчетная оценка режимов импульсной лазерной сварки нейзильбера. *Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике (РНТК ФТИ-2018): сб. тр. конф.* Москва, Изд-во Московский технологический университет (МИРЭА), 2018, с. 727–732. EDN: YWQWOT