

**Художественное наследие.
Исследования. Реставрация.
Хранение.**

Art Heritage. Research. Storage. Conservation.

№2 (18) 2026

МИНИСТЕРСТВО КУЛЬТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ РЕСТАВРАЦИИ» (ФГБНИУ «ГОСНИИР»)

Художественное наследие.
Исследования. Реставрация. Хранение.
Art Heritage. Research. Storage. Conservation.

Международное сетевое рецензируемое научное издание

№2 (18) 2026

МОСКВА 2026

THE MINISTRY OF CULTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION

THE STATE RESEARCH INSTITUTE FOR RESTORATION

Художественное наследие.
Исследования. Реставрация. Хранение.
Art Heritage. Research. Storage. Conservation.

An international peer-reviewed online scientific journal

№2 (18) 2026

MOSCOW 2026

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Д. Б. Антонов

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

А. С. Макарова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**А. Н. Балаш, В. В. Баранов, С. И. Баранова, Г. И. Вздорнов, В. Г. Гагарин,
М. Ф. Дубровин, В. В. Игошев, С. С. Ипполитов, С. А. Кочкин, А. В. Кыласов,
Л. И. Лифшиц, Т. К. Мкртычев, А. В. Окороков, С. А. Писарева, И. Н. Проворова,
И. Г. Равич, Н. Л. Ребрикова, Н. В. Синявина, С. В. Филатов, Н. Е. Шафажинская,
О. В. Яхонт.**

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ:

О. Г. Кирьянова

РЕДАКТОР:

Г. И. Герасимова

Выходит 4 раза в год

Адрес редакции:

107014, г. Москва, ул. Гастелло, д. 44 стр. 1

e-mail: journal@gosniir.ru

Сайт: <http://www.journal-gosniir.ru/>

Свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ. № ФС77-82901 ОТ 14.03.2022

ISSN 2782-5027

EDITOR-IN-CHIEF:

Dmitriy B. Antonov

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Anastasia S. Makarova

EDITORIAL BOARD:

**A.N. Balash, V.V. Baranov, S.I. Baranova, G.I. Vzdornov, V.G. Gagarin, M.F. Dubrovin,
V.V. Igoshev, S.S. Ippolitov, S.A. Kochkin, A.V. Kylasov, L.I. Lifshic, T.K. Mkrttychev,
A.V. Okorokov, S.A. Pisareva, I.N. Provorova, I.G. Ravich, N.L. Rebrikova, N.V. Sinyavina,
S.V. Filatov, N.E. Shafazhinskaya, O.V. Yahont.**

EXECUTIVE SECRETARY:

O.G. Kiryanova

EDITOR:

G.I. Gerasimova

Quarterly journal

Address:

44-1, Gastello St., Moscow, Russia, 107014

e-mail: journal@gosniir.ru

Web-site: <http://www.journal-gosniir.ru/>

Mass media registration certificate EL. N° FS77-82901 from 14.03.2022

ISSN 2782-5027

СОДЕРЖАНИЕ

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-7-26

Беккер А. О., Дубровин М. Ф.

Уточнения и дополнения к информации

о времени работы московских пробирных мастеров XIX века

7

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-27-36

Добровольский С. В., Глуховская Ю. И.

Возможности использования газодинамических способов

формирования материала для реставрации изделий из металла

27

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-37-58

Котельников П. Н., Кураков С. В., Макарова А. С., Самойлов В. Б.

Реставрация памятников из металла методом

холодного газодинамического напыления:

критерии применения и оценка результатов

37

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-59-65

Парфенов В. А.

Лазерная порошковая наплавка:

новое в реставрации памятников из металла

59

DOI: 10.24412/2782-5027-2026-2-66-73

Плахов В. В., Каракуркчи Р. С., Хасиева Е. А.

Цвет, рожденный током: анодирование титана

как искусство и технология

66

CONTENTS

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-7-26

Bekker A. O., Dubrovin M. F.

Clarifications and additions to the information about the working periods of Moscow assay masters of the 19th century

7

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-27-36

Dobrovolsky S. V., Glukhovskaya Yu. I.

Possibilities of using gas-dynamic methods of material formation for the restoration of metal objects

27

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-37-58

Kotelnikov P. N., Kurakov S. V., Makarova A. S., Samoilov V. B.

Restoration of metal monuments using the cold gas-dynamic spraying method: application criteria and results assessment

37

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-59-65

Parfenov V. A.

Direct metal laser sintering: new in the restoration of metal monuments

59

DOL: 10.24412/2782-5027-2026-2-66-73

Plakhov V. V., Karakurkchi R. S., Khasieva E. A.

Color born of amperage: anodizing titanium as art and technology

66

А. О. Беккер, М. Ф. Дубровин

УТОЧНЕНИЯ И ДОПОЛНЕНИЯ К ИНФОРМАЦИИ О ВРЕМЕНИ РАБОТЫ МОСКОВСКИХ ПРОБИРНЫХ МАСТЕРОВ XIX ВЕКА

В статье анализируется информация из основных опубликованных материалов по исследуемой теме. Среди них: *Постникова-Лосева М. М., Платонова Н. Г., Ульянова Б. Л.* Золотое и серебряное дело XV – XX вв. ... (раздел «Указатель клейм на изделиях из драгоценных металлов»); *Иванов. А. Н.* Пробирное дело в России (1700–1946). Руководство и пособие для экспертов-искусствоведов...; *Коварская С. Я.* Произведения мастеров Москвы первой половины XIX века. Каталог собрания гос. историко-культ. музея-заповедника «Московский Кремль»...; адрес-календари «Вся Москва» за вторую половину XIX века. Также привлечены сведения из Базы данных ГОСНИИР «Российские клейма на изделиях декоративно-прикладного искусства из драгоценных металлов» — о времени работы Московских пробирных мастеров XIX века. Сравнительный анализ информации выявил разночтения относительно времени работы пробирных мастеров Москвы XIX века и состава пробирных учреждений этого периода. Впервые проведен сравнительный анализ совокупной информации из различных источников, включая адрес-календари и Базы данных ГОСНИИР. В результате сравнительного анализа этой информации уточнены временные рамки работы пробирных мастеров, подтвержденные фотографиями оттисков клейм этих пробирёров, а также информацией из адрес-календарей. Статья имеет научную и практическую ценность — как для сотрудников музеев, так и для специалистов, занимающихся экспертизой и атрибуцией изделий декоративно-прикладного искусства из драгоценных металлов. Информация, опубликованная в статье, полезна как в научном плане (уточнение времени работы пробирных мастеров и их состава), так и в практическом введении в научный оборот ранее неизвестных оттисков клейм пробирных мастеров.

Ключевые слова: База данных ГОСНИИР, пробирные мастера Москвы XIX века, время работы пробирных мастеров Москвы XIX века, сравнительный анализ периодов работы пробирных мастеров Москвы XIX века, неизвестные пробирные мастера Москвы XIX века, пробирные клейма Москвы XIX века, неизвестные пробирные клейма XIX века.

A. O. Bekker, M. F. Dubrovin

CLARIFICATIONS AND ADDITIONS TO THE INFORMATION ABOUT THE WORKING PERIODS OF MOSCOW ASSAY MASTERS OF THE 19TH CENTURY

The article analyzes information from the main published materials on the topic under study: *Postnikova-Loseva M. M., Platonova N. G., Ulyanova B. L.* Gold and Silversmithing of the 15th – 20th Centuries (section "Index of Hallmarks on Items Made of Precious Metals"), *Ivanov A. N.* Assaying in Russia (1700–1946). A Guide for Art Experts; *Kovarskaya S. Ya.* Works of Moscow Masters of the First Half of the 19th Century. Catalogue of the Collection of the State Historical and Cultural Museum-Reserve "Moscow Kremlin"; address calendars "All Moscow" for the second half of the 19th century and the Database of The State Research Institute for Restoration the "Russian Hallmarks on Items of Decorative and Applied Art Made of Precious Metals" on the working period of Moscow assay offices 19th-century assay masters. A comparative analysis of information from various published sources revealed discrepancies regarding the working period of 19th-century Moscow assay masters, as well as the composition of assay offices during this period. For the first time, a comparative analysis of aggregated information from various sources, including address calendars and The State Research Institute for Restoration Database, was conducted. As a result of this comparative analysis, the timeframes of assay masters' work were clarified, confirmed by photographs of the hallmark impressions of these assay masters, as well as information from Address calendars. This article has scientific and practical value for both museum staff and specialists involved in the examination and attribution of decorative and applied art items made

from precious metals. The information published in the article is useful both scientifically, by clarifying the working periods of assay masters and their composition, and for the practical introduction of previously unknown assay master stamps into scientific circulation.

Keywords: The State Research Institute for Restoration Database, assay masters of Moscow in the 19th century, working periods of assay masters of Moscow in the 19th century, comparative analysis of the working periods of assay masters of Moscow in the 19th century, unknown assay masters of Moscow in the 19th century, assay marks of Moscow in the 19th century, unknown assay marks of the 19th century.

В период 2023–2025 годов в отделе научной реставрации изделий из металла ГОСНИИР проводилась работа по Госзаданию, темой которого являлось «Исследование датированных клейм Московского пробирного надзора 1800–1896 годов».

Естественно, работу мы начали с изучения имеющейся на текущий момент в опубликованных материалах текстовой и визуальной информации о пробирных мастерах Московского пробирного надзора XIX века и их клеймах.

Наиболее полная информация на эту тему — прорисовки небольшого размера (1–1,5 см) клейм пробирных мастеров России с указаниями периода их деятельности — в работе М. М. Постниковой-Лосевой с соавторами [7, с. 147–351], впервые опубликованной в 1968 году, а затем неоднократно переиздававшейся с дополнениями. Судя по качеству информации, авторы пользовались как архивными источниками, так и результатами исследования предметов декоративно-прикладного искусства, находящихся в музеях.

В начале XXI века вышло руководство для экспертов-искусствоведов [3]. В этой работе много текстовой информации об истории пробирного дела в России: Пробирные уставы, состав пробирных учреждений, годы работы пробирных мастеров и т. п., но визуальная информация о том, как выглядят клейма, практически отсутствует. Эти два источника были выбраны за основную сравнительную базу (табл. 1).

Таблица 1. Пробирные мастера Москвы и периоды их работы в XIX веке.
Информация из опубликованных материалов

[7]			[3]	
№№ клейм	Ф. И. О.	Период работы	Ф. И. О.	Период работы
2092; 2093	Вихляев Алексей Иванов	1781– 1809	Вихляев Алексей Иванович	1781– 1806
2098; 2099	Карпинский Михаил Михайлович	1800–1824	Карпинский Михаил Михайлович	1800–1824
2100– 2102	Вихляев Иван	1802 –1818	Вихляев Иван Иванович	1806 –1818
2103	<i>Неизвестный МН</i>	1810–1822	<i>отсутствует</i>	
	<i>отсутствует</i>		Филиппов Григорий Алексеевич	1810–1819
2104	Дубровин Николай Лукич	1822– 1855	Дубровин Николай Лукич	1822– 1862
2105	<i>Неизвестный ВД</i>	1830	<i>отсутствует</i>	
	<i>отсутствует</i>		Мошков Василий Федорович	1823–1824
	<i>отсутствует</i>		Цитович Василий Семенович	1836–1841

[7]			[3]	
№№ клейм	Ф. И. О.	Период работы	Ф. И. О.	Период работы
2106	<i>Дуткин</i>	1838–1846	<i>Дубинин Илья Федорович</i>	1839–1850
2107	Чурмазов Михаил Павлович	1841–1852	Чурмазов Михаил Павлович	1841–1852
2108; 2109	Ковальский Андрей Антонович	1821–1856	Ковальский Андрей Антонович	1822–1856
2110	Авдеев И.	1852– 1862	Авдеев Иван Васильевич	1852– 1865
б/н	Авилов Василий Петрович	1853–1855	<i>отсутствует</i>	
б/н	Ивуков Федор Васильевич	1853	<i>отсутствует</i>	
	<i>отсутствует</i>		Губчиц Александр Иванович	1853
2111; 2112	Савинков Виктор	1855–1888	Савинков Виктор (?)	1858–1879 Затем 1882–1888
б/н	Савинский В.	1856–1878	Савинский Виктор Васильевич.	1859–1894
	<i>отсутствует</i>		Савинский Вениамин Васильевич.	1865–1875
2113	Свечин А	1862–1875	Свечин Аггей Григорьевич	1862–1875
2114	Неизвестный ЕК	1872–1875	Константинов Иван Ефимович	1876–1882
2115	Смирнов Александр Алексеевич	1878–1891	Смирнов Александр Алексеевич	1861–1894
2116	<i>Шебанов Семен Алексеевич</i>	1883	<i>Шостак Сергей Александрович</i>	1883–1894
	<i>отсутствует</i>		Шостак Сергей Александрович	1883–1894
2117	Неизвестный	1883– 1886	Петров Василий Александрович	1883– 1894
2118	Корбицкий Н.	1886–1887	<i>отсутствует</i>	
2119; 2120	Романов А.	1886–1894	<i>отсутствует</i>	
2121; 2122	Олекс Лев Федорович	1890–1896	Олекс Лев Федорович	1889–1890 1892–1896
2123; 2124	Вюрст Рудольф Андреевич	1891–1894	<i>отсутствует</i>	
2125	Арцибашев Анатолий Аполлонович	1891–1896	Арцибашев Анатолий Аполлонович	1890–1896
б/н	Васильев Алексей Флавиевич	1891–1899	Васильев Алексей Флавиевич	1896
2126	Страдомский Н.	1892–1894	<i>отсутствует</i>	
б/н	Сковронский А.	1894	Сковронский Александр Владиславович	1896
2127	Милютин Сергей Николаевич	1896	Милютин Сергей Николаевич	Конец 1896

[7]			[3]	
№№ клейм	Ф. И. О.	Период работы	Ф. И. О.	Период работы
2128	Фалеев Михаил Николаевич	1896	Фалеев Михаил Николаевич	Конец 1896

Из таблицы хорошо видны разночтения в составе пробирных учреждений Москвы, а также в периодах работы пробирёров. Полужирным курсивом выделены разночтения во времени работы пробирных мастеров, а также их имена.

В последнее время в открытом доступе появились работы [4; 5; 6; 8], в которых опубликованы фотографии оттисков клейм московского пробирного надзора. Эти фотографии дают представление о том, как выглядят клейма в реальности, но снимки маленького размера и не пригодны для обсуждения в случае решения спорных вопросов о подлинности клейм, зачастую возникающих в процессе исследования предмета ДПИ.

Для устранения указанных выше недостатков при исследовании оттисков клейм в нашем институте уже тридцать лет ведётся работа по созданию и пополнению базы данных ГОСНИИР «Российские клейма на изделиях декоративно-прикладного искусства из драгоценных металлов» (в дальнейшем — База данных). Она содержит как макрофотографии оттисков клейм пробирного надзора Москвы, так и текстовую информацию о клеймах, включая время их использования.

Естественно, возникает вопрос, какому источнику можно доверять? Сравнивая информацию из *табл. 1*, а также каталога [5] и Базы данных ГОСНИИР, мы постараемся ответить на этот вопрос.

Вихляев Алексей Иванов. Оттиски пробирных клейм, опубликованные как С. Я. Коварской [5, с. 35–36], так и в Базе данных, не выходят за временные рамки, указанные в других работах [3, с. 720; 7, с. 204]. Сказать, кто из авторов прав о времени окончания работы мастера, мы в настоящее время не можем.

Карпинский Михаил Михайлович. Информация во всех источниках одинаковая.

Вихляев Иван Иванович. В каталоге [5, с. 39, 40, 64, 289] и Базе данных ГОСНИИР (*ил. 1*) представлены изделия с клеймами этого пробирного мастера, датированные 1801 годом. Следовательно, информация о начале работы И. И. Вихляева ошибочна как в коллективном издании [7, с. 205], так и у А. Н. Иванова [3, с. 720]. Год окончания работы пробирёра в источниках совпадает.

М Н, неизвестный пробирный мастер, представлен только в коллективном издании [7, с. 205]. В остальных источниках в Москве пробирные клейма с такими инициалами не зафиксированы. Возможно, авторы неверно определили город, в котором трудился этот пробирёр. Пробирный мастер с такими инициалами работал в указанный период времени в Туле (см. Примечание в *табл. 2*). Такие ошибки авторов нам известны, например, пробирный мастер Варшавы указан как пробирёр Санкт Петербурга [1, с. 92–93].

Филиппов Григорий Алексеевич представлен только в работе А. Н. Иванова [3, с. 726], возможно, пробирёр не имел своих клейм, поэтому в других источниках он не зафиксирован.



Ил. 1'.

Оттиски клейм пробирного мастера
И. И. Вихляева, 1801 г.

*Все фотографии — из Базы данных ГОСНИИР.

Дубровин Николай Лукич. Оттиски пробирных клейм, опубликованные С. Я. Коварской [5] и в Базе данных, не выходят за временные рамки, указанные в иных публикациях [3, с. 721; 7, с. 205]. Сказать, кто из авторов прав о времени окончания работы пробирного мастера, мы в настоящее время не можем.

В Д., неизвестный пробирный мастер, упомянут только в работе М. М. Постниковой-Лосевой с соавторами [7, с. 205]. В других источниках информация о пробирном мастере с такими инициалами отсутствует. Возможно, авторы неправильно прочли буквы на клейме.

Мошкова Василия Федоровича упоминает А. Н. Иванов [3, с. 724]. С. Я. Коварская [5, с. 60, 411] опубликовала два предмета с клеймами пробирного мастера с инициалами «В М» (автор не определил мастера), датируемыми 1822 годом. Мы считаем, что это клейма В. Ф. Мошкова, но он начал работать на год раньше, чем указано у А. Н. Иванова.

Цитович Василий Семенович встречается только в работе А. Н. Иванова [3, с. 727]. В других источниках информация о нем отсутствует. Возможно, мастер не имел собственного клейма.

Дуткин [7, с. 205] (имя и отчество неизвестны). В каталоге [5, с. 156–159, 198, 343] клейма с инициалами «И Д» приписываются Дуткину Ивану. В работе А. Н. Иванова Дуткина нет, но есть Дубинин Илья Федорович [3, с. 721]. Эта информация подтверждается также данными адрес-календарей: начиная с 1848 года, Дубинин в них упоминается как Дубнов Илья Федорович. Согласно А. Н. Иванову, этот пробирный мастер имел клейма, начиная с 1839 года, но в Базе данных представлены фотографии оттисков клейм этого пробирного мастера, датированные 1838 годом [3, с. 721] (ил. 2). В каталоге С. Я. Коварской [5, с. 157, 158] также опубликованы фотографии клейм этого пробирного мастера, датируемые 1838 годом [5, с. 56, 159], а также текстовая информация о клейме этого года еще на одном предмете [5, с. 343]. Следовательно, информация А. Н. Иванова о времени начала работы И. Ф. Дубинина неправильна. С другой стороны, коллективный труд [7, с. 205] датирует окончание работы этого мастера 1846 годом, что также неверно, так как в Базе данных есть

клейма названного пробирёра от 1849 года (ил. 3), то есть в этом случае мы видим ошибки у обоих авторов.



Ил. 2.

Оттиски клейм пробирного мастера
И. Ф. Дубинина, 1838 г.



Ил. 3.

Оттиски клейм пробирного мастера
И. Ф. Дубинина (И. Ф. Дубнова), 1849 г.

Чурмазов Михаил Павлович. Оттиски пробирных клейм, опубликованные как в работе С. Я. Коварской [5], так и в Базе данных, не выходят за временные рамки, указанные в упоминавшихся работах [3, с. 727; 7, с. 205].

Ковальский Андрей Антонович — в публикации «Золотое и серебряное дело XV–XX вв.» [7, с. 205] и труде А. Н. Иванова [3, с. 722] есть разночтения относительно начала работы этого пробирного мастера; кто из исследователей прав, мы пока сказать не можем. Информация о времени использования пробирных клейм из каталога [5] и Базы данных не выходит за рамки, указанные у предыдущих авторов.

Авдеев И. Как полагает А. Н. Иванов [3, с. 719], Авдеев Иван Васильевич имел клейма уже в 1852 году. Эта же дата фигурирует в труде М. М. Постниковой-Лосевой и соавторов [7, с. 205]. Но С. Я. Коварская опубликовала клеймо И. В. Авдеева, датированное 1850 годом [5, с. 386]. Как показывает содержание табл. 1, имеется нестыковка в датах относительно конца работы этого пробирного мастера. Информация из Базы данных ГОСНИИР вписывается в датировки вышеназванных авторов.

Авилов Василий Петрович представлен только в работе [7, с. 205]. В остальных источниках этот мастер не упоминается. В адрес-календарях такой сотрудник в штате пробирного учреждения также не значится.

Ивуков Федор Васильевич также представлен только в одном издании [7, с. 205]. В остальных источниках такой мастер отсутствует; также в адрес-календарях такой сотрудник в штате пробирного учреждения не значится.

Губчиц Александр Иванович упоминается в работе А. Н. Иванова [3, с. 91]. В адрес-календаре состоял в штате пробирного учреждения только в 1854 году. Скорее всего, своих клейм не имел.

Савинков Виктор [7, с. 205], **Савинков Виктор (?)** [3, с. 725] — в адрес-календарях Москвы такой пробирный мастер не зафиксирован. В то же время как в опубликованных материалах, так и в Базе данных ГОСНИИР много фотографий оттисков пробирных клейм с инициалами «В С». Причем, первое такое клеймо в Базе данных датируется 1853 годом (ил. 4).



Ил. 4.

Оттиск клейма пробирного мастера
В. В. Савинского, 1853 г.

В одной из публикаций [7, с. 205] указан В. Савинский (табл. 1), но в адрес-календарях в штате Московского пробирного учреждения числятся пробирёры **Вениамин** Васильевич Савинский (1852–1857, 1863–1874) и **Виктор** Васильевич Савинский в 1855–1890 годы, — возможно, братья (табл. 2). В настоящий момент мы не знаем, есть ли разница в их пробирных клеймах. Но мы можем утверждать, что клейма с инициалами «В С» использовались раньше, чем указано в опубликованных материалах.

Свечин А. [7, с. 205], **Свечин Аггей Григорьевич** [3, с. 725]. В адрес-календарях в штате пробирного надзора Москвы в 1851–1854 годах, управляющий этим учреждением в 1866–1876 годах. Первое клеймо в Базе данных ГОСНИИР с его инициалами датируется 1853 годом (ил. 5).



Ил. 5.

Оттиск клейма пробирного мастера
А. Г. Свечина, 1853 г.

Мы видим (табл. 2), что в обеих работах начальная дата работы А. Г. Свечина указана неверно. Окончание работы пробирного мастера совпадает как в опубликованных материалах, так и в Базе данных ГОСНИИР.

«**Е К**», *неизвестный пробирный мастер* [7, с. 205], **Константинов Иван Ефимович** [3, с. 722]. В адрес-календарях в штате числится в 1867–1882 годах в разных

должностях. Первое клеймо в Базе данных ГОСНИИР с его инициалами датируется 1853 годом (ил. 6).



Ил. 6.

Оттиски клейм пробирного мастера
И. Е. Константинова, 1875 г.

Мы видим (табл. 2), что А. Н. Иванов неверно указал начало работы этого пробирного мастера [3, с. 722], а в коллективный труд [7, с. 205] вкралась ошибка в дате окончания его работы.

Смирнов Александр Алексеевич. В адрес-календарях в штате в различных должностях числится в 1856–1891 годах. Первое клеймо в Базе данных ГОСНИИР, принадлежащее ему, датируется 1857 годом, последнее – 1876 годом (ил. 7). Фотографии показывают, что в книге 1995 года [7, с. 205] ошибочно указано как начало работы мастера, так и ее окончание. У А. Н. Иванова [3, с. 726] начало работы А. А. Смирнова вписывается в информацию из адрес-календарей, а окончание выходит за указанные рамки. Здесь следует отметить, что и информация из Базы данных также выходит за нижнюю границу.



Ил. 7.

Оттиски клейм пробирного мастера
А. А. Смирнова, 1857 и 1876 гг.

Кудрин Александр Стахеевич. В адрес-календарях числится в штате Пробирной палатки в должности младшего пробирёра в 1879–1882 годах (ил. 8). В других опубликованных материалах [3; 7] информация об этом пробирёре отсутствует. В каталоге выставки [4, с. 176] его клейма, датируемые 1879 и 1882 годами, ошибочно

приписаны пробирному мастеру А. А. Ковальскому. Нами опубликована статья об идентификации клейм, принадлежащих А. С. Кудрину [2].



Ил. 8.

Оттиски клейм пробирного мастера
А. С. Кудрина, 1879 и 1882 гг.

Шебанов Семен Алексеевич [7, с. 205]. В адрес-календарях Москвы нет такого пробирного мастера. А. С. Шебанов работал в Саратове и Казани (см. Примечание в табл. 2).

Шостак Сергей Александрович [3, с. 727], согласно адрес-календарю, в штате Пробирной палатки упоминается только в 1883 г. в должности пробирёра. Источник информации о том, что он работал до 1894 г., нам не известен. В Базе данных представлены клейма С. А. Шостака, датированные 1883 годом.

«**В П**», *неизвестный пробирный мастер* [7, с. 205], **Петров Василий Александрович** [3, с. 724]. В адрес-календарях в штате Пробирной палатки числится в 1883–1886 годах в должности пробирёра. Источник информации о том, что он работал до 1893 г., нами не найден. В Базе данных представлены клейма В. А. Петрова, датированные 1883–1886 годами, что совпадает с информацией из коллективного труда [7, с. 205].

Корбицкий Н. упоминается в Москве только в одной работе [7, с. 205] (см. Примечание в табл. 2).

Кулаков Николай Васильевич. В адрес-календарях числится в штате Пробирной палатки в 1883–1888 годах в должности помощника управляющего. В Базе данных представлено только одно клеймо этого мастера, датируемое 1887 годом. В работе А. Н. Иванова [3, с. 723] как пробирный мастер Москвы не упоминается, но указано, что он работал в Санкт-Петербурге в 1895–1898 годах.

Романов А. [7, с. 205], **Романов Александр Васильевич.** В адрес-календарях числится в штате Пробирной палатки в различных должностях в 1885–1895 годах. Фотографии показывают, что временные рамки работы этого мастера, указанные в коллективном издании [7, с. 205], не точны (ил. 9). В руководстве [3, с. 725] информация о работе А. В. Романова в Москве отсутствует.

Олекс Лев Федорович. В адрес-календарях в штате Пробирной палатки числится в 1889–1899 годах в различных должностях. В Базе данных представлены клейма этого пробирного мастера, датируемые 1889 годом (ил. 10), что указывает на ошибочность даты начала его работы, он продолжал трудиться и после 1896 года. Это последний год, когда применялись датированные клейма пробирных мастеров.

Вюрст Рудольф Андреевич в адрес-календарях в штате Пробирной палатки числится в 1889–1892 годах в различных должностях. В руководстве А. Н. Иванова

[3, с. 719–727] такой пробирный мастер не указан; также нам неизвестно, как дата окончания его работы определена в коллективном издании [7, с. 205]. В Базе данных представлены клейма Р. А. Вюрста только за 1891 год.



Ил. 9.

Оттиски клейм пробирного мастера
А. В. Романова, 1885 и 1895 гг.



Ил. 10.

Оттиск клейма пробирного мастера
Л. Ф. Олексы, 1889 г.

Арцибашев Анатолий Аполлонович в адрес-календарях в штате Пробирной палатки числится в 1883, 1884, 1889–1898 годах в различных должностях. В Базе данных самые ранние клейма, принадлежащие А. А. Арцибашеву, датируются 1888 годом (ил. 11). Следовательно, мы можем утверждать, что информация о начале работы этого мастера ошибочна в опубликованных материалах [3; 7].



Ил. 11.

Оттиски клейма пробирного мастера
А. А. Арцибашева, 1888 г.

Страдомский Н. упоминается в Москве только в одной работе [7, с. 205] (см. Примечание в табл. 2). В Базе данных клейма пробирного мастера с инициалами «Н С» также не представлены.

Сковронский Александр Владиславович в адрес-календарях в штате числится в 1893, 1894, 1889–1899 годах в различных должностях. В Базе данных самые ранние клейма, принадлежащие А. В. Сковронскому, датируются 1892 годом. Из таблицы 2 мы видим, что в коллективной публикации [7, с. 205] неточно указано как начало работы этого пробирного мастера, так и дата ее окончания, а в руководстве [3, с. 726] допущена ошибка о начале его работы. В Базе данных представлены клейма за 1892–1896 годы (ил. 12).



Ил. 12.

Оттиски клейм пробирного мастера
А. В. Сковронского, 1892 и 1896 гг.

Милютин Сергей Николаевич. В опубликованных материалах [3; 7] нет расхождений с информацией из адрес-календарей о времени работы этого пробирного мастера. Клейма С. М. Милютина в Базе данных не представлены.

Фалеев Михаил Николаевич. В двух изданиях [3; 7] сведения не противоречат информации из адрес-календарей. В Базе данных представлено клеймо М. Н. Фалева, датированное 1896 годом.

В конце XIX века появился новый тип датированных клейм, в которых вся информация: инициалы пробирёра, год простановки, цифры пробы и герб Москвы заключены в овальный щиток небольшого размера, — мы назвали этот тип пробирных клейм «полные». В Базе данных они датируются периодом 1887–1896 годов. В опубликованных материалах [3, с. 210, 214; 7, с. 205] приведены фотографии оттисков клейм только двух пробирных мастеров: Л. Ф. Олексы и А. А. Арцибашева. В Базе данных этот тип клейм представлен photographиями оттисков, принадлежащих А. А. Арцибашеву, Р. А. Вюрсту, Н. В. Кулакову, Л. Ф. Олексе, А. В. Романову, В. В. Савинскому, А. В. Сковронскому (ил. 13).



а)



б)



в)



г)



д)



е)



ж)

Ил. 13.

Оттиски «полных» клейм пробирных мастеров, принадлежащих: «а» – А. А. Арцибашеву, «б» – Р. А. Вюрсту, «в» – Н. В. Кулакову, «г» – Л. Ф. Олексе, «д» – А. В. Романову, «е» – В. В. Савинскому, «ж» – А. В. Сковронскому

Таблица 2. Пробирные мастера Москвы и периоды их работы в XIX веке.
Информация из опубликованных материалов и Базы данных ГОСНИИР

[1]			[3]		[5]		База данных ГОСНИИР		Примечания
№№ клейм	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О	Наличие клейм	Ф.И.О	Наличие клейм	
2092; 2093	Вихляев Алексей Иванов	1781– 1809	Вихляев Алексей Иванович	1781– 1806	Вихляев Алексей Иванович	1800– 1802; 1804	Вихляев Алексей Иванович	1800– 1802	
2098; 2099	Карпинский Михаил Михайлович	1800–1824	Карпинский Михаил Михайлович	1800– 1824	Карпинский Михаил Михайлович	1803; 1805; 1806– 1811 1817– 1820 1822 1823	Карпинский Михаил Михайлович	1802 1805– 1807 1818– 1821 1823	
2100– 2102	Вихляев Иван	1802 – 1818	Вихляев Иван Иванович	1806 – 1818	Вихляев Иван Иванович	1801– 1804 1807– 1809 1811 1813 1816 1817	Вихляев Иван Иванович	1801– 1804 1807– 1810 1814– 1817	Согласно информации из [5] и Базы данных, И. И. Вихляев имел клейма уже в 1801 г.
2103	Неизвестный М Н	1810–1822	<i>отсутствует</i>		<i>отсутствует</i>		<i>отсутствует</i>		Нейманов (имени нет), Тула, 1812–1824 гг. [2, с. 724]. Нейманов Иван, Тула, №3739, 1812–1827 [1].
	<i>отсутствует</i>		Филиппов Григорий Алексеевич	1810– 1819	<i>отсутствует</i>		<i>отсутствует</i>		

[1]			[3]		[5]		База данных ГОСНИИР		Примечания
№№ клейм	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О	Наличие клейм	Ф.И.О	Наличие клейм	
2104	Дубровин Николай Лукич	1822– 1855	Дубровин Николай Лукич	1822– 1862	Дубровин Николай Лукич	1824 1826– 1842 1849	Дубровин Николай Лукич	1824 1826– 1837 1839– 1841	По адрес-календарям Н. Л. Дубровин числился в штате Главной Московской пробирной палатки до 1862 г.
2105	Неизвестный В Д	1830	<i>отсутствует</i>		<i>отсутствует</i>		<i>отсутствует</i>		
	<i>отсутствует</i>		Мошков Василий Федорович	1823 – 1824	Мастер с инициалами «В М»	1822	<i>отсутствует</i>		Мы считаем, что неизвестный пробирёр с инициалами «В М» в [5] является Василием Федоровичем Мошковым из [2].
	<i>отсутствует</i>		Цитович Василий Семенович	1836– 1841	<i>отсутствует</i>		<i>отсутствует</i>		
2106	Дуткин	1838–1846	Дубинин Илья Федорович	1839 – 1850	Дуткин Иван	1838 ; 1839	Дубинин Илья Федорович	1838 , 1840, 1849	Начиная с 1848 г., в адрес- календарях упоминается как Дубнов Илья Федорович.
2107	Чурмазов Михаил Павлович	1841–1852	Чурмазов Михаил Павлович	1841– 1852	Чурмазов Михаил Павлович	1841 1843 1845 1846	Чурмазов Михаил Павлович	1841 1843 1844 1850	
2108; 2109	Ковальский Андрей Антонович	1821 –1856	Ковальский Андрей Антонович	1822 – 1856	Ковальский Андрей Антонович	1835, 1837 1840– 1851	Ковальский Андрей Антонович	1823, 1841– 1856	В 1854 г. в адрес- календаре записан как Говальский Андр. Антон.

[1]			[3]		[5]		База данных ГОСНИИР		Примечания
№№ клейм	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О.	Наличие клейм	Ф.И.О.	Наличие клейм	
2110	Авдеев И.	1852–1862	Авдеев Иван Васильевич	1852– 1865	Авдеев Иван Васильевич	1850	Авдеев Иван Васильевич	1857– 1861	Согласно работе [5], И. В. Авдеев имел клейма уже в 1850 г.
б/н и изо браже ния	Авилов Василий Петрович	1853–1855	<i>отсутствует</i>				<i>отсутствует</i>		В адрес-календарях такой сотрудник в штате не значится.
б/н и изо браже ния	Ивуков Федор Васильевич	1853	<i>отсутствует</i>				<i>отсутствует</i>		В адрес-календарях такой сотрудник в штате не значится.
	<i>отсутствует</i>		Губчиц Александр Иванович	1853			<i>отсутствует</i>		В адрес-календарях А. И. Губчиц состоит в штате в 1854 г.
2111– 2112	Савинков Виктор	1855–1888	Савинков Виктор (?)	1858– 1860, 1862; 1879– 1888			Клейма пробирных мастеров с инициалами «В С»	1853, 1858; 1860; 1862– 1878; 1883– 1888	В адрес-календарях в штате числятся: Вениамин Васильевич Савинский 1852–1857, 1863–1874 гг., Виктор Васильевич Савинский, 1855–1890 гг. В 1862 г. он ошибочно указан как Владимир .
б/н и изо браже ния	Савинский В.	1856–1878	Савинский Вениамин Васильевич.	1865– 1875					
			Савинский Виктор Васильевич.	1859– 1894					

[1]			[3]		[5]		База данных ГОСНИИР		Примечания
№№ клейм	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О.	Наличие клейм	Ф.И.О.	Наличие клейм	
2113	Свечин А.	1862–1875	Свечин Аггей Григорьевич	1862–1875			Свечин Аггей Григорьевич	1853; 1863; 1865– 1875	В адрес-календарях в штате числится в 1851–1854 гг., управляющий в 1866–1876 гг.
2114	Неизвестный с инициалами «И К»	1872–1875	Константи- нов Иван Ефимович	1876– 1882			Константи- нов Иван Ефимович	1875– 1882	В адрес-календарях в штате числится в 1867–1882 гг. в разных должностях.
2115	Смирнов Александр Алексеевич	1878–1891	Смирнов Александр Алексеевич	1860– 1894			Смирнов Александр Алексеевич	1857; 1876–	В адрес-календарях числится в штате в различных должностях в 1856–1891 гг. С 1879 г. управляющий пробирной палаткой; скорее всего, начиная с 1879 г. своих клейм не имел
	<i>отсутствует</i>		<i>отсутствует</i>				Кудрин Александр Стахеевич	1879– 1882	В адрес-календарях числится в штате Пробирной палатки в должности младшего пробирёра в 1879–1882 гг.
2116	Шебанов Семен Алексеевич	1883	Шостак Сергей Александрович	1883– 1894			Шостак Сергей Александрович	1883	С. А. Шостак в штате Пробирной палатки упоминается только в 1883 г., в должности пробирёра. Согласно [2, с. 727], С. А. Шебанов работал: Саратов, 1851–1860 гг.; Казань, 1891–1895 гг.

[1]			[3]		[5]		База данных ГОСНИИР		Примечания
№№ клейм	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О	Наличие клейм	Ф.И.О	Наличие клейм	
2117	<i>Неизвестный</i> с инициалами «В П»	1883–1886	<i>Петров Василий Александро- вич</i>	1883– 1893			<i>Петров Василий Александро- вич</i>	1883– 1886	В адрес-календарях в штате числится в 1883–1886 гг. в должности пробирёра.
2118	<i>Корбицкий Н.</i>	1886–1887	<i>отсутствует</i>				<i>отсутствует</i>		Согласно адрес- календарям, в пробирных учреждениях Москвы не числится. Корбицкий Николай Николаевич работал в Костроме в 1912–1916 гг.
	<i>отсутствует</i>		<i>отсутствует</i>				Кулаков Николай Васильевич	1887	В адрес-календарях числится в штате Пробирной палатки в 1883–1888 гг. в должности помощника управляющего.
2119– 2120	Романов А.	1886–1894	<i>отсутствует</i>				Романов Александр Васильевич.	1885– 1891; 1893– 1895	В адрес-календарях в штате Пробирной палатки числится в 1885–1895 гг. в различных должностях.
2121– 2122	Олекс Лев Федорович	1890– 1896	Олекс Лев Фридрихович	1889– 1890; 1892; 1895– 1904			Олекс Лев Фридрихович	1889– 1896	В адрес-календарях в штате числится в 1889–1899 гг. в различных должностях
2123– 2124	Вюрст Рудольф Андреевич	1891–1894	<i>отсутствует</i>				Вюрст Рудольф Андреевич	1891	В адрес-календарях в штате числится в 1889–1892 гг. в различных должностях.

[1]			[3]		[5]		База данных ГОСНИИР		Примечания
№№ клейм	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О.	Период работы	Ф.И.О.	Наличие клейм	Ф.И.О.	Наличие клейм	
2125	Арцибашев Анатолий Аполлонович	1891 -1896	Арцибашев Анатолий Аполлонович	1890 - 1896			Арцибашев Анатолий Аполлонович	1883 ; 1888– 1896	В адрес-календарях в штате числится в 1883, 1884, 1889–1898 гг. в различных должностях.
2126	Страдомский Н.	1892–1894	<i>отсутствует</i>				<i>отсутствует</i>		Страдомский Николай Иванович [2] работал: Вильно 1897–1898 гг., Харьков 1899–1915 гг., Донское окр. упр.: 1916 г.
б/н и изо браже ния	Сковронский А.	1894	Сковронский Александр Владиславович	1895 - 1908			Сковронский Александр Владиславович	1894- 1896	В адрес-календарях в штате числится в 1893, 1894, 1889–1908 гг. в различных должностях. В 1894 г. упоминается как СкАвронский.
2127	Милютин Сергей Николаевич	1896	Милютин Сергей Николаевич	Конец 1896			Милютин Сергей Николаевич отсутствует в 1896 г.		В адрес-календарях в штате числится в 1897–1899 гг. в должности пробирёра.
2128	Фалеев Михаил Николаевич	1896	Фалеев Михаил Николаевич	Конец 1896			Фалеев Михаил Николаевич	1896	В адрес-календарях в штате числится в 1894–1899 гг. в должности пробирёра.

Примечание: Полужирным курсивом выделены разночтения во времени работы пробирных мастеров, а также их ФИО в использованных материалах и Базе данных ГОСНИИР.

Выводы

В результате наших исследований мы пришли к следующим выводам:

- информация о периодах работы пробирных мастеров в опубликованных материалах [3; 7] не является полной и точной, и ее дополняют сведения из каталога [5], Базы данных ГОСНИИР (табл. 2) и адрес-календарей Москвы;
- в Базе данных ГОСНИИР представлены клейма пробирных мастеров, ранее не публиковавшиеся в литературных источниках;
- не все пробирёры, числящиеся в штате пробирного учреждения, имели клейма;
- несмотря на то, что работа по исследованию клейм ведется в ГОСНИИР уже более тридцати лет, База данных пока не может претендовать на полноту информации, но вполне пригодна для решения возникающих споров о подлинности клейм;
- в опубликованных материалах [1; 7] может отсутствовать информация о некоторых сотрудниках пробирных учреждений Москвы, но сведения о них есть в адрес-календарях и подтверждаются фотографиями оттисков их клейм в Базе данных;
- вполне возможно, что в процессе пополнения информации в Базе данных появятся новые дополнения и уточнения о времени работы пробирных мастеров. Например, фотография оттиска клейма А. Г. Свечина, датируемого 1853 годом, появилась в Базе данных практически во время написания этой статьи.
- разночтения в написании фамилии как пробирных мастеров, так и мастеров изготовителей, — нормальная практика в документах XIX века.

Список литературы

1. Беккер А. О., Дубровин М. Ф. Клейма пробирных мастеров Санкт-Петербурга второй половины XIX века: научно-методич. пособие. — URL: <https://www.gosniir.ru/library/guides/bekker-dubrovin-kleyma.aspx> (дата обращения: 21.09.2023).
2. Дубровин М. Ф. Московский пробирный мастер с клеймом «А • К». Кто он? // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. Тамбов: «ГРАМОТА», 2017. №12 (86). Ч. 2. С. 78–82.
3. Иванов А. Н. Пробирное дело в России (1700–1946). Руководство и пособие для экспертов-искусствоведов Территор. упр. М-ва культуры Рос. Федерации по сохранению культур. ценностей, музейн. работников и иных специалистов. М.: Русский нац. музей, 2002. — 751 с.
4. Клад фабрикантши Лихачевой: Каталог выставки / [сост.: А. А. Солин; авт. ст.: А. А. Солин, И. К. Малкиель]. СПб.: Изд-во Гос. Эрмитажа, 2010. — 207 с.

5. *Коварская С. Я.* Произведения мастеров Москвы первой половины XIX века: Каталог собрания гос. историко-культ. Музея-заповедника «Московский Кремль»: русский художественный металл, резное дерево, кость, камень. М.: Азбука, 2017. — 475 с.

6. *Мунтян Т. Н.* Произведения ведущих ювелирных фирм XIX – начала XX века. Фирма Фаберже: русский художественный металл, резное дерево, кость, камень: Каталог собрания гос. историко-культ. Музея-заповедника «Московский Кремль». М.: Азбука, 2019. — 453 с.

7. *Постникова-Лосева М. М., Платонова Н. Г., Ульянова Б. Л.* Золотое и серебряное дело XV–XX вв. [Территория СССР]. М.: ЮНВЕС; ТРИО, 1995. — 375 с.

8. *Смородинова Г. Г.* Произведения фирмы Овчинникова в собрании Исторического музея. М.: Гос. ист. музей, 2016. — 382 с.

1. *Bekker A. O., Dubrovin M. F.* Klejma probirny`x masterov Sankt-Peterburga vtoroj poloviny` XIX veka: nauchno-metodich. posobie. — URL: <https://www.gosniir.ru/library/guides/bekker-dubrovin-klejma.aspx> (data obrashheniya: 21.09.2023).

2. *Dubrovin M. F.* Moskovskij probirny`j master s klejmom «A • K». Kto on? // Istoricheskie, filosofskie, politicheskie i yuridicheskie nauki, kul`turologiya i iskusstvovedenie. Voprosy` teorii i praktiki. Tambov: «GRAMOTA», 2017. №12 (86). Ch. 2. S. 78–82.

3. *Ivanov A. N.* Probirnoe delo v Rossii (1700–1946). Rukovodstvo i posobie dlya e`kspertov-iskusstvovedov Territor. upr. M-va kul`tury` Ros. Federacii po soxraneniyu kul`tur. cennostej, muzejn. rabotnikov i iny`x specialistov. M.: Russkij nacz. muzej, 2002. — 751 s.

4. Klad fabrikantshi Lixachevoj: Katalog vy`stavki / [sost.: A. A. Solin; avt. st.: A. A. Solin, I. K. Malkiel']. SPb.: Izd-vo Gos. E`rmitazha, 2010. — 207 s.

5. *Kovarskaya S. Ya.* Proizvedeniya masterov Moskvyy` pervoj poloviny` XIX veka: Katalog sobraniya gos. istoriko-kul`t. Muzeya-zapovednika «Moskovskij Kreml`»: russkij xudozhestvenny`j metall, reznoe derevo, kost`, kamen`. M.: Azbuka, 2017. — 475 s.

6. *Muntyan T. N.* Proizvedeniya vedushhix yuvelirny`x firm XIX – nachala XX veka. Firma Faberzhe: russkij xudozhestvenny`j metall, reznoe derevo, kost`, kamen`: Katalog sobraniya gos. istoriko-kul`t. Muzeya-zapovednika «Moskovskij Kreml`». M.: Azbuka, 2019. — 453 s.

7. *Postnikova-Loseva M. M., Platonova N. G., Ul`yanova B. L.* Zolotoe i serebryanoje delo XV–XX vv. [Territoriya SSSR]. M.: YuNVES; TRIO, 1995. — 375 s.

8. *Smorodinova G. G.* Proizvedeniya firmy` Ovchinnikova v sobranii Istoricheskogo muzeya. M.: Gos. ist. muzej, 2016. — 382 s.

Сведения об авторах

Беккер Альберт Оттович — ФГБНИУ «ГОСНИИР», художник-реставратор отдела научной реставрации произведений из металла

Россия, 107014, Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
E-mail: 113metal@gmail.com

Дубровин Михаил Феликсович — кандидат технических наук; ФГБНИУ «ГОСНИИР», ведущий научный сотрудник отдела научной реставрации произведений из металла
Россия, 107014, Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
E-mail: 113metal@gmail.com

Becker Albert O. — the State Research Institute for Restoration, artist-restorer of Department of Scientific Restoration of Metal Works
44-1, Gastello St., Moscow, 107014, Russia
E-mail: 113metal@gmail.com

Dubrovin Mikhail F. — Ph.D.; the State Research Institute for Restoration, Leading Researcher of Department of Scientific Restoration of Metal Works
44-1, Gastello St., Moscow, 107014, Russia
E-mail: 113metal@gmail.com

С. В. Добровольский, Ю. И. Глуховская

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛА

В статье исследуются возможности использования газодинамических способов формирования материала для реставрации изделий из металла. Анализируются недостатки и достоинства применяемых в настоящее время аддитивных технологий реставрации. Обоснован выбор холодного газодинамического метода как наиболее подходящего под условия реставрации, показаны особенности использования метода и ограничения, обусловленные технологией применения. Проведенные ранее эксперименты показали, что качество формируемого материала зависит от решения многопараметрической задачи, основными параметрами которой являются размер частицы, ее масса, температура гетерогенного потока, угол падения частицы на поверхность, расстояние от среза ускорителя до поверхности, форма самой поверхности, подготовка поверхности и материал частицы. Рассматриваются возможные направления использования холодного газодинамического метода для восстановления изделий из металла; исследуются варианты разработки, проектирования и изготовления специализированных реставрационных газодинамических установок. Анализируя описанную в статье специфику метода, авторы делают вывод, что под каждый тип реставрируемого изделия нужно рассчитать, спроектировать и изготовить ускоритель гетерогенного потока с учетом законов газодинамики. Приведен результат расчета ускорителя гетерогенного потока, использующегося для реставрации больших плоских поверхностей; а также пример ускорителя, разворачивающего поток под прямым углом, и ускорителя, использующегося для работы на внутренних цилиндрических поверхностях.

Ключевые слова: реставрация изделий из металла, гетерогенный поток, холодный газодинамический метод, эрозионно-коррозионный износ, ускоритель гетерогенного потока, установка для формирования материала холодным газодинамическим методом, частица порошкового материала.

S. V. Dobrovolsky, Yu. I. Glukhovskaya

POSSIBILITIES OF USING GAS-DYNAMIC METHODS OF MATERIAL FORMATION FOR THE RESTORATION OF METAL OBJECTS

The article explores the possibilities of using gas-dynamic methods of forming a material for the restoration of metal objects. The disadvantages and advantages of the currently used additive restoration technologies are analyzed. The choice of the cold gas dynamic method is justified as the most suitable for restoration conditions, the features of its use and the limitations caused by the technology of its application are shown. Previous experiments have shown that the quality of the formed material depends on the solution of a multiparametric problem, the main parameters of which are the particle size, its mass, the temperature of the heterogeneous flow, the angle of incidence of the particle on the surface, the distance from the accelerator slice to the surface, the shape of the surface itself, surface preparation and particle material. Possible directions of using the cold gas dynamic method for the restoration of metal products are considered. The options for the development, design and manufacture of specialized restoration gas dynamic installations are being investigated. Analyzing the specifics of the method described in the article, the authors conclude that for each type of restored object, it is necessary to calculate, design and manufacture a heterogeneous flow accelerator taking into account the laws of gas dynamics. The calculation result of a heterogeneous flow accelerator used for the restoration of large flat surfaces is presented. An example of an accelerator that turns the flow at a right angle and an accelerator used to operate on internal cylindrical surfaces is given.

Keywords: restoration of metal objects, heterogeneous flow, cold gas dynamic method, erosion and corrosion wear, heterogeneous flow accelerator, installation for forming material by cold gas dynamic method, particle of powder material.

Введение

С момента своего изготовления любое изделие подвергается износу в той или иной форме, что обобщенно можно определить как утрату или изменение физических свойств материала, составляющего изделие. Износ может быть как следствием использования изделия по назначению, так и эрозионно-коррозионного воздействия, воздействия окружающей среды, ненадлежащего хранения, осознанной порчи (вандажные действия), что суммируется в общую утрату материала изделия (ил. 1).



Ил. 1.

Примеры эрозионно-коррозионного воздействия окружающей среды.

Фото: С. В. Добровольский, 2023.

Алушта, Крым

Таким образом, одной из задач реставрации с технологической точки зрения является возвращение изделию утраченного материала для формирования внешней и внутренней поверхностей памятника, воссоздания авторской идеи скульптора. Здесь может быть применен метод, называемый «аддитивная технология», что в рассматриваемом случае означает послойное добавление материала на основе созданной компьютерной 3D-модели изделия. Обычно аддитивные технологии применяются при реставрационных работах, когда создается утраченный элемент изделия, который механически закрепляется на нем, создавая целостный вид. Используемые в настоящее время аддитивные лазерные технологии не могут выращивать материал непосредственно на восстанавливаемом изделии [1; 13] из-за ограничений по габаритам рабочей области [17]. Возникла необходимость в более гибком и точном методе, работающем непосредственно в месте нахождения изделия, которым для частичного решения данной задачи может быть использование одного из газодинамических методов нанесения материала [6; 9].

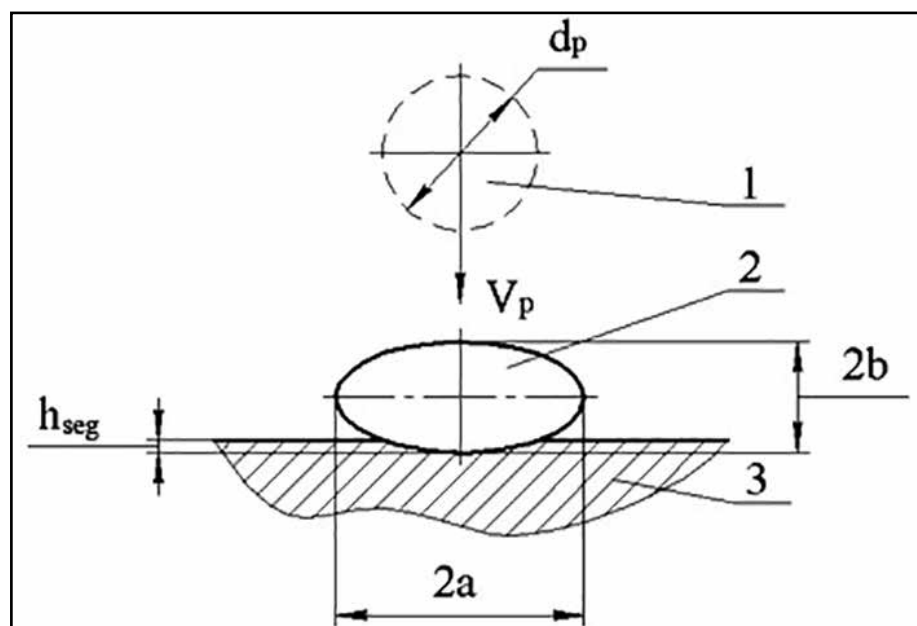
Возможности использования газодинамических методов и выбор подходящего для реставрации изделий из металла

Газодинамические методы известны давно и эффективно используются в машиностроении. Основные из них: газопламенный, плазменный, детонационный, высокоскоростного (сверхзвукового) напыления (HVOF/HVAF), холодный газодинамический метод (ХГМ). Они объединены единым принципом формирования материала с использованием гетерогенных потоков. Материал формируется из отдельных

частиц (порошка), нагретых и ускоренных с помощью высокотемпературной газовой струи (газа-носителя). Методы отличаются друг от друга температурой потока и скоростью движения частиц в нем. Газодинамические технологии обладают высокой производительностью. Толщина формируемого покрытия — от десятков микрон до нескольких миллиметров. Технологии позволяют наносить покрытия как на локальные участки конструкций, так и на большие поверхности, в том числе сложной конфигурации. Перечисленные преимущества обуславливают высокую универсальность методов и позволяют формировать покрытия с широким спектром назначения [8].

Все перечисленные методы, кроме ХГМ, характеризуются тем, что гетерогенный поток нагревается до температуры, большей температуры плавления наносимого материала; вследствие теплового воздействия на объект нанесения будет возникать температурная деформация, следствием которой будет температурное разрушение материала объекта реставрации. Наиболее перспективным для реставрации изделий из металла является, таким образом, ХГМ.

Несколько лет назад ХГМ начал применяться в реставрационных работах [7; 12] для восстановления и реставрации изделий из металлов [11]. Сущность ХГМ заключается в том, что изделие формируется в результате соударения высокоскоростных гетерогенных потоков с твердой поверхностью. В момент удара значительная часть кинетической энергии частиц материала, двигающихся в потоке, переходит в тепло, вызывая в зоне контакта значительное повышение местной температуры и деформацию частиц (ил. 2).



Ил. 2.
Деформация металлической частицы при ударе о твердую поверхность.
Автор С. А. Борисов

Массовая доля частиц, которые формируют изделие в гетерогенном потоке, не превышает 10% от массовой доли газа-носителя, размер частиц от 5 до 60 мкм [15; 16], газом-носителем может быть воздух [5; 10].

Состав порошков в расчетной пропорции готовится в специальном газодинамическом смесителе. Полученный материал в составе гетерогенного потока с необходимыми параметрами (давлением и температурой) поступает в форкамеру и затем разгоняется в сверхзвуковом сопле до расчетной для данной композиции скорости. Давление и температура газа-носителя выбираются так, чтобы скорость частиц на выходе из разгонного участка соответствовала расчетной, а их

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

- электродвигатель;
- частотный преобразователь;
- датчик давления;
- датчик температуры;
- регулятор давления с электроприводом;
- фильтр воздушный;
- редуктор;
- трубопроводы смеского воздуха;
- трубопроводы вытяжки;
- кабели ~220 В, ~380 В;
- кабели системы диагностики;
- кабели системы управления;
- кабели системы видеонаблюдения.

ЦИФРОВЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

- 1а - солено клапанное;
- 2 - смешительная камера;
- 3 - нагревательный;
- 4 - дилатор;
- 5 - координатное устройство с ЧПУ;
- 6 - преобразователь напряжения;
- 7 - вентилятор вытяжной системы;
- 8 - циклонный фильтр;

Частица материала в гетерогенном потоке при движении от среза ускорителя до поверхности изделия проходит через скачок уплотнения, что делает невозможным нанесение частиц nano размеров из-за их торможения при прохождении через скачок уплотнения.

Поведение частицы при контакте с поверхностью изделия будет зависеть от ее размера, массы, температуры, угла падения, расстояния от среза ускорителя до поверхности изделия, формы самой поверхности, подготовки поверхности и материала частицы.

Шероховатость поверхности получившегося материала определяется размером частиц наносимого материала.

Условием получения качественного результата реставрации является применение порошка из материала, аналогичного восстанавливаемому, что накладывает ограничения на ассортимент реставрируемых изделий.

Без учета перечисленных факторов невозможно сформировать материал с требуемыми для данного изделия характеристиками (пористостью, когезией, адгезией). При определенном сочетании факторов, таких как температурное воздействие гетерогенного потока на реставрируемый объект; напряжения, возникающие после ударного воздействия частиц, сформированный материал может ускорить разрушение восстанавливаемого объекта.

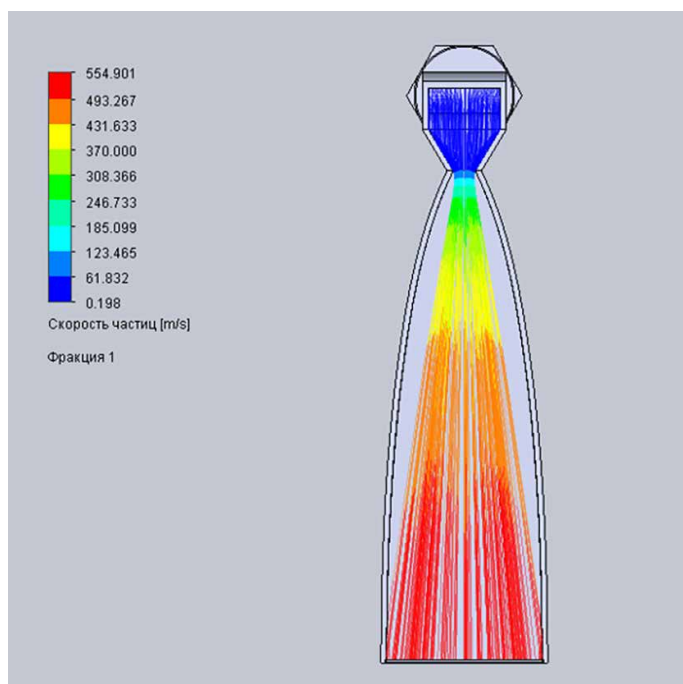
Примеры использования ХГН без учета специфики реставрационных работ (в любых погодных условиях, в местах со сложным доступом) не дают ожидаемого результата. Это не значит, что применение газодинамического метода является типовым направлением для реставрационных работ. ХГН — наукоёмкая технология, которая требует адаптации под поставленную задачу при точном соблюдении технологических процессов [14].

Для создания гетерогенного потока с нужными параметрами необходимо рассчитать и сконструировать ускорители для формирования материала на поверхностях различной формы.

Для расчета ускорителя используются следующие параметры:

- давление торможения на входе в ускоритель;
- температура торможения на входе в ускоритель;
- статическое давление на срезе ускорителя;
- статическая температура на срезе ускорителя.

На *ил. 4* представлен пример расчета ускорителя для формирования материала на плоских поверхностях.

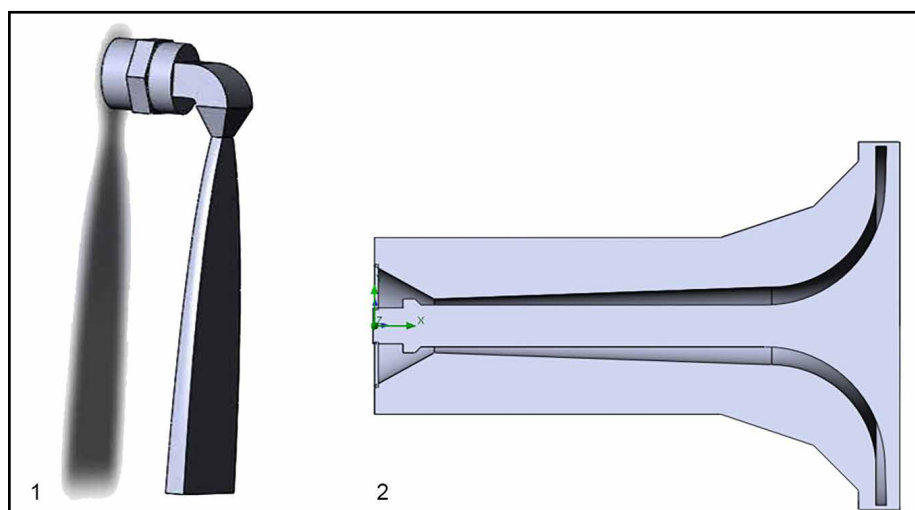


Ил. 4.

Пример расчета ускорителя для формирования материала на плоских поверхностях.

Разработчик С. А. Захаров

На *ил. 5* представлены примеры ускорителей для формирования материала на поверхностях различных форм.



Ил. 5.

Виды ускорителей: 1 — угловой, 2 — для внутренних поверхностей.

Разработчик С. А. Борисов

Угловой ускоритель используется для работы в ограниченном пространстве, ускоритель для внутренних поверхностей может работать на внутренней поверхности цилиндра.

Температурное и ударное (частицами материала) воздействие формирующего материал гетерогенного потока может привести к нежелательной деформации реставрируемого изделия. Одно из преимуществ использования этого метода для реставрации — минимизация нежелательных воздействий.

Опыт показывает, что рабочее давление в пневмосистеме установки для мягких материалов — цинк, алюминий, медь — до 10 бар; для твердых материалов — сталь, чугун, титан — 50 бар и выше.

Заключение

Таким образом, универсального инструмента для реставрации любого материала нет. Для каждого необходимо рассчитывать способ введения частиц материала в поток, нагрев и разгон потока до требуемой скорости. Наиболее важным является расчет, проектирование и изготовление ускорителя гетерогенного потока под поставленную задачу.

Перспективные направления использования газодинамических методов при реставрации изделий из металла таковы:

- восстановление площадных поверхностей, подвергшихся эрозионно-коррозионному износу;
- восстановление утраченных элементов объектов реставрации методом наращивания материала на временной подложке с последующей обработкой получившейся поверхности;
- наращивание объема утраченного материала на изделии с последующей механической обработкой для придания нужной формы;
- консервация элементов металлических конструкций с целью предотвращения дальнейшего разрушения с возможностью расконсервации и возвращению к процессу реставрации без ухудшения состояния объекта реставрации;
- искусственное состаривание поверхности (имитация патины) после восстановления новым материалом частично утраченной поверхности.

Все предлагаемые направления использования газодинамических методов при реставрации изделий из металла обладают свойством обратимости (например, доделка утраты, выполненная аддитивными технологиями по CAD-модели с применением ХГН, может обратимо удаляться с памятника).

В некоторых случаях целесообразно добавить дополнительные технологические операции, улучшающие сцепление основного и наносимого материалов.

Разработка, проектирование и изготовление специализированных газодинамических установок — наукоёмкий процесс, в котором используются научные и инженерные наработки Московского авиационного института (МАИ) [3; 4] и его научно-техническая база [2; 15].

Установки могут быть реализованы в стационарном и переносном (мобильном) варианте для работы в полевых условиях.

Целесообразно рассмотреть выпуск установок различной мощности и конфигурации, оптимизированных под конкретные задачи с учетом специфики местного применения, наличия или отсутствия централизованного электро- и пневмоснабжения, условий окружающей среды, квалификации обслуживающего персонала.

В техническом задании на выпуск установок необходимо определить виды и объем реставрационных работ. В этом случае созданные установки будут экономически эффективны.

Список литературы

1. Богданов А. В. и др. Возможности применения выборочного лазерного воздействия в реставрации предметов из металла / А. В. Богданов, П. Н. Котельников, С. В. Кураков, М. А. Мельникова, М. В. Кротов // Технология металлов. 2025. №8. С. 29–33. — DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-8-29-33.

2. Борисов С. А. и др. Алгоритм управления движением сверхзвукового ускорителя гетерогенного потока для формирования покрытия на криволинейных поверхностях / С. А. Борисов, Ю. И. Глуховская, С. В. Добровольский, А. С. Мякочин, И. В. Подпорин // Материалы XXX Международной научно-технической конф. «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», 14–20 сентября 2021 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2021. С. 21–24.

3. Борисов С. А. и др. Использование газодинамических расчетов для решения задачи управления нанесением защитных покрытий разной толщины / С. А. Борисов, Ю. И. Глуховская, С. В. Добровольский, П. В. Никитин, И. В. Подпорин // Материалы XIII Международной конф. по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2020), 6–13 сентября 2020 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2020. С. 209–212.

4. Борисов С. А. и др. Исследование способов подачи твердой фазы в гетерогенный поток для равномерного нанесения материала газодинамическим методом / С. А. Борисов, Ю. И. Глуховская, С. В. Добровольский, П. В. Никитин, И. В. Подпорин // Материалы XIII Международной конф. по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2020), 6–13 сентября 2020 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2020. С. 141–143.

5. Борисов С. А. и др. Исследование эрозионного износа покрытий с применением подвижной струи гетерогенного потока ограниченной площади / С. А. Борисов, С. В. Добровольский, Ю. И. Глуховская, П. В. Никитин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. №3. С. 106–112.

6. Бурак П. И. и др. Износостойкость покрытий, полученных газодинамическим напылением / П. И. Бурак, А. В. Серов, А. И. Каширин, А. В. Шкодкин // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. №7. С. 26–30.

7. Восстановление утраченных объемов металла // Обнинский Центр порошкового напыления: офиц. сайт. — URL: <http://dymet.net/vosstanovlenie-utrachennyh-obemov-metalla.html> (дата обращения: 25.04.2025).

8. Добровольский С. В. Выбор перспективных технологий для создания изделий авиационно-космической техники // Фундаментальные исследования. Пенза: ИД «Академия естествознания». 2014. №6 (ч. 2). С. 233–237.

9. Каширин А. И., Шкодкин А. В. Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. №12 (36). С. 22–33.

10. Клинков С. В., Косарев В. Ф. Моделирование адгезионного взаимодействия частиц с преградой при газодинамическом напылении // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. №3. С. 27–35.

11. Козлов И. А. и др. Использование металлопорошковых композиций для устранения дефектов деталей из сплава ВАС-1 методом холодного газодинамического напыления / И. А. Козлов, М. А. Фомина, С. А. Демин, И. Бенариев, К. М. Хмелева // Труды ВИАМ. 2022. №12 (118). С. 96–103. — DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-96-106.

12. Козлов И. А. и др. Тенденции развития порошковых материалов для нанесения защитных и функциональных покрытий методом ХГН / И. А. Козлов, М. А. Фомина, С. А. Демин, А. С. Васильев // Труды ВИАМ. 2023. №8 (126). С. 100–112. — DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-100-112.

13. Котельников П. Н., Кураков С. В., Богданов А. В. Научная реставрация предметов из металла с рельефным изображением: современные методы восполнения утрат // Невская фотоника-2025: Сб. науч. трудов Всероссийской науч. конф. с международным участием, Санкт-Петербург, 13–18 октября 2025 года. СПб.: Нац. исслед. ун-т ИТМО, 2025. С. 34.

14. Трапезников А. В. и др. Газодинамическое напыление как способ устранения поверхностных дефектов на литейных алюминиевых сплавах / А. В. Трапезников, А. А. Леонов, К. А. Власова, Ю. В. Решетников, В. А. Дуюнова // Технология легких сплавов. 2025. №3. С. 77–88. — DOI: 10.24412/0321-4664-2025-3-77-88.

15. Borisov S. A. et al. Concept of an Experimental Setup for Testing the Technology for the Formation of New Anti-Corrosion Coating Materials Using Low-Temperature Supersonic Heterogeneous Flows / S. A. Borisov, Y. I. Glukhovskaya, S. V. Dobrovolskiy, P. V. Nikitin, I. V. Podporin // TEM Journal, 2020. Vol. 9. Issue 2. P. 566–572.

16. Klinkov S. V. et al. Deposition of multicomponent coatings by cold spray / S. V. Klinkov, V. F. Kosarev, A. A. Sova, I. Smurov // Surface and Coatings Technology. 2008. V. 202. P. 5858–5862.

17. Kurakov S. V. et al. Restoration, Current Approaches Using the Additive Technologies: Issues of Transparency / S. V. Kurakov, M. A. Melnikova, A. V. Bogdanov, G. V. Tikhomirov, P. N. Kotel'nikov // Proceedings of the 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, 08–10 april 2025. М.: Изд-во Ин-та инженеров электротехники и электроники (IEEE), 2025. С. 1–6. — DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10971027.

1. Bogdanov A. V. i dr. Vozmozhnosti primeneniya vy`borochnogo lazernogo vozdejstviya v restavracii predmetov iz metalla / A. V. Bogdanov, P. N. Kotel'nikov, S. V. Kurakov, M. A. Mel'nikova, M. V. Krotov // Texnologiya metallov. 2025. №8. С. 29–33. — DOI 10.31044/1684-2499-2025-0-8-29-33.

2. Borisov S. A. i dr. Algoritm upravleniya dvizheniem sverxzvukovogo uskoritelya geterogennogo potoka dlya formirovaniya pokry`tiya na krivolinejny`x poverxnostyax /

S. A. Borisov, Yu. I. Gluxovskaya, S. V. Dobrovol'skij, A. S. Myakochin, I. V. Podporin // Materialy`XXX Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konf. «Sovremennyye tekhnologii v zadachax upravleniya, avtomatiki i obrabotki informacii», 14–20 sentyabrya 2021 g., Alushta. M.: Izd-vo MAI, 2021. S. 21–24.

3. *Borisov S. A. i dr.* Ispol'zovanie gazodinamicheskix raschetov dlya resheniya zadachi upravleniya nanesseniem zashhitny`x pokry`tij raznoj tolshhiny` / S. A. Borisov, Yu. I. Gluxovskaya, S. V. Dobrovol'skij, P. V. Nikitin, I. V. Podporin // Materialy` XIII Mezhdunarodnoj konferencii po prikladnoj matematike i mexanike v ae`rokosmicheskoy otrasli (AM-MAI'2020), 6–13 sentyabrya 2020 g., Alushta. M.: Izd-vo MAI, 2020. S. 209–212.

4. *Borisov S. A. i dr.* Issledovanie sposobov podachi tverdoj fazy` v geterogennyj` potok dlya ravnomernogo nanesseniya materila gazodinamicheskim metodom / S. A. Borisov, Yu. I. Gluxovskaya, S. V. Dobrovol'skij, P. V. Nikitin, I. V. Podporin // Materialy` XIII Mezhdunarodnoj konf. po prikladnoj matematike i mexanike v ae`rokosmicheskoy otrasli (AM-MAI'2020), 6–13 sentyabrya 2020 g., Alushta. M.: Izd-vo MAI, 2020. S. 141–143.

5. *Borisov S. A. i dr.* Issledovanie e`rozionnogo iznosa pokry`tij s primeneniem podvizhnoj strui geterogennogo potoka ogranichennoj ploshhadi / S. A. Borisov, S. V. Dobrovol'skij, Yu. I. Gluxovskaya, P. V. Nikitin // Poverxnost`. Rentgenovskie, sinxrotronny`e i nejtronny`e issledovaniya. 2019. №3. S. 106–112.

6. *Burak P. I. i dr.* Iznosostojkost` pokry`tij, poluchenny`x gazodinamicheskim napy`leniem / P. I. Burak, A. V. Serov, A. I. Kashirin, A. V. Shkodkin // Remont, vosstanovlenie, modernizaciya. 2011. №7. S. 26–30.

7. Vosstanovlenie utrachenny`x ob`emov metalla // Obninskij Centr poroshkovogo napy`leniya: ofic. saj. — URL: <http://dymet.net/vosstanovlenie-utrachennyh-obe-mov-metalla.html> (data obrashheniya: 25.04.2025).

8. *Dobrovol'skij S. V.* Vy`bor perspektivny`x tekhnologij dlya sozdaniya izdelij aviaciono-kosmicheskoy texniki // Fundamental'ny`e issledovaniya. Penza: ID «Akademiya est-estvoznaniya». 2014. №6 (ch. 2). S. 233–237.

9. *Kashirin A. I., Shkodkin A. V.* Metod gazodinamicheskogo napy`leniya metallicheskix pokry`tij: razvitie i sovremennoe sostoyanie // Uprochnyayushhie tekhnologii i pokry`tiya. 2007. №12 (36). S. 22–33.

10. *Klinkov S. V., Kosarev V. F.* Modelirovanie adgezionnogo vzaimodejstviya chasticz s pregradoj pri gazodinamicheskom napy`lenii // Fizicheskaya mezomexanika. 2002. T. 5. №3. S. 27–35.

11. *Kozlov I. A. i dr.* Ispol'zovanie metalloporoshkovy`x kompozicij dlya ustraneniya defektov detalej iz splava VAS-1 metodom xolodnogo gazodinamicheskogo napy`leniya / I. A. Kozlov, M. A. Fomina, S. A. Demin, I. Benarieb, K. M. Xmeleva // Trudy` VIAM. 2022. №12 (118). S. 96–103. — DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-96-106.

12. *Kozlov I. A. i dr.* Tendencii razvitiya poroshkovy`x materialov dlya nanesseniya zashhitny`x i funkcional'ny`x pokry`tij metodom XGN / I. A. Kozlov, M. A. Fomina, S. A. Demin, A. S. Vasil`ev // Trudy` VIAM. 2023. №8 (126). S. 100–112. — DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-100-112.

13. *Kotel'nikov P. N., Kurakov S. V., Bogdanov A. V.* Nauchnaya restavraciya predmetov iz metalla s rel'efny`m izobrazheniem: sovremennyye metody` vospolneniya utrat //

Nevskaya fotonika-2025: Sb. nauch. trudov Vserossijskoj nauch. konf. s mezhdunarodny'm uchastiem, Sankt-Peterburg, 13–18 oktyabrya 2025 goda. SPb.: Nacz. issled. un-t ITMO, 2025. S. 34.

14. Trapeznikov A. V. i dr. Gazodinamicheskoe napy`lenie kak sposob ustraneniya pov-erxnostny`x defektov na litejny`x alyuminiev`x splavax / A. V. Trapeznikov, A. A. Leonov, K. A. Vlasova, Yu. V. Reshetnikov, V. A. Duyunova // Tekhnologiya legkix splavov. 2025. №3. S. 77–88. — DOI: 10.24412/0321-4664-2025-3-77-88.

Сведения об авторах

Добровольский Сергей Владимирович — кандидат технических наук, доцент; ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», инженер НИО-204
Россия, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4
E-mail: dobrovolskiy_s@mail.ru

Глуховская Юлия Исааковна — ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», специалист НИО-204
Россия, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4
E-mail: gljul@bk.ru

Dobrovolsky Sergey V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Moscow Aviation Institute (National Research University), engineer of research department 204
4, Volokolamsk highway, Moscow, 125993, Russia
E-mail: dobrovolskiy_s@mail.ru

Glukhovskaya Yulia I. — Moscow Aviation Institute (National Research University), specialist engineer of research department 204
4, Volokolamsk highway, Moscow, 125993, Russia
E-mail: gljul@bk.ru

П. Н. Котельников, С. В. Кураков, А. С. Макарова, В. Б. Самойлов

РЕСТАВРАЦИЯ ПАМЯТНИКОВ ИЗ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ: КРИТЕРИИ ПРИМЕНЕНИЯ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением границ допустимости и эффективности современных технологий напыления для реставрации металлических произведений искусства, экспонирующихся под открытым небом. Работа представляет собой комплексный анализ метода холодного газодинамического напыления (ХГН), включая историю его разработки, технологические особенности и возможности данного способа, современные области применения. Объектами практического исследования выступили отреставрированные с применением ХГН памятники монументального искусства в Москве и Санкт-Петербурге. Детальному лабораторному изучению подверглись пробы покрытий, отобранные с объекта культурного наследия федерального значения — аллегорических скульптур из цинкового сплава «Вода» и «Земля» (В. И. Мухина, Н. Г. Зеленская, А. М. Сергеев). В ходе работы был проведен комплекс анализов, включая натурный визуальный осмотр, металлографию и электронную микроскопию, что позволило оценить текущее состояние покрытий, их адгезию, микроструктуру и выявить основные механизмы деградации. В результате исследования систематизированы ключевые достоинства и недостатки метода ХГН в реставрационной практике, а также разработаны практические рекомендации по его применению для сохранения монументальной металлической скульптуры. Полученные выводы имеют важное прикладное значение для выбора оптимальных технологий, проектирования реставрационных процессов и устранения повреждений объектов культурного наследия из металла в условиях агрессивной внешней среды. Показанная в статье работа проведена в рамках научной темы (рег. № НИОКТР 124031100828-6), выполнявшейся за счет средств федерального бюджета в 2025 году.

Ключевые слова: наплавление, холодное газодинамическое напыление, декоративно-защитное покрытие, реставрация металла, монументальная скульптура, уличная экспозиция, долговечность покрытий.

P. N. Kotelnikov, S. V. Kurakov, A. S. Makarova, V. B. Samoilov

RESTORATION OF METAL MONUMENTS USING THE COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING METHOD: APPLICATION CRITERIA AND RESULTS ASSESSMENT

This article addresses the determination of the applicability limits and efficacy of modern spraying technologies for the restoration of metal artworks exposed outdoors. The study presents a comprehensive analysis of the Cold Gas-Dynamic Spraying (CGDS) method, encompassing its development history, technological features, potential, and modern applications. The practical research is focused on the outdoor sculpture located in Moscow and Saint Petersburg that was restored using this cold spraying method. A detailed laboratory study was conducted on coating samples taken from the federally significant cultural heritage objects — the allegorical zinc-alloy sculptures “Water” and “Earth” (by V. I. Mukhina, N. G. Zelenskaya, A. M. Sergeev). A set of analyses, including on-site visual inspection, metallography, and electron microscopy, was performed to assess the current state of the studied coatings, their adhesion, microstructure, and to identify the primary degradation mechanisms. As a result, the key advantages and disadvantages of the CGDS method in restoration practice have been systematized, and practical recommendations for its application in preserving monumental metal sculpture have been developed. The findings are of significant applied value for selecting optimal technologies, designing restoration processes, and addressing damage to metal cultural heritage objects in aggressive outdoor environments. The article presents work carried out within the framework of a scientific topic (registration number NIOKTR 124031100828-6), implemented at the expense of the federal budget in 2025.

Keywords: fusing, cold gas-dynamic spraying, decorative-protective coating, metal restoration, monumental sculpture, outdoor exposure, coating durability.

Введение

Произведения монументальной скульптуры из черного металла и цветных сплавов, экспонирующиеся под открытым небом, находятся в нестабильной среде под воздействием агрессивных условий. Атмосферные осадки, ветровая эрозия, переменчивая температура, стационарное положение, техногенное влияние, биозагрязнения и другие факторы оказывают постоянное негативное воздействие на художественную поверхность и конструкцию памятника, приводя к развитию процессов коррозии, образованию трещин, разрывов и других дефектов металла. Всё это негативно сказывается на произведении монументальной скульптуры и в некоторых случаях может привести к необратимым последствиям, вплоть до утраты памятника. Минимизация воздействия агрессивной среды требует комплексного подхода, практически постоянного реставрационного вмешательства и значительных средств. В связи с этим поиск применяемых в реставрации защитных технологий которые могли бы минимизировать эти усилия, является актуальным и востребованным. В последние годы в реставрационную практику активно внедряется метод напыления, или наплавления, предполагающий нанесение на поверхность скульптуры тонкого слоя металла, который может служить защитно-декоративным покрытием [1].

Покрытиями называют искусственно созданные поверхностные слои, которые могут отличаться от материала основы химическим и фазовым составами, структурой и свойствами. Покрытия наносятся для защиты поверхности от различных видов воздействий (высоких нагрузок, температур, различных агрессивных сред), в декоративных целях, а также для восстановления нарушенной геометрии изделий. Материаловедение покрытий представляет собой большой раздел знаний об особом классе функциональных материалов. Условно все покрытия можно разделить на два вида по принципу взаимодействия с поверхностью:

- 1) изменение химического состава поверхности (химико-термическая обработка);
- 2) нанесение нового материала на поверхность (напыление, осаждение, наплавка, нанесение эмалей и лакокрасок) [18, с. 3–4].

В целях реставрации произведений из металла первый тип покрытий не используется, так как формирование диффузионных покрытий при химико-термической обработке приводит к структурным и фазовым превращениям в металлах и сплавах реставрируемого объекта, что совершенно недопустимо в части сохранения историко-культурной ценности, следов бытования, информации о технологии изготовления скульптуры. Второй тип покрытий, напротив, при соблюдении условий обратимости процесса, широко применяется в реставрации произведений из металла как многофакторный способ, несущий возможности консервации и защиты объекта от агрессивного воздействия окружающей среды, поддержания декоративно-художественного образа памятника без его изменения, восполнения утрат рельефа поверхности [17] и защитно-декоративного покрытия и т. п.

Существует широкая номенклатура покрытий по способу их нанесения на поверхность металлического объекта: химические, гальванические, лакокрасочные, эмалевые, наплавочные, вакуумно-плазменные [15] и прочие.

К современным и широко применяемым в промышленности и народном хозяйстве технологиям нанесения покрытий относится газотермический способ, при котором различными методами напыления (газопламенного, плазменного и детонационного) разогретые мельчайшие частицы разгоняются выходящим из сопла сжатым газом и направляются на покрываемую поверхность, где они формируют слой [10, с. 17].

Нужно отметить, что нанесение покрытий газотермическими способами носит необратимый характер, поэтому использование данных технологий должно иметь вескую аргументацию при проектировании и выполнении реставрационных работ, а также локальную область применения (например, в зоне коррозионных разрушений). Недопустимость применения газотермического напыления на всей поверхности памятника очевидна, так как приводит к нарушению оригинальной фактуры металла и изменению авторского замысла. Также при последующем удалении напылённого слоя (механических, химических, лазерных и др. расчистках) происходит повреждение художественной оболочки (поверхности, основания) объекта.

Сущность процессов газотермического нанесения покрытий заключается в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала, обеспечивающего перенос их на поверхность обрабатываемого изделия и формирование слоя. Частицы могут представлять собой порошок, полученный расплавлением и газовым дроблением исходного материала — проволоки, стержней, пластифицированной массы [8] и т. д. [26]. Для разгона частиц применяют различные высокотемпературные газовые среды. Нагрев напыляемого материала проводят для повышения пластичности и адгезионной способности частиц [9]. Таким образом, главными определяющими показателями газотермического процесса напыления являются температура и скорость частиц наносимого покрытия.

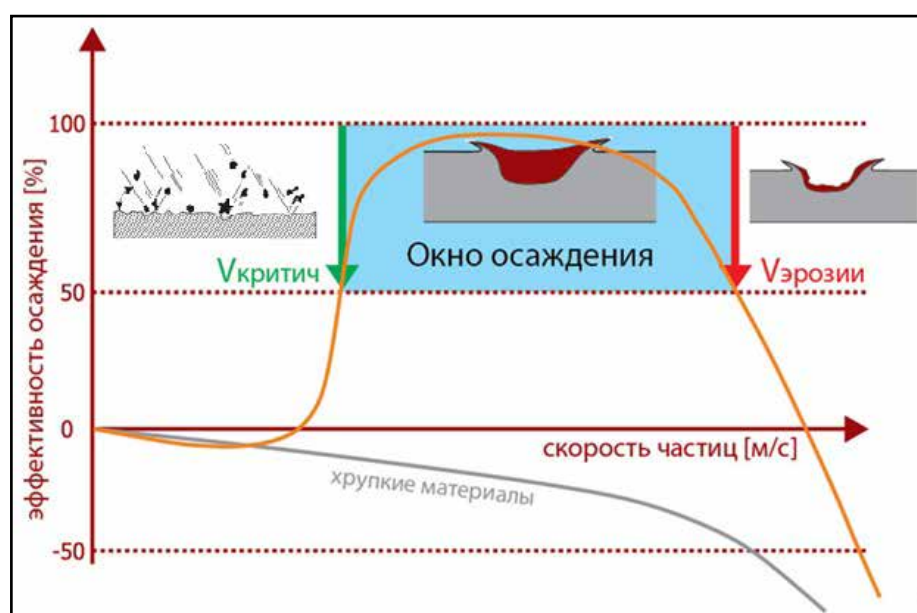
Основные показатели процесса холодного газодинамического напыления, технологические возможности способа

Наиболее низкотемпературным газотермическим способом нанесения покрытий является метод ХГН — холодного газодинамического напыления (в машиностроении нагрев поверхности до 800–1000°C без расплавления металла называется холодным). Применительно к реставрационной практике можно утверждать, что это самый щадящий процесс напыления с точки зрения нагрева поверхности реставрируемого объекта. При использовании ХГН вполне ожидаемо отсутствует коробление и тепловые деформации в конструкциях и элементах объекта технологического воздействия.

Явление формирования покрытий методом ХГН было исследовано в СССР в начале 1980-х годов. Группа ученых Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Академии наук СССР (сегодня — ИТПМ СО РАН) разработала способ нанесения металлических покрытий при помощи ускорения частиц до сверхзвуковых скоростей. Это привело к разработке двух патентов в СССР — изобретениям метода и устройства для ускорения

металлических частиц газом с высоким давлением при температурах, значительно меньших температуры плавления частиц, для формирования слоя с высокой адгезией к подложке [5]. Процесс называли холодным газодинамическим напылением, позволяющим напылять разнообразные материалы, — металлы, сплавы, полимеры и их смеси [7, с. 15]. В период с 1980 по 2020 г. выпущено в общей сложности более 150 патентов в области ХГН.

Суть способа ХГН можно кратко охарактеризовать следующим образом: «не расплавляем, а ускоряем» [11, с. 22–24]. Исследования, проведенные по схеме «разгоняемая в сопле сверхзвуковая гетерогенная струя — преграда для напыления», показали определяющую роль скорости частиц. Для металлических частиц с размером менее 50 мкм существуют критические скорости их взаимодействия с подложкой (500–600 м/с). При скорости меньше критической наблюдается процесс эрозии. Если скорость превышает критическое значение, происходит процесс напыления (ил. 1). Важно, что свойства получающихся покрытий (адгезия, пористость, микротвердость и т. д.) зависят от скорости напыляемых частиц [11, с. 36].



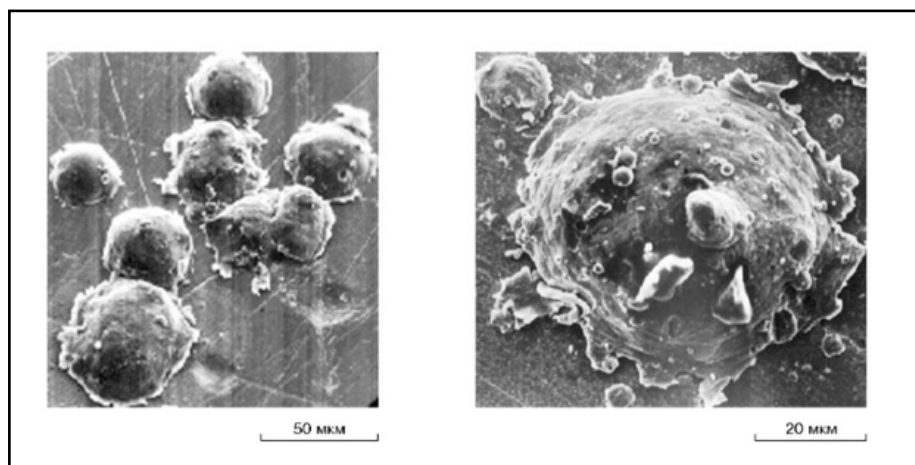
Ил. 1.
Виды ускорителей: 1 — угловой,
2 — для внутренних поверхностей.
Разработчик С. А. Борисов

Для метода ХГН была установлена следующая закономерность: формирование покрытия возможно, когда кинетическая энергия частицы превышает примерно $\frac{1}{3}$ величины тепловой энергии, соответствующей температуре плавления, независимо от материала частиц [6, с. 47].

Кроме того, анализ закрепившихся после удара на полированной подложке частиц, проведенный с помощью электронной и оптической микроскопии, позволил выявить характерные особенности их деформирования. В представленной микрофотографии частиц алюминия на поверхности меди видно, что на конечном этапе пластического деформирования на периферии контакта образуются коронобразные выбросы металла (ил. 2). Основную роль здесь играют процессы, протекающие вблизи контакта, где происходит интенсивная деформация и перекачка механической энергии в тепловую. В этих условиях в окрестности стенки при ударе может сформироваться тонкий расплавленный слой металла. Образование этого слоя зависит от баланса генерации и отвода тепла [3, с. 204].

Эксперименты и математическое моделирование показали, что при ударе мелкой металлической частицы о твердую недеформируемую преграду вблизи поверхности может формироваться тонкий слой расплавленного металла толщиной

$\delta < 0,015d$ (d — диаметр частицы), в котором температура близка к температуре плавления металла порошкового покрытия. Образованием такого слоя можно объяснить и само явление высокой адгезии частиц с подложкой при газодинамическом напылении [4, с. 112–116].



Ил. 2.

Характер деформации частиц алюминия при соударении их с полированной медной подложкой при методе ХГН. Источник: [15]

Приведенные фотографии закрепления отдельных частиц позволяют однозначно утверждать: воздействие метода ХГН на поверхность объекта имеет эрозийный характер. Это в реставрационной практике является недопустимым по отношению к авторской поверхности произведений из металла — как экспонирующихся на открытом воздухе, так и предметов интерьерного (музейного) хранения. Применение данного способа напыления покрытия возможно только для восстановления сплошности поверхности на локальных участках, где имеются раковины, каверны, разрывы, образовавшиеся вследствие коррозионных процессов, механических повреждений или дефектов производства. В любом случае речь идет о локализованном применении метода ХГН в местах разрушения и утрат произведений из металла, а не о полном, сплошном покрытии, так как данный способ напыления является необратимым, — удалить покрытие без ущерба для поверхности памятника не представляется возможным.

Метод ХГН в сравнении с другими технологиями газотермического напыления выглядит экономически обоснованным в промышленности и применимым в силу низких технологических затрат на освоение способа напыления, достаточно высокой адгезии при соблюдении технологических режимов изготовителем оборудования и сырья, низкого содержания оксидов и окислов в покрытии, безопасности и экологичности при соблюдении инструкций при работе с установкой ХГН. Данная технология хорошо себя зарекомендовала в ремонте, восстановлении и реновации машиностроительных узлов, заделке литейного брака, каверн и трещин в изношенных деталях инженерного оборудования.

Подбор режимов напыления при апробации однокомпонентного (частицы состоят из чистого металла — Cu, Zn, Al и проч. или из сплава металлов, раздробленного или гальванически восстановленного в мелкодисперсный порошок) состава частиц позволяют получать повторяемые и ожидаемые результаты метода ХГН.

Способ ХГН позволяет использовать для получения покрытий не только однокомпонентные порошки, но и их смеси (двух- и более компонентные). Поскольку эффективное напыление каждого материала происходит при определенных значениях температуры и скорости его частиц, эти значения могут сильно различаться для различных компонентов смеси (например, при смешивании алюминия с цинком или железом) [28, с. 780].

Таблица 1. Количественное соотношение фаз в покрытии Al-Zn

Температура и число циклов напыления	Содержание фаз, вес. %		
	Zn	Al	Al ₂ O ₃
T=270°C, N=7	38,7±2,5	41,8±0,8	19,5±1,2
T=540°C, N=3	61,7±2,8	19,4±0,8	18,9±0,8
T=540°C, N=7	61,6±3,0	18,5±0,7	19,9±1,3
T=540°C, N=7, термическая обработка	72,5±3,3	11,0±0,9	16,5±1,7

Ученые и инженеры лаборатории №6 ИТПМ СО РАН провели эксперимент по напылению трехкомпонентной смеси при разных температурах и скоростях частиц [25, с. 75–84]. В примере базовое соотношение частиц алюминия (Al), цинка (Zn) и оксида алюминия (Al₂O₃) равно 35±5%: 40±5%: 25±5%. Результаты исследования полученного покрытия (табл. 1) показали существенную разницу в химическом составе напылённого слоя.

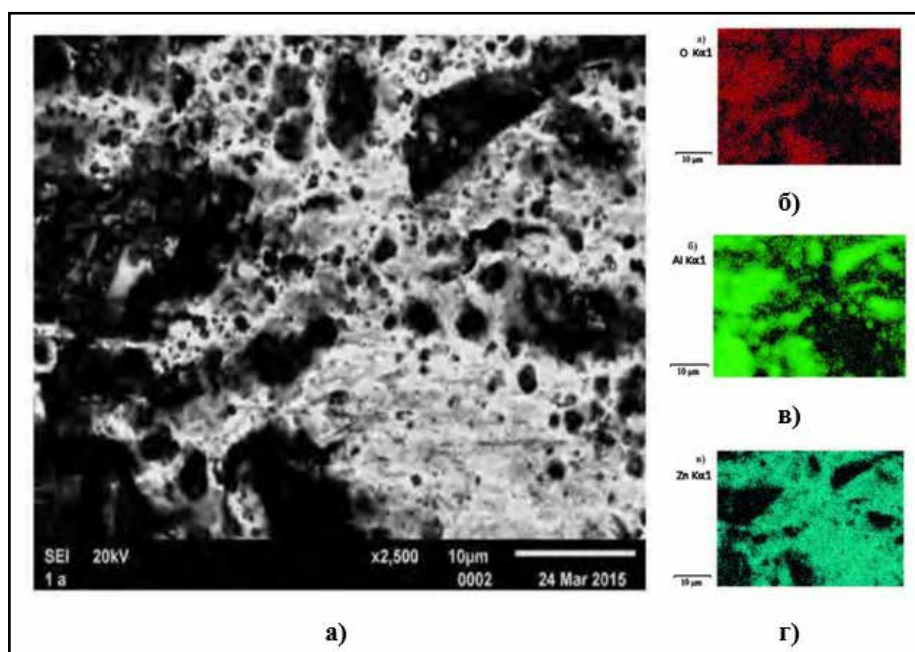
Кроме того, металлографические исследования и замеры твердости показали неравномерную величину микродеформаций частиц (табл. 2), что в целом приводит к возникновению остаточных напряжений [12, с. 24–25], приводящих к коррозионным процессам на границе зёрен и фазовых систем [23, с. 37–38; 24, с. 78–83], что в конечном итоге приведет к уменьшению адгезии напылённого слоя и его последующему разрушению.

Таблица 2. Величины микродеформаций кристаллических решеток различных фаз в покрытии Al-Zn

Температура и число циклов напыления	Величина микродеформаций, $\times 10^{-4}$		
	Zn	Al	Al ₂ O ₃
T=270°C, N=7	23,4±0,9	25,9±2,0	40,8±6,0
T=540°C, N=3	28,6±1,2	26,0±1,8	29,5±4,8
T=540°C, N=7	32,2±1,2	28,6±3,4	33,6±6,0
T=540°C, N=7, термическая обработка	39,6±2,7	60,8±4,9	21,7±6,6

Неравномерность в содержании фаз двухкомпонентного покрытия Al-Zn (ил. 3) приведет к неравновесному электрохимическому состоянию на поверхности произведений из металла, экспонирующихся на открытом воздухе, и создаст классические очаговые участки будущего коррозионного разрушения покрытия [20, с. 5–6], а высокий деформационный наклёп покрытия, полезный с точки зрения повышения эксплуатационных характеристик изделия в машиностроении, может иметь нежелательный эффект в реставрационных практиках, обозначенный выше.

В 2010 г. учеными и инженерами лаборатории №6 ИТПМ СО РАН была разработана схема соплового узла [21; 22], позволяющего управлять температурой и скоростью напыляемых частиц не только варьированием параметров газового потока и вводимых компонентов смеси, но и независимой инжекцией этих компонентов в разные области потока для достижения их оптимального напыления.



Ил. 3.

Пример неравномерности в содержании фаз двухкомпонентного покрытия методом ХГН: а) структура двухкомпонентного покрытия Al-Zn; б), в), г) электронная поэлементная (O, Al, Zn — соответственно). Источник: [24]

Широкий спектр применяемых материалов для метода ХГН не является показателем разнообразия мелкодисперсных порошков в производстве сырья для реставрационных целей. Получение различных по химическому составу однокомпонентных покрытий для покрытий методом ХГН затруднительно и нерентабельно в силу широкого диапазона черных и цветных сплавов, применяемых в изготовлении произведений из металла, а подбор из уже существующих однокомпонентных композиций требует научных исследований и испытаний для обоснования применения данного состава покрытия и последующей оценки качества реставрационных работ.

Выход из вышеуказанной ситуации становится возможен при напылении двухкомпонентного покрытия (из двух видов порошковых частиц разных металлов, например, Al и Zn), создающих металлическую композицию, близкую к химическому составу основного материала произведений из металла, экспонирующихся на открытом воздухе. Для этого необходимы более дорогостоящая установка для метода ХГН, имеющая два, а не один, порошковых питателя (для разных видов металлических частиц); более квалифицированный персонал (оператор по нанесению двухкомпонентного покрытия); проведение тестовых испытаний и подбор режимов напыления, что в целом приводит к значительному удорожанию технологии ХГН.

История внедрения метода ХГН в реставрационную практику

Если специалисты Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН были первооткрывателями данного способа, то реализация технологии метода ХГН исторически была возложена на Обнинский центр порошкового напыления (ООО «ОЦПН»), который был основан в 1996 г. группой специалистов с целью создания оборудования для нанесения металлических покрытий новым методом.

В 1997 г. ООО «ОЦПН» осуществило первые поставки опытных образцов оборудования ДИМЕТ® («динамическая металлизация») потребителям. С 1998 г. начался серийный выпуск портативных моделей оборудования, которые нашли широкое применение в различных областях промышленности. Порошковые расходные

материалы для металлизации методом ХГН в России также выпускаются ООО «ОЦПН», однако серийный ассортимент их невелик, на сегодняшний день насчитывается около 15 марок для технологии ДИМЕТ. Это объясняется экономическим фактором — освоение выпуска новых порошковых смесей достаточно энергоёмко и затратно, не имеет массового спроса у конечного потребителя.

В реставрации произведений из металла применение однокомпонентных порошковых материалов позволило получить достаточно стойкое и однородное по свойствам покрытие.

Необходимо отметить, что технология ХГН предлагается к использованию в реставрации вскоре после начала серийного выпуска оборудования (в 2002 г., при начале промышленного выпуска оборудования в 1998 г.). Обращает на себя внимание и то, что технология ХГН внедряется в реставрационную практику сразу на примере выдающихся произведений отечественной культуры.

Способ холодного газодинамического напыления с использованием оборудования ДИМЕТ в реставрации монументальной скульптуры был впервые применен в г. Санкт-Петербурге с привлечением С. М. Бондаренко в 2002 г. Следует отметить, что к настоящему моменту он не значится в реестре аттестованных специалистов в области сохранения объектов культурного наследия, размещенном на сайте Министерства культуры Российской Федерации. Это хоть и косвенно, но всё же ставит под сомнение уровень его квалификации, тем более что апробация метода произошла сразу на двух выдающихся произведениях: скульптурах ангелов Исаакиевского собора и скульптуре ангела на шпилье Петропавловского собора Петропавловской крепости. Так, скульптурное убранство фасадов Исаакиевского собора датируется 2-й половиной XIX в. Скульптуры, украшающие наружный аттик, которые, вероятно, и были отреставрированы методом ХГН, выполнены выдающимся скульптором И. П. Витали. Скульптура на шпилье Петропавловского собора считается одним из главных символов Санкт-Петербурга и также датируется 2-й половиной XIX в. При этом, согласно общепринятым представлениям об этических нормах и принципах в реставрации, апробация методик невозможна на оригинальных произведениях искусства, тем более имеющих выдающееся значение для отечественной истории и культуры, и должна производиться на модельных образцах.

Согласно информации, размещенной на сайте фирмы-производителя, на скульптурах, украшающих Исаакиевский собор, напылением восстанавливалось гальваническое медное покрытие на свинцово-оловянных элементах медной скульптуры. Смесью свинца и олова заравнивались трещины, каверны, углубления и сквозные отверстия, восполнялись утраты. Такие же повреждения восстанавливались напылением медного порошка и на медной поверхности скульптур.

На скульптуре с креста шпиля Петропавловского собора Петропавловской крепости напылением медного порошка восстанавливалось гальваническое (или наклепанное) медное покрытие латунных вставок и места пайки этих элементов, а также устранялись повреждения, описанные в первом случае: смесью олова и свинца покрывались места пайки и сквозные отверстия. Напыление цинком производилось и на детали металлического поворотного механизма скульптуры.

Основное распространение метод ХГН в реставрации монументальных произведений из металла получил в г. Санкт-Петербурге. Примеров его использования в г. Москве или других регионах значительно меньше. Так, помимо двух уже

рассмотренных случаев известно о локальном применении метода ХГН в практике ООО «Реставрационная Мастерская «Наследие» при проведении работ по сохранению 6 объектов культурного наследия, расположенных в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Среди них — Памятник императору Николаю I на Исаакиевской площади, скульптуры львов на Адмиралтейской набережной и др.

Пожалуй, самый яркий пример использования метода ХГН при реставрации монументальной композиции, расположенной на территории г. Москвы, — это две аллегорических скульптуры «Вода» («Дары воды», «Море») и «Земля» («Дары земли»), установленные на аллее Олимпийского комплекса в Лужниках (Лужнецкая набережная). В 2008–2010 гг. при проведении реставрационных работ, связанных с восстановлением утраченных фрагментов и нанесением защитно-декоративного покрытия, необдуманно применили метод ХГН, что привело к дальнейшим разрушениям памятника. В 2015–2017 гг. проводились комплексные реставрационные мероприятия, в ходе которых были удалены покрытия ХГН и доделки. Удалось избежать искажения авторской фактуры на скульптурах благодаря тому, что напыление производилось без тщательной подготовки поверхности. В этом случае также стоит отметить, что новый неапробированный метод ХГН был применен в реставрации выдающихся произведений искусства. Автором эскизов монументов является народный художник СССР В. И. Мухина. История создания монументов не проста. В конце 1930-х гг. В. И. Мухина по просьбе архитектора А. В. Щусева создала эскизы четырех композиций, разместить которые предполагалось у сооружаемого Москворецкого моста. Среди эскизов, помимо однофигурных композиций «Вода» и «Земля», были представлены также двухфигурные композиции «Плодородие» и «Хлеб». Однако работа прервалась, и скульптуры созданы не были. В записке-завещании, адресованной и переданной сыном после смерти В. И. Мухиной В. М. Молотову, содержалась в том числе просьба увеличить скульптуры и установить их парами. Завещание скульптора было выполнено, и в 1964 г. скульптуры в существующих ныне размерах были отлиты из сплава на основе цинка бригадой мастера-литейщика, художника В. В. Лукьянова (как гласит надпись на плинтах скульптур) и установлены в Лужниках учениками В. И. Мухиной: З. Г. Ивановой, Н. Г. Зеленской, А. М. Сергеевым. Скульптура «Земля» представляет собой фигуру сидящей обнаженной женщины, которая двумя руками придерживает корзину с овощами и фруктами. Скульптура «Вода» представляет собой обнаженного юношу, который за ус удерживает большого сома, а у его ног изображен краб. Обе скульптуры решены в традициях соцреализма и представляют собой аллегории богатства природных ресурсов и мощь человека, укрощающего и подчиняющего стихии. Памятники являются яркой составляющей архитектурного комплекса стадиона Лужники.

Таким образом, применение метода ХГН в реставрации в настоящий момент получило ограниченное распространение, а реализованные проекты по большей части локализуются в г. Санкт-Петербург. Все известные авторам исследования и примеры связаны с использованием оборудования ДИМЕТ, производимого на базе ООО «ОЦПН».

Исследование образцов покрытия металла скульптур «Земля» и «Вода» В. И. Мухиной

Скульптурные композиции «Земля» и «Вода» неоднократно обследовались за последние 30 лет: производились обмеры памятников, фотофиксация, анализ

причин и характера разрушения. Реставрационные работы также выполнялись многократно: в 1995, 2001, 2008, 2010, 2015–2017 гг. Следует отметить, что интересующие нас операции были проведены с сентября по ноябрь 2010 г. и включали:

- нанесение двухслойного покрытия: газодинамическое напыление цинково-алюминиевого порошка марки А-20-11В, графитовая краска АГЗ-Х;
- восполнение утрат путём наращивания металла по гипсовым доделкам методом газодинамического напыления цинково-алюминиевого порошка марки А-20-11.

Материал обеих скульптур — сплав на основе цинка (цинк, алюминий, медь). Композиции выполнены методом литья. Структурный анализ и кристаллографические исследования, проведенные сотрудниками ГОСНИИР в 2010 и 2015 гг., показали, что наиболее близким к металлу скульптур и соответствующим по механическим свойствам современным сплавом является ЦАМ-9-1,5 ГОСТ 7117-62, состоящий из цинковой основы, не более 10% Al и 1–2% меди.

Металлографическое исследование 2015 г., выполненное И. Г. Равич — кандидатом технических наук, ведущим научным сотрудником ФГБНИУ «ГОСНИИР», — выявило микроструктуру, типичную для литых сплавов тройной системы цинк-алюминий-медь, содержащих несколько процентов алюминия и меди [19, с. 254, 247–248, табл. 65]. Межкристаллитных трещин, связанных с межкристаллитной коррозией, или иных проявлений коррозионного разрушения не обнаружено. Было определено, что хрупкость фрагментов скульптур связана с естественным старением, характерным для сплавов системы цинк-алюминий-медь. Этот процесс особенно выражен при выдержке сплава при температуре 0°C и ниже, т. е. в условиях, характерных для скульптуры, экспонирующей под открытым небом.

Материалом для данного этапа процесса исследований стали пробы, отобранные с поверхности скульптур «Вода» и «Земля» в 2015 г. Они представляли собой небольшие фрагменты металла скульптур (ил. 4) с нанесенным методом ХГН покрытием и созданным в ходе реставрационных работ 2010 г. лакокрасочным слоем.



Ил. 4.

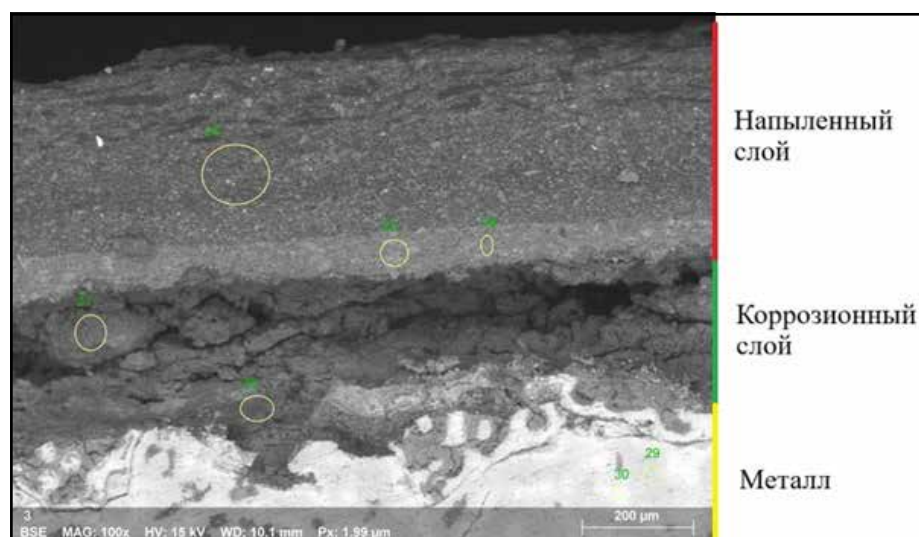
Подготовленные образцы для исследований с нанесенным покрытием методом ХГН: а) на основной металл скульптуры и доделку из нового металла, б) новая вставка. Фото авторов

В ходе подготовки к лабораторным анализам было обнаружено самопроизвольное осыпание материала покрытия в процессе хранения образцов, его непрочность, нестойкость и хрупкость при абразивной подготовке шлифа. Данный факт сделал бессмысленным проведение исследования по микротвердости поверхности

образцов, так как стала очевидной потеря адгезионных характеристик. Невооруженным глазом была видна белёсость и высолы между основным металлом и напыленным материалом, что говорит о коррозионном процессе, проходящем по границе сред «покрытие — основной металл».

В ходе проведения электронной микроскопии было получено подтверждение коррозионного растрескивания слоя, нанесенного методом ХГН и, как следствие, разрушение и деградация этого материала, отслаивание лакокрасочного покрытия и дальнейшее коррозионное разрушение металла скульптур.

На представленном результате микрорентгеновского спектроскопического исследования поверхности шлифа, изготовленного из фрагмента скульптуры «Земля-Вода», BSE-изображение (*Backscattered Electron image* — снимок в обратно рассеянных электронах) разделено на три основные части: металл (основа), коррозионный слой, напыление (ил. 5). Важно отметить, что на полученном снимке хорошо продемонстрировано отсутствие адгезии между металлической поверхностью и напылённым слоем в силу формирования рыхлых продуктов коррозии.



Ил. 5.
Характер расслоения поверхности
образца новой вставки. Фото авторов

Нанесенное покрытие состоит из двух слоев с разным химическим составом, обусловленным различной температурой и скоростью напыления. Анализируя характер покрытия по химическому составу, можно заметить существенное отличие материала его слоев от основного металла (более, чем в два-три раза по Al и Zn). Это абсолютно ожидаемо [13] в двухкомпонентных порошках с различным весом частиц, нанесенных обычным соплом, в котором скорость общего газодинамического потока регулируется только температурой.

При комплексном исследовании распределения химических элементов (BSE-анализ) в поверхностном слое были обнаружены неравномерное содержание фаз системы Zn-Al и высокая коррозионная активность (определяется неметаллическими химическими элементами O, Cl, S, P). Визуально эти два показателя полностью совпадают, что говорит об электрохимическом характере коррозии, где неравновесное содержание металлических элементов в разделе сред «покрытие — металл» может приводить к значительному увеличению скорости протекания реакций окисления, свойственных для коррозионных электрохимических процессов, являющихся главными факторами, уменьшающими адгезию покрытия к основному металлу скульптуры (ил. 6).



Ил. 6.

На исследованном фрагменте скульптуры «Вода» в 2016 году виден прогрессирующий рост трещин, расширение разломов и площади повреждения покрытия методом ХГН. Фото авторов

При более высоком разрешении, применяемом в кристаллографических исследованиях на шлифах в покрытии, выполненном методом ХГН, были обнаружены протяженные трещины, — как горизонтального, расслаивающего характера, так и вертикальные, перпендикулярные к поверхности шлифа, что наводит на мысль о существенном влиянии остаточных напряжений, возникающих по границам сред и зон напыления в методе ХГН при деформации частиц. Этот вопрос малоизучен и, как правило, его относят к нарушению технологии при нанесении покрытий методом ХГН. Однако, как показывает опыт специалистов ГОСНИИР, данный процесс негативно влияет на прочность и коррозионную стабильность художественных произведений, изначально изготовленных из пластичных металлов, но имеющих остаточные напряжения по границам зёрен металла, например, в ходе неправильного, неравномерного отжига [29].

Учитывая характер покрытия, полученного методом ХГН, а также результаты кристаллографических и электронно-рентгеноскопических анализов, можно сделать вывод о типе разрушения покрытия и отнести его к коррозионному растрескиванию под напряжением [31].

Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) — это разрушение материалов (обычно металлов) под одновременным воздействием растягивающего напряжения и коррозионной среды. Оно приводит к образованию трещин, которые могут распространяться и вызывать внезапный отказ, при этом почти отсутствует видимая пластическая деформация [14]. Для возникновения этого явления необходимы три условия: восприимчивый материал, растягивающее напряжение и агрессивная среда, например, содержащая хлориды или сероводород.

Натурное визуальное обследование нескольких памятников, отреставрированных с помощью метода ХГН

В рамках настоящего исследования было выполнено натурное визуальное обследование нескольких объектов, при реставрации которых использовался метод ХГН.

Первый из них — скульптуры «Укрощение коней» работы П. К. Клодта, установленные на Аничковом мосту в г. Санкт-Петербурге. Скульптуры представляют

собой четыре бронзовые композиции, изображающие этапы покорения человеком дикой лошади и символизирующие победу разума над стихией. Вновь нужно отметить, что эти памятники, изготовленные в 1841–1850 гг., являются своеобразной «визитной карточкой» города и выдающимися произведениями искусства.

Скульптуры Аничкова моста прошли несколько крупных реставраций. Особенно значимая состоялась в 2000–2001 гг. и включала демонтаж скульптур на период в 10 месяцев. За это время была реализована внушительная программа работ, в том числе по восстановлению бронзы скульптур и защите от коррозии с применением метода ХГН. Кроме того, проводилось укрепление самого моста и его перил, были изготовлены точные копии деталей ограждения, что позволило сохранить этот символ Санкт-Петербурга.

Спустя 25 лет с момента завершения этой масштабной реставрации был выполнен натурный визуальный анализ памятников, с особым акцентом на результаты использования метода ХГН.

Переходя к анализу результатов натурального обследования, рассмотрим дефекты, выявленные визуальным осмотром на скульптурах Аничкова моста (ил. 7):

- наблюдаются изменение авторской фактуры и микрорельефа по всей поверхности памятника, произошло сглаживание поверхности, рельеф приобрел «обобщенный» вид: напылённый слой имеет визуально отличимую фактуру;
- на некоторых участках поверхности произошло частичное разрушение покрытия, нанесенного методом ХГН:
- грудь юноши — остатки покрытия ХГН с гладкой поверхностью; спина юноши — покрытие частично сошло, обнажается шершавая поврежденная поверхность (ил. 7 а);
- голень юноши — истонченное покрытие ХГН, обнажается шершавая поврежденная поверхность (ил. 7 в);
- бок лошади — истонченное покрытие ХГН, обнажается шершавая поврежденная поверхность (ил. 7 г);
- в узких или глубоких местах рельефа, например, в глубоких трещинах, заметны дефекты. Вероятно, напыляемый материал не смог должным образом проникнуть в сложные места на поверхности скульптуры. Для устранения таких дефектов методом ХГН потребовалась бы дополнительная механическая обработка (расширение дефекта), что само по себе может рассматриваться как нежелательное вмешательство в структуру памятника (ил. 7 е);
- на обнажившихся в результате утраты напылённого слоя поверхностях видны следы коррозии медного сплава ярко-зеленого цвета (ил. 7 б, 7 д, 7 е, 7 з).

Таким образом, в результате натурального визуального обследования нескольких памятников выявлены негативные и позитивные результаты использования метода ХГН в реставрации металлической монументальной скульптуры. Метод ХГН, как в целом любой из реставрационных методов, имеет свои достоинства и недостатки и требует взвешенного подхода при использовании.



а)



б)



в)



г)



д)



е)



ж)



з)

Ил. 7.
Фотографии скульптурной группы с покрытием, нанесенным методом ХГН, при визуальном осмотре.
Фото авторов

Рекомендации по использованию метода ХГН в реставрации произведений из металла, экспонирующихся на открытом воздухе

В данной статье рассмотрены примеры использования холодного газодинамического напыления в процессе реставрации произведений из металла, экспонирующихся на открытом воздухе. Метод ХГН, как и любой другой, имеет свои плюсы и минусы, и не является панацеей [2].

На основе проведенных исследований были выявлены следующие недостатки и ограничения метода ХГН в реставрации произведений из металла на открытом воздухе:

- изначально разработанный для нужд машиностроения и ремонта, метод не может быть в полной мере адаптирован к реставрационным нуждам. Методы ремонта и реновации механизмов не должны слепо переноситься на восполнение утрат/дефектов в памятниках историко-культурного наследия (независимо от их юридического статуса). Восполнение утрат в машиностроении не тождественно восполнению утрат на объектах, имеющих художественную и историческую ценность;

- метод ХГН является необратимым технологическим процессом. Для закрепления частиц напыляемого слоя на поверхности основного металла необходимо эрозионное воздействие. Только внедрение в материал основы обеспечивает создание механической связи и получение высоких адгезионных характеристик. В результате этого процесса происходит необратимое изменение авторской основы — как при подготовке поверхности (зачистке от коррозии и других наслоений), так и при нанесении слоя методом ХГН;

- зачастую поверхности памятника из металла разнообразны, имеют разную фактуру, которая воплощает художественный замысел автора. С утратой, искажением авторской фактуры происходит частичная потеря художественных достоинств памятника [16], поэтому данный метод не может применяться в качестве общего защитного-декоративного покрытия при реставрации;

- при локальном напылении для восполнения дефектов и утрат (каверны, раковины, разрывы и т. п.), возникших вследствие коррозии или в процессе изготовления памятника, также требуется тщательная подготовка поверхности металла: удаление окислов, коррозионных наслоений, полная химическая и механическая расчистка, удаление аварийного металла. При разной высоте рельефа раковины возникает необходимость выравнивания, что приводит к увеличению площади обработки и частичной утрате авторской поверхности;

- напылённый слой, как правило, имеет нагартованность (наклёп), растрескивание по вертикали и горизонтали, что приводит к преждевременным коррозионным процессам и дальнейшему разрушению памятника;

- напыление двухкомпонентного (и более) состава порошкового покрытия должно максимально соответствовать физическим характеристикам сплава производства из металла;

- напыление смешанного двухкомпонентного (и более) состава порошкового покрытия обычным соплом ДИМЕТ (установки I рода) невозможно из-за неравномерности и неопределенности состава покрытия в зависимости от режимов напыления. Получаемый напылённый слой не соответствует заявленному;

- надежное напыление двухкомпонентного состава порошкового покрытия возможно только с применением модернизированного сопла (установки II рода) при разделении двух фракций разных порошковых материалов на различные зоны внедрения в общий газодинамический поток для придания частицам фракций разной скорости напыления;

- нанесенное покрытие имеет остаточное напряженное состояние, что требует термического отжига поверхности покрытия и постоянного мониторинга за коррозионным состоянием границы раздела сред «покрытие — основной металл», что является высокочеловеческим метрологическим мероприятием;

С учетом отмеченных недостатков применение метода ХГН в реставрации произведений из металла на открытом воздухе следует ограничить следующими областями:

- возможно только локальное применение при восполнении дефектов и утрат (каверны, раковины, разрывы и т. п.), возникших вследствие коррозии или в процессе изготовления памятника, однокомпонентным порошком, близким по составу к основному металлу;

- возможно использование на вспомогательных конструкциях и неответственных участках поверхности;

- как промышленный и реновационный способ восстановления свойств и геометрии поверхности изношенных деталей метод ХГН может применяться в реставрации предметов политехнического типа [30] — в сменных и заменяемых узлах, с учетом обратимости реставрационного процесса для музейного объекта;

Заключение

В процессе данной работы было предпринято всестороннее изучение технологии холодного газодинамического напыления (наплавления) для определения границ допустимости ее использования в реставрации произведений из металла, экспонирующихся под открытым небом.

В исследовании рассмотрены особенности метода напыления (наплавления), история его разработки и области применения. На примере произведений из металла, отреставрированных в г. Москве и г. Санкт-Петербурге методом ХГН, проанализированы результаты его использования в реставрационных целях. Для этого выполнена оценка текущего состояния покрытий на нескольких отреставрированных произведениях путем натурного визуального анализа, а также проведены лабораторные анализы имеющихся в распоряжении ФГБНИУ «ГОСНИИР» проб однокомпонентных и двухкомпонентных покрытий, нанесенных на объект культурного наследия федерального значения «Аллегорические скульптуры "Земля" и "Вода"». На основе проведенных лабораторных исследований сделаны выводы о стойкости напыленного покрытия и о причинах его разрушения.

В результате проведенного исследования авторский коллектив выделяет существенные негативные последствия применения данного метода, — такие как повреждение авторской фактуры, необратимость и недолговечность покрытия, — и считает недопустимым его использование в качестве общего защитного-декоративного покрытия при реставрации. При этом отмечается возможность локального применения ХГН при восполнении дефектов и утрат на поверхности скульптуры (каверн, раковин, разрывов и т. п.). Таким образом, несмотря на широкое применение метода ХГН в промышленности, он не может быть в полной мере адаптирован к реставрационным нуждам.

Список литературы

1. III Профильная выставка «ПРОреставрацию. Импортозамещение в реставрационных материалах и технологиях» // Круглый стол ««Применение современных технологических процессов в научной реставрации» 30 ноября 2024 г. — URL: <https://yandex.ru/video/preview/8309309475587807700> (дата обращения: 24.12.2025).
2. IV Профильная выставка «ПРОреставрацию. Импортозамещение в реставрационных материалах и технологиях» // Научно-методический семинар «Современные возможности технологий (наплавления) в реставрации произведений из металла» 05 декабря 2025 г. — URL: <https://прореставрацию.рф/25/day2#!/tab/1514283531-2> (дата обращения: 24.12.2025).
3. Алхимов А. П. и др. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду / А. П. Алхимов, А. И. Гулидов, В. Ф. Косарев, Н. И. Нестерович // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. №1 (239). С. 204–209.
4. Алхимов А. П. и др. Холодное газодинамическое напыление: Теория и практика / А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, В. М. Фомин / под ред. В. М. Фомина. М.: Физматлит, 2010. — 536 с.
5. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. Метод «холодного» газодинамического напыления // Доклады Академии наук СССР. 1990. Т. 315. С. 1062–1065.
6. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. и др. Новые материалы и технологии. Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных процессах. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1992. — 200 с.
7. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Плохов А. В. Научные основы технологии холодного газодинамического напыления (ХГН) и свойства напыленных материалов. Новосибирск: НГТУ, 2006. — 279 с.
8. 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. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2024. №1. С. 7–28.
9. Зайцев А. Н., Александрова Ю. П., Ягопольский А. Г. Обзор методов оценки прочности сцепления газотермических покрытий // Изв. высших учеб. заведений. Машиностроение. 2021. №5 (734). С. 48–59.
10. Коробов Ю. С., Панов В. И., Разиков Н. М. Основные методы и материалы газотермического напыления. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 80 с. (Анализ свойств газотермических покрытий: Учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1).
11. Косарев В. Ф. Физические основы холодного газодинамического напыления: специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»: дис. ... д. ф.-м. н. Новосибирск: [Б. и.], 2003. — 292 с.
12. Косарев В. Ф. и др. Свойства медных и алюминиевых покрытий, полученных детонационным и холодным напылением / В. Ф. Косарев, А. А. Сова, С. Б. Злобин, В. Ю. Ульяницкий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. №6 (78). С. 20–26.
13. Косарев В. Ф., Клинков С. В. Кинетика формирования ХГН покрытий // XXIII семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям: сб. трудов

(с международным участием). Томск, 26–28 июня 2012 г.: Сб. трудов / под ред. Г. В. Кузнецова и др. Томск: ИТПУ 2012. С. 210–213.

14. Котельников П. Н. и др. Исследование причин разрушения литых латунных осветительных приборов, датируемых концом XIX – началом XX века / П. Н. Котельников, А. В. Михайлова, М. В. Нацкий, И. Г. Равич // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2025. №3 (15). С. 32–47.

15. Котельников П. Н., Кураков С. В., Богданов А. В. Научная реставрация предметов из металла с рельефным изображением: современные методы восполнения утрат // Невская фотоника-2025. Всероссийская науч. конф. с международным участием. Сб. науч. трудов (13–18 октября 2025 г.) СПб.: Ун-т ИТМО, 2025. С. 34.

16. Круглый стол «Theatrum Machinarum: Цифровые коммеморативные практики» 27 ноября 2025 // XXV международная научно-теоретическая конференция «Профессиональная культура специалиста будущего». 27–29 ноября 2025, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — URL: <https://pcsf.spbstu.ru/> (дата обращения: 24.12.2025).

17. Кураков С. В. и др. Современные подходы и возможности в научной реставрации чеканно-рельефного профиля произведений из металла / С. В. Кураков, А. В. Богданов, М. А. Мельникова, Г. В. Тихомиров, П. Н. Котельников // Дизайн. Материалы. Технология. 2025. №4 (80). С. 22–30. DOI: 10.46418/1990-8997_2025_4(80)_22_30.

18. Лобанов М. Л. и др. Защитные покрытия: Учеб. пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. — 200 с.

19. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов (С прил. Атласа макро- и микроструктур). — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1970. — 368 с.

20. Нацкий М. В., И. Г. Равич. Изучение причин самопроизвольного растрескивания музейных экспонатов, полученных обработкой давлением из латунных листов // Культурологический журнал. 2021. №4 (46). С. 1–10.

21. Патент № 2353705 С2 Российская Федерация, МПК С23С 24/04, В05В 7/06. Способ газодинамического напыления порошковых материалов и устройство для его реализации: № 2006141982/02: заявл. 27.11.2006: опубл. 27.04.2009 / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, С. В. Клинов [и др.]; заявитель Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ИТПМ СО РАН).

22. Патент № 2396371 С2 Российская Федерация, МПК С23С 24/04, В05В 7/10. Способ газодинамического напыления порошковых материалов и устройство для его реализации (Варианты): № 2008128115/02: заявл. 09.07.2008: опубл. 10.08.2010 / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, С. В. Клинов [и др.]; заявитель Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ИТПМ СО РАН).

23. Равич И. Г. О возможности применения отжига при реставрации изделий, полученных из листовой латуни и подвергшихся растрескиванию // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2022. №3. С. 35–44.

24. Равич И. Г. и др. О возможности отжига для снятия внутренних напряжений в изделиях с позолотой, изготовленных из листовой латуни с помощью деформации / И. Г. Равич, М. В. Нацкий, А. В. Михайлова, А. О. Беккер // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2023. №3. С.75–87.

25. Сова А. А. Исследование процесса нанесения многокомпонентных покрытий методом холодного газодинамического напыления: специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»: дис. ... к. т. н. Новосибирск, 2009. — 120 с.

26. Фазлуллин С. М. Проблема изучения и сохранения предметов музейных коллекций из полимерных материалов. Часть 1 // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2025. №1 (13). С. 73–87.

27. Шемаханская М. С. Металлы и вещи. История. Свойства. Разрушение. Реставрация. М.: Индрик, 2015. — 286 с.

28. Шикалов В. С., Клинков С. В., Косарев В. Ф. Холодное газодинамическое напыление алюминиевого покрытия на эрозионно нестойкий материал // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. №5. С. 779–787.

29. De Force B., Eden T., Potter J. Cold spray Al-5% Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20. No. 6. P. 1352–1358.

30. Kurakov S., Kotelnikov P. Scientific Restoration of Polytechnic Heritage: The Case of the Franz Reuleaux Collection // Technology and Language. 2025. Vol. 6. No.3 (20). P. 64–79. — DOI 10.48417/technolang.2025.03.05.

31. Wang H.-R. et al. Effect of process conditions on microstructure and corrosion resistance of cold-sprayed Ti coatings / H.-R. Wang, B.-R. Hou, J. Wang, Q. Wang, W.-Y. Li // Journal of Thermal Spray Technology. 2008. Vol. 17. No. 5–6. P. 736–741.

1. III Профил`naya vy`stavka «PROrestavraciyu. Importozameshhenie v restavracionny`x materialax i texnologiyax» // Krugly`j stol ««Primenenie sovremenny`x texnologicheskix processov v nauchnoj restavracii» 30 noyabrya 2024 g. — URL: <https://yandex.ru/video/preview/8309309475587807700> (data obrashheniya: 24.12.2025).

2. IV Профил`naya vy`stavka «PROrestavraciyu. Importozameshhenie v restavracionny`x materialax i texnologiyax» // Nauchno-metodicheskij seminar «Sovremennyy`e vozmozhnosti texnologij (naplavlenniya) v restavracii proizvedenij iz metalla» 05 dekabrya 2025 g. — URL: <https://prorestavraciyu.rf/25/day2#!/tab/1514283531-2> (data obrashheniya: 24.12.2025).

3. Alximov A. P. i dr. Osobennosti deformirovaniya mikrochasticz pri udare o tverduyu pregradu / A. P. Alximov, A. I. Gulidov, V. F. Kosarev, N. I. Nesterovich // Prikladnaya mexanika i texnicheskaya fizika. 2000. T. 41. №1 (239). S. 204–209.

4. Alximov A. P. i dr. Xolodnoe gazodinamicheskoe napy`lenie: Teoriya i praktika / A. P. Alximov, S. V. Klinkov, V. F. Kosarev, V. M. Fomin / pod red. V. M. Fomina. M.: Fizmatlit, 2010. — 536 s.

5. *Alximov A. P., Kosarev V. F., Papy`rin A. N.* Metod «xolodnogo» gazodinamicheskogo napy`leniya // *Doklady` Akademii nauk SSSR.* 1990. T. 315. S. 1062–1065.

6. *Alximov A. P., Kosarev V. F., Papy`rin A. N. i dr.* Novy`e materialy` i texnologii. Teoriya i praktika uprochneniya materialov v e`kstremal`ny`x processax. Novosibirsk: Nauka. Sib. izdat. firma, 1992. — 200 s.

7. *Alximov A. P., Kosarev V. F., Ploxov A. V.* Nauchny`e osnovy` texnologii xolodnogo gazodinamicheskogo napy`leniya (XGN) i svoystva napy`lenny`x materialov. Novosibirsk: NGTU, 2006. — 279 s.

8. *Bazanchuk G. A., Kurakov S. V., Kotel`nikov P. N.* Primenenie additivny`x texnologij v restavracii predmetov politexnicheskogo tipa s periodicheskim zubchaty`m profilom // *Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation.* 2024. №1. S. 7–28.

9. *Zajcev A. N., Aleksandrova Yu. P., Yagopol`skij A. G.* Obzor metodov ocenki prochnosti scepneniya gazotermicheskix pokry`tij // *Izv. vy`sshix ucheb. zavedenij. Mashinostroyeniye.* 2021. №5 (734). S. 48–59.

10. *Korobov Yu. S., Panov V. I., Razikov N. M.* Osnovny`e metody` i materialy` gazotermicheskogo napy`leniya. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2016. — 80 s. (Analiz svoystv gazotermicheskix pokry`tij: Ucheb. posobie: v 2 ch. Ch. 1).

11. *Kosarev V. F.* Fizicheskie osnovy` xolodnogo gazodinamicheskogo napy`leniya: special`nost` 01.02.05 «Mexanika zhidkosti, gaza i plazmy»: dis. ... d. f.-m. n. Novosibirsk: [B. i.], 2003. — 292 s.

12. *Kosarev V. F. i dr.* Svoystva medny`x i alyuminievy`x pokry`tij, poluchenny`x detonacionny`m i xolodny`m napy`leniem / V. F. Kosarev, A. A. Sova, S. B. Zlobin, V. Yu. Ul`yaniczkiy // *Uprochnyayushhie texnologii i pokry`tiya.* 2011. №6 (78). S. 20–26.

13. *Kosarev V. F., Klinkov S. V.* Kinetika formirovaniya XGN pokry`tij // XXIII seminar po strujny`m, otry`vny`m i nestacionarny`m techeniyam: sb. trudov (s mezhdunarodny`m uchastiem). Tomsk, 26–28 iyunya 2012 g.: Sb. trudov / pod red. G. V. Kuzneczova i dr. Tomsk: ITPU 2012. S. 210–213.

14. *Kotel`nikov P. N. i dr.* Issledovanie prichin razrusheniya lity`x latunny`x osvetitel`ny`x priborov, datiruemy`x konczom XIX – nachalom XX veka / P. N. Kotel`nikov, A. V. Mixajlova, M. V. Naczkiy, I. G. Ravich // *Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation.* 2025. №3 (15). S. 32–47.

15. *Kotel`nikov P. N., Kurakov S. V., Bogdanov A. V.* Nauchnaya restavraciya predmetov iz metalla s rel`efny`m izobrazheniem: sovremenny`e metody` vospolneniya utrat // *Nevskaya fotonika-2025. Vserossiyskaya nauch. konf. s mezhdunarod. uchastiem. Sb. nauch. trudov (13–18 oktyabrya 2025 g.)* SPb.: Un-t ITMO, 2025. S. 34.

16. Kruglyj stol «Theatrum Machinarum: Cifrovye kommemorativny`e praktiki» 27 noyabrya 2025 // XXV mezhdunarodnaya nauchno-teoreticheskaya konferenciya «Professional`naya kul`tura specialista budushhego». 27–29 noyabrya 2025, Sankt-Peterburgskij politexnicheskij universitet Petra Velikogo. — URL: <https://pcsf.spbstu.ru/> (data obrashheniya: 24.12.2025).

17. *Kurakov S. V. i dr.* Sovremenny`e podxody` i vozmozhnosti v nauchnoj restavracii chekanno-rel`efnogo profilya proizvedenij iz metalla / S. V. Kurakov, A. V. Bogdanov,

M. A. Mel'nikova, G. V. Tixomirov, P. N. Kotel'nikov // Dizajn. Materialy. Tekhnologiya. 2025. №4 (80). S. 22–30. DOI: 10.46418/1990-8997_2025_4(80)_22_30.

18. Lobanov M. L. i dr. Zashhitny'e pokry'tiya: Ucheb. posobie / M. L. Lobanov, N. I. Kar-donina, N. G. Rossina, A. S. Yurovskix. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo un-ta, 2014. — 200 s.

19. Mal'cev M. V. Metallografiya promy'shlenny'x czvetny'x metallov i splavov (S pril. Atlasa makro- i mikrostruktur). — 2-e izd., pererab. i dop. M.: Metallurgiya, 1970. — 368 s.

20. Naczkiy M. V., I. G. Ravich. Izuchenie prichin samoproizvol'nogo rastreskivaniya muzejny'x e'ksponatov, poluchenny'x obrabotkoj davleniem iz latunny'x listov // Kul'tur-ologicheskij zhurnal. 2021. №4 (46). S. 1–10.

21. Patent № 2353705 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK C23C 24/04, B05B 7/06. Sposob gazodinamicheskogo napy'leniya poroshkovy'x materialov i ustrojstvo dlya ego realizacii: № 2006141982/02: zayavl. 27.11.2006: opubl. 27.04.2009 / A. P. Alximov, V. F. Ko-sarev, S. V. Klinkov [i dr.]; zayavitel' Institut teoreticheskoy i prikladnoj mexaniki im. S. A. Xris-tianovicha SO RAN (ITPM SO RAN).

22. Patent № 2396371 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK C23C 24/04, B05B 7/10. Spos-ob gazodinamicheskogo napy'leniya poroshkovy'x materialov i ustrojstvo dlya ego real-izacii (Varianty): № 2008128115/02: zayavl. 09.07.2008: opubl. 10.08.2010 / A. P. Alximov, V. F. Kosarev, S. V. Klinkov [i dr.]; zayavitel' Institut teoreticheskoy i prikladnoj mexaniki im. S. A. Xristianovicha SO RAN (ITPM SO RAN).

23. Ravich I. G. O vozmozhnosti primeneniya otzhiga pri restavracii izdelij, poluch-enny'x iz listovoj latuni i podvergshixsya rastreskivaniyu // Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2022. №3. S. 35–44.

24. Ravich I. G. i dr. O vozmozhnosti otzhiga dlya snyatiya vnutrennix napryazhenij v izdeliyax s pozolotoj, izgotovlenny'x iz listovoj latuni s pomoshh'yu deformacii / I. G. Rav-ich, M. V. Naczkiy, A. V. Mixajlova, A. O. Bekker // Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2023. №3. S. 75–87.

25. Sova A. A. Issledovanie processa naneseniya mnogokomponentny'x pokry'tij metodom xolodnogo gazodinamicheskogo napy'leniya: special'nost' 01.02.05 «Mexani-ka zhidkosti, gaza i plazmy»: dis. ... k. t. n. Novosibirsk, 2009. — 120 s.

26. Fazlullin S. M. Problema izucheniya i soxraneniya predmetov muzejny'x kolekcij iz polimerny'x materialov. Chast' 1 // Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraci-ya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. 2025. №1 (13). S. 73–87.

27. Shemaxanskaya M. S. Metally i veshhi. Istoriya. Svoystva. Razrushenie. Restavraci-ya. M.: Indrik, 2015. — 286 s.

28. Shikalov V. S., Klinkov S. V., Kosarev V. F. Xolodnoe gazodinamicheskoe napy'lenie alyuminievogo pokry'tiya na e'rozionno nestojkij material // Teplofizika i ae'romexanika. 2019. T. 26. №5. S. 779–787.

Сведения об авторах

Котельников Павел Николаевич — художник-реставратор высшей категории произведений из металла; ФГБНИУ «ГОСНИИР», заведующий отделом научной реставрации произведений из металла
Россия, 107014, Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
E-mail: 113metal@gmail.com

Кураков Сергей Витальевич — инженер-исследователь; МГТУ им. Н. Э. Баумана, старший преподаватель кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» (МТ-4)
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1
E-mail: kurakov@bmstu.ru

Макарова Анастасия Сергеевна — кандидат культурологии, художник-реставратор I категории; ФГБНИУ «ГОСНИИР», ученый секретарь
Россия, 107014, Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
E-mail: aanpilogova@mail.ru

Самойлов Владимир Борисович — кандидат технических наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, доцент кафедры «Технологии обработки материалов» (МТ-13)
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1
E-mail: wladsam@mail.ru

Kotelnikov Pavel N. — restorer of the highest category of metal works; the State Research Institute for Restoration, Head of the Department of scientific restoration of metal works
44-1, Gastello St., Moscow, 107014, Russia
E-mail: 113metal@gmail.com

Kurakov Sergey V. — Researcher engineer; Bauman Moscow State Technical University, Senior Lecturer of the Department «Metrology and Interchangeability»
5-1, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russia
E-mail: kurakov@bmstu.ru

Makarova Anastasia S. — Ph.D. cult., restorer of the I cat.; the State Research Institute for Restoration, Academic Secretary
44-1, Gastello St., Moscow, 107014, Russia
E-mail: aanpilogova@mail.ru

Samoilov Vladimir B. — Ph.D.; Bauman Moscow State Technical University, Associate Professor of the Department «Materials Processing Technologies»
5-1, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russia
E-mail: wladsam@mail.ru

В. А. Парфенов**ЛАЗЕРНАЯ ПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА: НОВОЕ В РЕСТАВРАЦИИ
ПАМЯТНИКОВ ИЗ МЕТАЛЛА**

В статье описан новый подход к реконструкции поврежденных и сильно разрушенных памятников из металла, который основан на использовании технологии лазерной порошковой наплавки. Представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение возможности применения этой технологии на примере восполнения утрат на фрагменте чугунной ограды одного из надгробий XIX века в Александро-Невской лавре в Санкт-Петербурге. Данный предмет представляет собой литое украшение в виде многоконечной звезды, имевшее множественные утраты отдельных элементов. Для реконструкции «звезды» было проведено ее лазерное 3D-сканирование и компьютерное 3D-моделирование. Полученная в результате проведения этих работ 3D-модель была преобразована в CAD-модель, которая использовалась для изготовления утраченных элементов при помощи роботизированной установки лазерной порошковой наплавки. В качестве «строительного материала» в экспериментах использовался порошок из никелевого сплава с размером гранул 50–150 мкм. Плавление металлического порошка осуществлялось при помощи непрерывного волоконного иттербиевого лазера с длиной волны излучения 1,06 мкм и выходной мощностью до 80 Вт. В результате высокоточного движения лазерного пучка по заданной расчетной траектории, что приводило к послойному нанесению тонких слоев расплавленного металла, были реконструированы отсутствующие элементы «звезды». Тем самым доказана эффективность предложенного подхода. Данная работа является первым опытом применения в России лазерных аддитивных технологий в реставрации исторических предметов из чугуна.

Ключевые слова: лазер, аддитивные технологии, лазерная порошковая наплавка, 3D-сканирование, реставрация, реконструкция, памятники из металла.

V. A. Parfenov**DIRECT METAL LASER SINTERING: NEW IN THE RESTORATION OF
METAL MONUMENTS**

The article describes a new approach to the reconstruction of damaged and severely destroyed metal monuments, which is based on the use of the direct metal laser sintering technology. The results of experimental studies aimed at investigation of the possibility of its application are presented using the example of filling the losses on a fragment of a cast-iron fence of one of the tombstones of the XIX century in the Alexander Nevsky Monastery in St. Petersburg. This item is a cast decoration in the form of a multi-pointed star, which had multiple losses of elements. To reconstruct the "star", its 3D laser scanning and computer 3D modeling were carried out. The 3D model obtained as a result of these works was transformed into a CAD model, which was used to manufacture the lost elements using a robotic laser machine. A nickel alloy powder with a granule size of 50–150 microns was used as a "building material" in the experiments. The melting of the metal powder was carried out using a continuous-wave fiber ytterbium laser with a wavelength of 1.06 microns and an output power of up to 80 watts. As a result of the high-precision movement of the laser beam along a given calculated trajectory, which led to the layered application of thin layers of molten metal, the missing elements of the "star" were reconstructed. Thus, the effectiveness of the proposed approach was proved. This work is the first experience of using laser additive technologies in Russia in the restoration of historical cast iron objects.

Keywords: laser, additive technologies, direct metal laser sintering, 3D scanning, restoration, reconstruction, metal monuments.

Введение

В последние годы в области сохранения культурно-исторического наследия всё более широкое использование получает лазерная техника. К числу наиболее отработанных применений лазеров относится лазерная очистка памятников от природных наслоений и антропогенных загрязнений [3; 4], а также целый ряд аналитических методов. К числу последних относятся спектроскопия, интерферометрия, 3D-сканирование и голография, доплеровская виброметрия и др. Они позволяют определять химический состав и осуществлять структурную диагностику, документирование и мониторинг памятников [5]. Новым направлением применения лазеров в музейном деле и реставрации является использование аддитивных технологий, которые известны также под другим названием — 3D-печать, или лазерное прототипирование [1]. Аддитивные технологии используют для создания копий [6], но они могут применяться также для реконструкции поврежденных и даже полностью утраченных памятников [2]. При проведении такого рода работ обычно используют лазерную стереолитографию и лазерный синтеринг, где роль «строительного материала» выполняют жидкие фотополимеры, синтетические порошки или пластики. В данной статье описаны результаты реконструкции исторического памятника из чугуна с использованием лазерной порошковой наплавки. По сведениям авторов, это первый опыт применения данной технологии в реставрационной практике в России.

Объект и метод исследования

Объектом исследования в данной работе служил фрагмент чугунной ограды от одного из надгробий XIX века в Александро-Невской лавре в Санкт-Петербурге. Он представляет собой литое украшение в виде многоконечной звезды небольшого (около 15 см в диаметре) размера. Эта «звезда» находилась в весьма неудовлетворительном состоянии — вся ее поверхность была покрыта толстым слоем коррозии, а кроме того, в процессе бытования «звезды» были утрачены кончики отдельных «лучей» (ил. 1). Именно по причине множественных дефектов данный предмет представлял интерес как модельный объект для исследования возможности реконструкции поврежденных памятников с использованием современных технологий.



Ил. 1.

Объект исследования — фрагмент чугунной ограды XIX века. Фото автора

Здесь необходимо пояснить, что по сложившейся реставрационной практике разрушающиеся или сильно поврежденные предметы из чугуна, не имеющие художественной и исторической ценности, обычно не подлежат восстановлению — их просто заменяют на копии. Однако с появлением и активным развитием в последние годы лазерных аддитивных технологий появляется возможность по-новому подойти к вопросу реконструкции памятников из чугуна и железа. Дело в том, что использование лазерного 3D-сканирования (или фотограмметрии) в комбинации с лазерной порошковой наплавкой позволяет восполнять имеющиеся утраты металлического материала. Лазерная наплавка — это упрощенное название технологии, которая за рубежом известна под аббревиатурой DMLS (*Direct Metal Laser Sintering* — дословно: прямой лазерный металло-синтеринг). Она представляет собой процесс послойного «выращивания» объектов из металлического порошка, расплавляющегося под воздействием высокоинтенсивного лазерного излучения.

Базовая идея такого подхода довольно проста. Допустим, у нас есть предмет сложной геометрической формы, у которого изначально имелись множественные повторяющиеся элементы. Если в силу каких-то причин некоторые элементы были повреждены или полностью утрачены, можно оцифровать (т. е. получить с помощью 3D-сканирования точную компьютерную 3D-модель) сохранившиеся элементы и использовать полученные модели в качестве «иконографической» основы для реконструкции утраченных частей. В другом варианте утраченные элементы можно смоделировать с использованием программ компьютерной графики, а после этого, как и в первом случае, изготовить их при помощи лазерной наплавки. И здесь есть два варианта действий. В одном случае можно предварительно изготовить недостающие детали, а затем закрепить их в нужном месте на памятнике при помощи лазерной микросварки. Во втором случае (это было бы идеальное решение задачи) восполнение утрат возможно непосредственно в тех местах памятника, в которых отсутствуют те или иные части. Но это требует очень точного позиционирования лазерного пучка, производящего плавление гранул металлического порошка и нанесение расплава тонкими слоями прямо на месте утрат для «выращивания» недостающих деталей памятника. С технической точки зрения это очень сложная задача, но она может быть решена при использовании 5–6-координатных роботов-манипуляторов, «рука» которых будет очень точно перемещать луч лазера даже по самой сложной траектории.

В нашем случае была предпринята попытка использовать первый (более простой) подход для реконструкции чугунной «звезды», так как, к сожалению, автор не смог получить доступ к оборудованию для проведения более сложных экспериментов.

Результаты экспериментов

Работа по реконструкции утрат «звезды» началась с ее очистки от коррозии металла. Для удаления корродированных слоев были опробованы три метода обработки: лазерная (при помощи лазера на углекислом газе с длиной волны 10,6 мкм) и пескоструйная очистка (производилась кварцевым песком с фракцией 0,63 мм и давлением воздуха 5–5,5 бар), а также химическая обработка (выполнялась при помощи раствора соли Трилон Б в ультразвуковой камере). Наилучший результат дала химическая обработка (ил. 2 а, б, в).



а)



б)

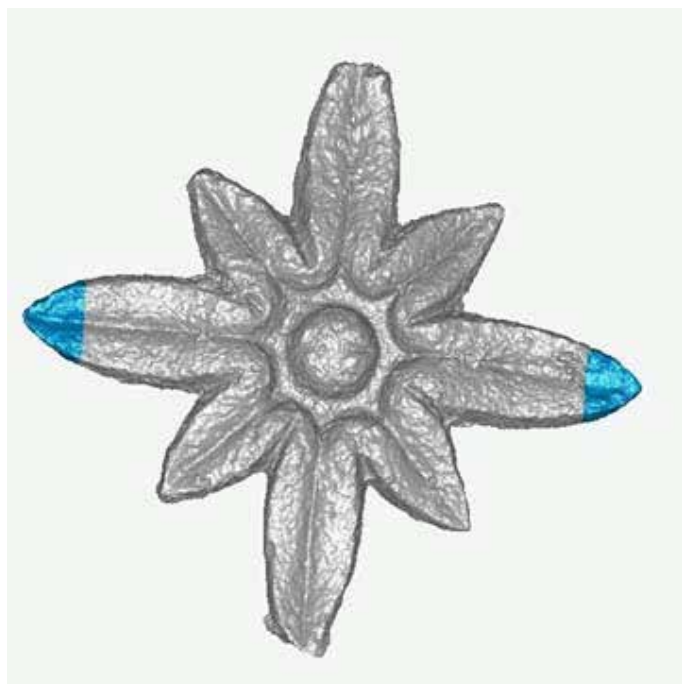


в)

Ил. 2.

Результаты очистки «звезды» от ржавчины: а — лазерная очистка, б — пескоструйная очистка, в — химическая обработка.
Фото автора

После этого с помощью высокоточного лазерного сканера триангуляционного типа Konica Minolta V-910 было проведено 3D-сканирование «звезды» и получена ее 3D-модель. После этого было проведено компьютерное 3D-моделирование. На этом этапе работы недостающие кончики «звезды» были смоделированы на основе сканов сохранившихся кончиков при помощи специализированной программы так называемого скульптинга Zbrush. Эти виртуально реконструированные фрагменты были затем «вшиты» в исходную 3D-модель в нужных местах (см. ил. 3, где представлен скриншот одной из проекций модели «звезды»; здесь синим цветом показаны «дорисованные» фрагменты).



Ил. 3.

Скриншот изображения компьютерной 3D-модели «звезды» с восполненными фрагментами.
Скопировано автором

Эксперименты по лазерной наплавке было решено разделить на два этапа. На первом этапе методом прямого лазерного осаждения металлического порошка мы «вырастили» смоделированные кончики «звезды». Для этого 3D-модель была преобразована в CAD-модель, под управлением которой работают станки лазерной порошковой наплавки. В нашем случае это была лазерная установка OKTA-Printer,

разработанная в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Ее основу составляет непрерывный волоконный иттербиевый лазер с длиной волны 1,06 мкм и выходной мощностью до 80 Вт, а также промышленный робот Самуи (Италия). Для изготовления кончиков «звезды» использовался порошок из никелевого сплава Inconel 625 (изготовитель — Hognas, Бельгия) с размером гранул 50–150 мкм. Данный материал широко используется для лазерной наплавки, но в нашем случае его выбор был связан с тем, что по своим физико-механическим свойствам он близок чугуну.

На втором этапе «напечатанные» на этой установке кончики «звезды» были присоединены к ней, каждый на своем месте. Для этого они были предварительно закреплены монтажным клеем, а затем прочно соединены со «звездой» в результате 1-проходовой лазерной наплавки. Эта операция осуществлялась на той же самой лазерной установке при задании ее следующих рабочих параметров: диаметр лазерного пучка в зоне сварки — 1,5 мм, выходная мощность лазера — 70 Вт, скорость перемещения пучка — 1500 мм/с.

В результате была осуществлена реконструкция утраченных «кончиков» звезды (ил. 4 а, б).



а)



б)

Ил. 4.

Один из «напечатанных» кончиков «звезды» до (а) и после (б) фиксации на месте утраты оригинальной части. Фото автора

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали принципиальную возможность восстановления поврежденных памятников из металла при помощи технологии лазерной порошковой наплавки. Последняя в данной работе была использована для реконструкции исторического памятника из чугуна. Однако сам по себе материал не имеет принципиального значения, поскольку в настоящее время на рынке представлена широкая гамма металлических порошков (из нержавеющей стали, меди, титана и др.).

У автора нет сомнений, что описанный здесь подход имеет хорошие перспективы для внедрения в практику реставрационных работ. Однако то, насколько быстро и широко он может найти свое применение, — вопрос дискуссионный, и ответить на него сложно. Это связано с тем, что в настоящее время и лазеры, и материалы для лазерной порошковой наплавки имеют очень высокую стоимость, но очевидно, что постепенно цены будут снижаться. В любом случае уже сегодня можно с уверенностью говорить, что технология лазерной порошковой наплавки уже в самое ближайшее время может быть востребована при проведении реставрационных работ на объектах, имеющих особую историческую ценность.

В заключение автор выражает благодарность всем коллегам, принимавшим участие в этих работах, в том числе С. Д. Игошину, Д. С. Кулешову и В. О. Тишкину. Благодарю также П. Н. Котельникова за полезные обсуждения полученных результатов.

Список литературы

1. Григорьянц А. Г. и др. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров, Р. С. Третьяков; под ред. А. Г. Григорьянца. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 278 с. — URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/364488/reading> (дата обращения: 14.02.2026).

2. Игнатьев П. П. и др. Реконструкция скульптуры «Ева у источника» из усадьбы «Сергиевка» с помощью лазерного 3D-сканирования, компьютерного моделирования и аддитивных технологий / П. П. Игнатьев, Д. В. Осипов, В. А. Парфенов, В. О. Тишкин // Общество. Среда. Развитие. 2017. №2. С. 69–74.

3. Парфенов В. А. Лазерная очистка памятников истории и культуры. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. — 160 с.

4. Cooper M. Laser Cleaning in Conservation: An Introduction. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. — 120 с.

5. Fotakis C. et al. Lasers in the Preservation of Cultural Heritage. Principles and Applications / C. Fotakis, D. Anglos, V. Zafiropoulos, S. Georgiou, V. Tornari. Boca Rayton: CRC Press; Taylor & Francis Group, 2007. — 336 p.

6. Galushkin A. et al. Application of 3D Scanning for Documentation and Creation of Physical Copies of Estampages / A. Galushkin, S. Gonobobleva, V. Parfenov, A. Zhuravlev // Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material. 2019. — DOI: 10.1515/res-2018-0010.

1. Grigor'yancz A. G. i dr. Lazerny'e additivny'e texnologii v mashinostroenii: ucheb. posobie / A. G. Grigor'yancz, I. N. Shiganov, A. I. Misyurov, R. S. Tret'yakov; pod red. A. G. Grigor'yancza. M.: MGTU im. N. E. Bauman, 2018. — 278 s. — URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/364488/reading> (data obrashheniya: 14.02.2026).

2. Ignat'ev P. P. i dr. Rekonstrukciya skul'ptury` «Eva u istochnika» iz usad'by` «Sergievka» s pomoshh'yu lazernogo 3D-skanirovaniya, komp'yuternogo modelirovaniya i additivny`x texnologij / P. P. Ignat'ev, D. V. Osipov, V. A. Parfenov, V. O. Tishkin // Obshchestvo. Sreda. Razvitie. 2017. №2. S. 69–74.

3. Parfenov V. A. Lazernaya ochistka pamyatnikov istorii i kul'tury`. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LE`TI», 2015. — 160 s.

Сведения об авторе

Парфенов Вадим Александрович — доктор технических наук, доцент;
Санкт-Петербургский Институт истории РАН, ведущий научный сотрудник
Россия, 197110, Санкт-Петербург, Петрозаводская ул., д. 7;
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» имени В. И Ульянова (Ленина), профессор
Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5;
Балтийский федеральный университет имени Имманиуила Канта, профессор
236016, Россия, Калининград, ул. А. Невского, д. 14
E-mail: vadim_parfenov@mail.ru

Parfenov Vadim A. — Doctor of Technical Sciences, associate professor; Saint-
Peterburg Institute of History of Russian Academy of Sciences, leading research
fellow
Russia, 197110, Saint-Petersburg, Petrozavodskaya St., 7;
Saint Petersburg Electrotechnical University, professor
Russia, 197376, Professora Popova St., 5;
Immanuel Kant Baltic Federal University, professor
14A, A. Nevskogo St., Kaliningrad, 236016, Russia
E-mail: vadim_parfenov@mail.ru

В. В. Плахов, Р. С. Каракуркчи, Е. А. Хасиева

ЦВЕТ, РОЖДЕННЫЙ ТОКОМ: АНОДИРОВАНИЕ ТИТАНА КАК ИСКУССТВО И ТЕХНОЛОГИЯ

Статья посвящена технологии анодирования титана — методу, который превращает этот суперсовременный конструкционный материал в палитру для художника. Особое внимание уделяется физико-химическим основам интерференционного окрашивания, возникающего благодаря наращиванию слоя диоксида титана различной толщины, что достигается путем регулирования напряжения. Исследуются практические аспекты применения, включая ограниченность цветовой палитры (невозможность получения черного, красного и темно-оранжевого цветов), сложности с равномерностью окраски на рельефных поверхностях и влияние различных сплавов титана на конечный оттенок. Технология анодирования титана, будучи тонким процессом, открывает двери для создания не просто функциональных, но и визуально привлекательных изделий. Интерференционная окраска, не подверженная механическому истиранию и выцветанию под воздействием ультрафиолета, обладает завидной долговечностью, что делает ее идеальным выбором для изделий, требующих как прочности, так и эстетической новизны. Важнейшими выводами являются следующие: анодирование титана позволяет создавать уникальные, долговечные цветовые эффекты, но требует точного контроля процесса и мастерства для достижения художественных целей; технология успешно синтезируется с традиционными техниками обработки металла, расширяя возможности современного художника по металлу. Подчеркивается, что анодирование титана утвердилось как материал XXI века для инженеров и художников, благодаря прочности, долговечности и эстетической привлекательности.

Ключевые слова: анодирование титана, интерференционная окраска, оксидная пленка, электрохимическое окисление, тимаскус, обронная, резцовая гравировка, инкрустация, международная ювелирная школа, нож «Готика».

V. V. Plakhov, R. S. Karakurkchi, E. A. Khasieva

COLOR BORN OF AMPERAGE: ANODIZING TITANIUM AS ART AND TECHNOLOGY

The article is devoted to the technology of anodizing titanium — a method that turns this super-modern structural material into a palette for an artist. Special attention is paid to the physical and chemical basis of interference coloring, which occurs due to the growth of a layer of titanium dioxide of different thickness, which is achieved by regulating the voltage. The practical aspects of the application are being investigated, including the limited color palette (the inability to obtain black, red, and dark orange colors), difficulties with uniform coloring on embossed surfaces, and the impact of different titanium alloys on the final color. Titanium anodization technology, being a delicate process, opens the door to creating not only functional but also visually appealing products. Interference coloring, which is resistant to mechanical abrasion and UV fading, offers exceptional durability, making it an ideal choice for products that require both durability and aesthetic novelty. The most important conclusions are as follows: anodizing titanium allows the creation of unique, long-lasting color effects, but requires precise process control and skill to achieve artistic goals. The technology is successfully synthesized with traditional metalworking techniques, expanding the possibilities of the modern metal artist. It is concluded that titanium anodization has established itself as a 21st-century material for engineers and artists, due to its strength, durability, and aesthetic appeal.

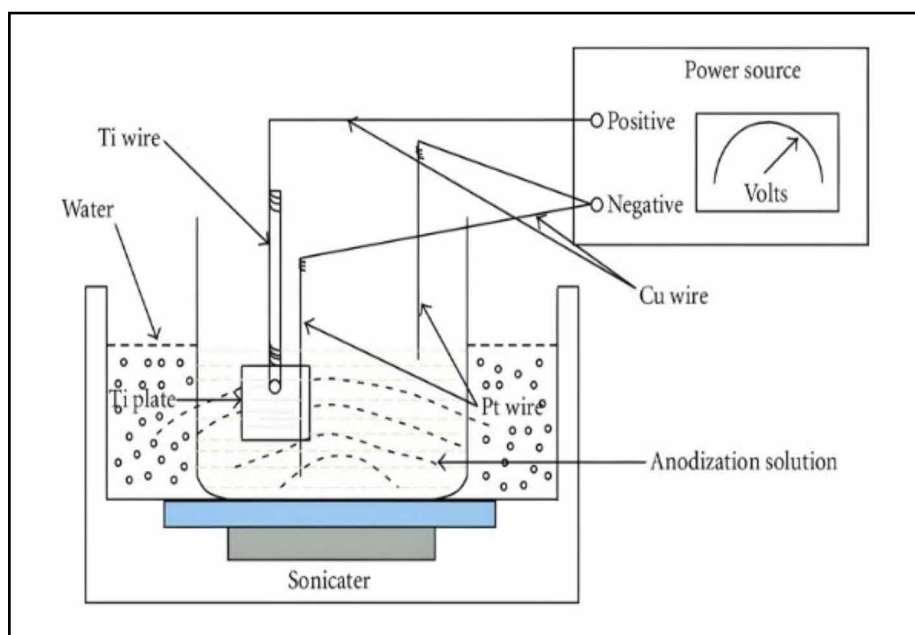
Keywords: titanium anodization, interference coloring, oxide film, electrochemical oxidation, timascus, obron, incision engraving, inlay, international jewellery school, knife «Gothic».

Введение: металл, бросивший вызов художнику

Титан давно перестал быть достоянием лишь аэрокосмической отрасли и медицины. Его легендарная прочность, легкость и почти абсолютная коррозионная стойкость, обусловленная тончайшей природной оксидной пленкой, привлекли и создателей предметов искусства. Однако эта же инертность стала вызовом: как приручить металл, не желающий взаимодействовать с миром? Как нанести на него цвет, который не сотрется? Ответ был найден не в области пигментов, а на стыке электрохимии и оптики. Технология анодирования не просто окрасила титан — она открыла новое измерение в его художественной обработке, где цвет управляется напряжением, а долговечность измеряется десятилетиями.

Глава 1. Наука цвета: от вольты к нанометру

В основе художественного анодирования титана лежит строгий физический закон. В процессе электрохимического окисления, когда изделие (анод) погружено в электролит, на его поверхности нарастает слой диоксида титана (TiO_2). Ключевое отличие от всех прочих методов окраски — цвет здесь не вводится извне, а рождается на границе сред (ил. 1).



Ил. 1.

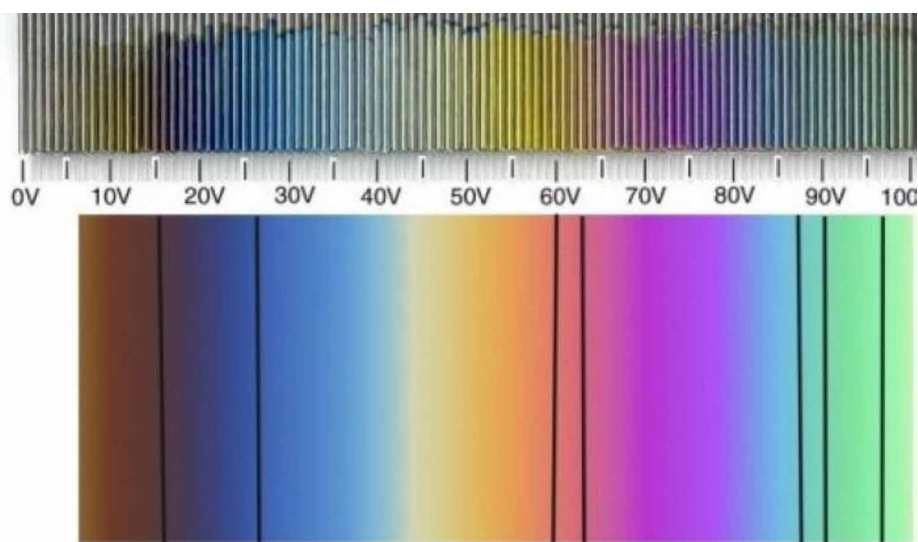
Процесс анодирования титана.

URL: <https://at-machining.com/>

(дата обращения: 24.02.2026)

Это явление — интерференция света. Падающий луч частично отражается от внешней поверхности оксидной пленки, а частично проходит сквозь нее и отражается уже от границы между пленкой и металлом. Два отраженных луча, встречаясь, усиливают или гасят друг друга в зависимости от разности своего хода. Эта разность, а значит, и итоговый видимый цвет, определяется одной величиной — толщиной оксидного слоя.

Мастер, таким образом, работает как дирижер света, меняя толщину «оптического слоя» с точностью до нанометра, регулируя напряжение источника тока (табл. 1). Низкое напряжение [2] (10–15 В) дает теплые, земляные тона — коричневый, бронзовый. Средние значения (40–60 В) открывают спектр от золотистого и фиолетового до насыщенного синего. Максимальные напряжения (80–90 В) ведут к появлению бирюзового и зеленого. Эта радужная, переливчатая палитра, напоминающая отблески нефти на воде или перламутр, принципиально недостижима с помощью красителей (ил. 2).



Ил. 2.
Таблица цветов анодированного титана в зависимости от толщины оксидного слоя. — URL: <https://www.hlc-metalparts.com/> (дата обращения: 24.02.2026)

Таблица 1. Зависимость цвета анодированного титана от толщины оксидного слоя (напряжения)

Толщина	Цвет
Примерно 100 нанометров	Темно-синий
Примерно 900–950 нанометров	Бронза
Примерно 800–850 нанометров	Зелёная
Примерно 700–750 нанометров	Темно-синий
Примерно 600–650 нанометров	Пурпурный
Примерно 500–550 нанометров	Бирюзовый
Примерно 400–450 нанометров	Светло-синий
Примерно 300–350 нанометров	Желтое золото

Ниже (табл. 2) приведены примерные показатели напряжения и цветовая схема. Точные оттенки могут варьироваться в зависимости от сплава, подготовки поверхности и освещения.

Таблица 2. Цвета оксидных пленок на основе таблицы анодирования (10–100 В с шагом 2,5 В)

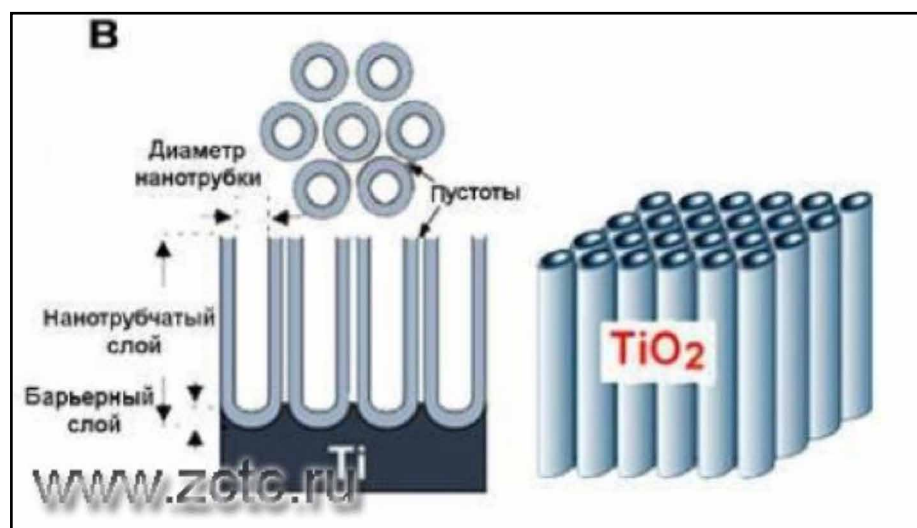
Напряжение (постоянный ток)	Типичный оттенок	Примечания
10–15 В	Бронзовый → Коричневый	Самые ранние оттенки анодирования, теплые металлические тона.
17,5–27,5 В	Темно-фиолетовый → Светло-голубой	Плавный градиент от фиолетового к более светлым синим оттенкам.
30–47,5 В	Слабо-синий → Серебристый	Переходный, более приглушенный оттенок на матовых поверхностях.
50–60 В	Жёлтый/Золотой → Розовое золото	Яркие металлические желтые оттенки, переходящие в розовые тона.
62,5 В	Розовый	Нежный, пастельно-розовый оттенок (чувствительный к углу обзора).

Напряжение (постоянный ток)	Типичный оттенок	Примечания
65–75 В	Фиолетовые тона	Более насыщенные фиолетовые оттенки вновь появляются при более высоком напряжении.
77,5–85 В	Синий и бирюзовый	Яркие, как океан, цвета, очень насыщенные.
87,5–100 В	Зеленый → Желто-зеленый	Верхний диапазон; зеленый цвет переходит в салатные тона.

Напоминание: красный цвет недостижим при анодировании титана. Физические законы интерференции тонких пленок просто этого не позволяют [1].

Глава 2. Практика мастерской Международной ювелирной школы: контроль и непредсказуемость

Технологический процесс, схематично изображенный на рисунках (ил.3; 4.1, 4.2, 4.3, 4.4), обманчиво прост: нужны источник постоянного тока, электролит и две клеммы. Однако за этой простотой скрывается мир тонких нюансов, определяющих успех.



Ил. 3.

Идеальная схема анодно-оксидного покрытия на титане. — URL: <https://zctc.ru/sections/anodirovanie-titana> (дата обращения: 24.02.2026)

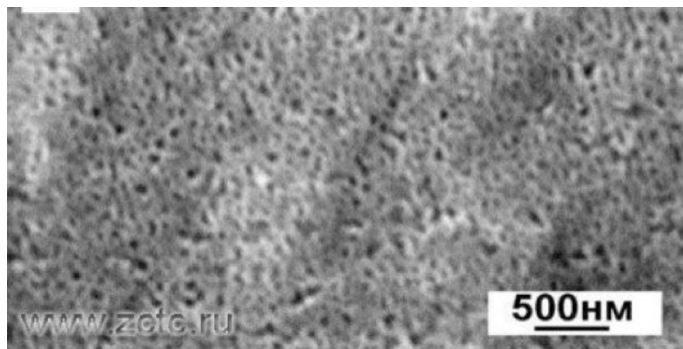
Структура покрытия. Идеальное анодное покрытие имеет упорядоченную нанопористую структуру (ил. 3). Однако ее морфология — размер и форма пор — кардинально меняется в зависимости от состава электролита [4] (серная, фосфорная кислоты с добавками фторидов, органические электролиты), температуры, времени и режима обработки. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) демонстрирует это поразительное разнообразие: от неструктурированных слоев до вертикально выстроенных нанотрубок [3] (ил.4.1, 4.2, 4.3, 4.4).

Художественные вызовы. Именно здесь технология проверяется искусством. Мастер сталкивается с рядом специфических проблем:

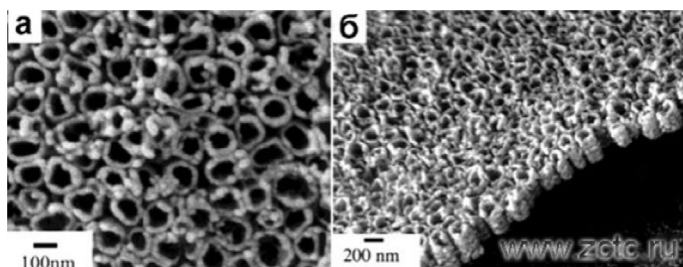
1. Ограниченность палитры: анодированием невозможно получить чистые черный, красный и темно-оранжевый цвета. Это заставляет искать гибридные решения, комбинируя анодирование с другими методами (соединение титановых сплавов для получения «тимаскус», напыление);

2. Неравномерность: на сложном рельефе, характерном для художественных изделий, плотность тока распределяется неравномерно, что приводит к разнотонности. Требуется виртуозное владение маской, положением электродов и последовательностью обработки;

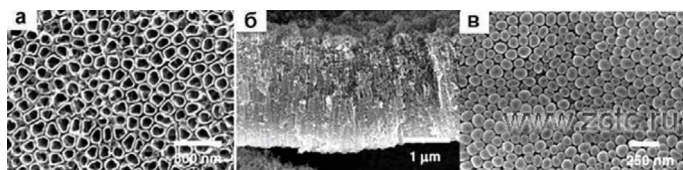
3. Влияние материала: разные марки и сплавы титана (коммерчески чистый BT1-0, сплав Grade 5/BT6) имеют разную микроструктуру и легирующие добавки, что напрямую влияет на конечный оттенок при одинаковых настройках.



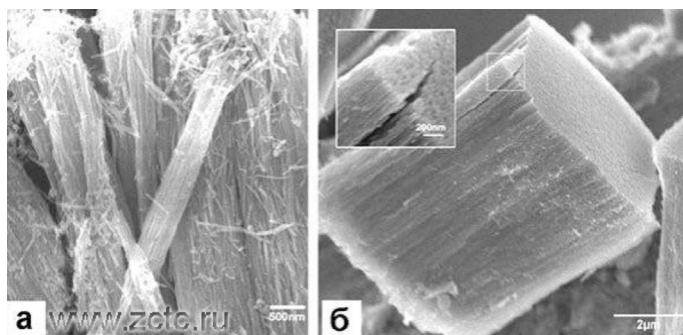
1)



2)



3)



4)

Ил. 4.

СЭМ-изображения. Разнообразие структур анодных оксидов титана, полученных в разных условиях. Автор — К. К. Фазлутдинов, НПП Электрохимия. Екатеринбург, 2022 г.

4.1. — Поверхность анодных неструктурированных анодных оксидов на титане, сформированных анодированием в 10% $\text{H}_2\text{SO}_4 + 0.15\% \text{HF}$, $U_a = 20\text{В}$, $t_a = 20$ мин.

4.2. — Поверхность трубчатого слоя (а) и поперечного сечения (б) НТАОТ, сформированных в водном растворе 0.5% HF при 20В в течение 20 мин.

4.3. — Поверхность пористого или трубчатого (а) и барьерного (в) слоев и поперечного сечения (б) НТАОТ, сформированная в водном растворе 1М $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 0.5\% \text{NH}_4$

4.4. — Поверхность и поперечное сечение НТАОТ, сформированные в хлорсодержащих электролитах: (а) 0.5М муравьиная кислота + 0.4М NH_4Cl ; (б) 0.5М глюконовая кислота + 0.4М NH_4Cl

Глава 3. Анодирование в контексте современного искусства: синтез и контраст

В арсенале современного художника по металлу анодирование титана — не замена, а мощное дополнение к традиционным техникам. Его рациональная, «цифровая» эстетика вступает в плодотворный диалог с вековыми ремеслами.

С гравировкой (обронной, резцовой) анодирование позволяет тонировать фон, оставляя металл в углублениях нетронутым, или наоборот, создавая цветовой контраст рельефа.

С инкрустацией и всечкой холодная, футуристическая радужность титана служит идеальным современным фоном для теплого сияния золота, платины и бриллиантов, подчеркивая их ценность через контраст.

С авторскими сталями цветная титановая фурнитура или рукоять создают сложный визуальный диалог с узором дамасской или булатной стали клинка.

Ярким воплощением этого синтеза служат работы художников — оружейника Владимира Плахова (нож «Готика», 2025 г.) и Романа Каракуртки (броши, 2024 г.). В ноже «Готика» анодированная рукоять из титана, играющая градиентами синего и фиолетового, сочетается с фактурой дамасского клинка, инкрустацией бриллиантами и золотом, а также элементами, обработанными открытым огнем (ил. 5). Броши соединяют новаторские и традиционные ювелирные решения в выборе материалов и способов обработки. Это наглядный манифест возможностей технологии в руках вдумчивого мастера (ил. 6 а, б, с).



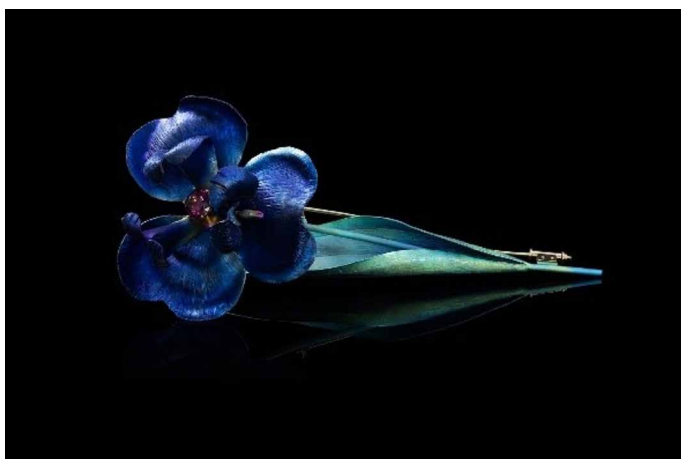
Ил. 5.

Пример синтеза технологий: нож «Готика». Автор — В. Плахов, 2025 г. Материал: рукоять выполнена из титана, клинок — из авторской дамасской стали; вставки: бриллиант, 2 шт., 2,45 мм, золото 999 пробы. Художественные техники: инкрустация, всечка, элементы обронной гравировки. Обработка поверхности титана: анодирование, открытый огонь в части рукояти с тимаскусом. Съемка В. А. Степаненко. Публикуется впервые

Заключение

Анодирование титана имеет преимущества, заключающиеся в повышении коррозионной стойкости, долговечности, износостойкости и твердости поверхности. Оно также обеспечивает привлекательные цвета. Титан биосовместим и может использоваться во многих сферах. С другой стороны, это сложный процесс: твердый материал может отколоть оксидный слой. Добиться равномерной толщины оксидного слоя и глубины окраски сложно.

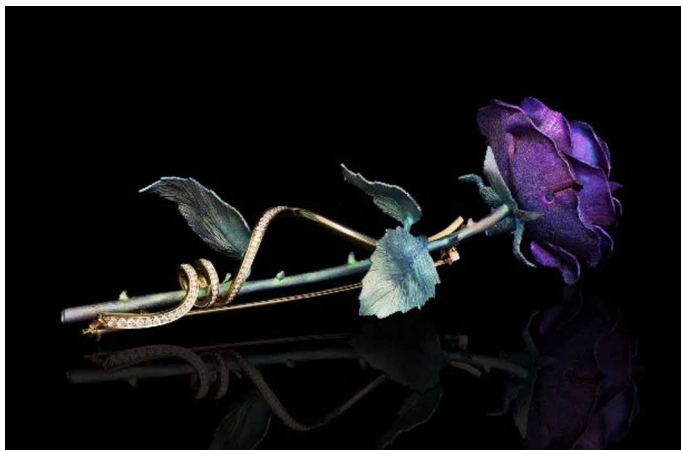
Перспективы развития лежат в еще более тонком контроле над наноструктурой, разработке новых электролитов для расширения палитры и создании предсказуемых методик для сложных сплавов. Очевидно, что титан, благодаря анодированию, окончательно утвердился в статусе материала XXI века — как для инженеров, так и для художников, открывая путь к созданию произведений, чья красота будет столь же долговечна, сколь и сам этот удивительный металл.



a)



b)



c)

Ил. 6.

Пример цветового решения: броши из титана. Автор — Р. Каракуртки, 2024 г. Материал: титан, золото, бриллианты, турмалин («Ирис»). Художественные техники: гибка холодная и горячая, выколотка, техники закрепки камня. Дизайн изделий выполнен в стиле «Бионика». Обработка титана: анодирование. Публикуется впервые.

6 а. — Ирис

6 б. — Сакура

6 с. — Роза

Список литературы

1. Диаманти М. В. и др. Стойкое анодное окрашивание титана: влияние электролита и стойкость цвета // *Electrochimica*. 2005. Т. 50. Вып. 18. С. 3679–3684.

2. Мошников В. А. и др. Электрические свойства и механизмы переноса заряда в наноразмерных анодных пленках TiO_2 при низких приложенных напряжениях / В. А. Мошников, Е. Н. Муратова, И. Врублевский, А. И. Максимов // *Inorganics* 2026. №14. (1):29.

3. Фрумин Г. Т., Сурков А. А. Электрохимическое формирование наноструктурированных оксидных покрытий на титане. СПб.: Химиздат, 2019. — 224 с.

4. Roy P., Berger S., Schmuki P. TiO_2 Nanotubes: Synthesis and Applications // *Angewandte Chemie International Edition*. 2011. Vol. 50. №13. P. 2904–2939.

1. Diamanti M. V. i dr. Stojkoe anodnoe okrashivanie titana: vliyanie e'lektrolita i stojkost' czveta // *Electrochimica*. 2005. T. 50. Vy'p. 18. S. 3679–3684.

2. Moshnikov V. A. i dr. E'lektricheskie svojstva i mexanizmy' perenosa zaryada v Nanorazmerny'x anodny'x plenках TiO_2 pri nizkix prilozhenny'x napryazheniyax / V. A. Moshnikov, E. N. Muratova, I. Vrublevskij, A. I. Maksimov // *Inorganics* 2026. №14. (1):29.

3. Frumin G. T., Surkov A. A. E'lektroximicheskoe formirovanie nanostrukturirovanny'x oksidny'x pokry'tij na titane. SPb.: Ximizdat, 2019. — 224 s.

Сведения об авторах

Плахов Владимир Валерьевич — гравер, член Гильдии оружейников России, призер конкурса ГОХРАН 2024 г.; Международная ювелирная школа, преподаватель

Россия, 190020, Санкт-Петербург, Бумажная ул., 17А

E-mail: shtixel.spb@gmail.com

Каракуркчи Роман Сергеевич — Международная ювелирная школа, директор, преподаватель курсов по техникам закрепки камней

Россия, 190020, Санкт-Петербург, Бумажная ул., 17А

E-mail: kr@jewelleryschool.com

Хасиева Елена Ахсаровна — Международная ювелирная школа, руководитель проектов

Россия, 190020, Санкт-Петербург, Бумажная ул., 17А

E-mail: top@jewelleryschool.com

Plakhov Vladimir V. — metal artist, engraver, member of the Russian Guild of Weaponry Masters; the International Jewellery School, teacher

17A, Bumazhnaya St., Saint Petersburg, 190020, Russia

E-mail: shtixel.spb@gmail.com

Karakurkchi Roman S. — the International Jewellery School; Director, Teacher of Stone Setting Techniques

17A, Bumazhnaya St., Saint Petersburg, 190020, Russia

E-mail: kr@jewelleryschool.com

Khasieva Elena A. — the International Jewellery School, Project Manager

17A, Bumazhnaya St., Saint Petersburg, 190020, Russia

E-mail: top@jewelleryschool.com

Научное издание

**Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение.
Art Heritage. Research. Storage. Conservation.**

Свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ № ФС77-82901

от 14.03.2022 г.

ISSN 2782-5027

Подписано в печать 30.06.2026 г.

Федеральное государственное бюджетное
научно-исследовательское учреждение
«Государственный научно-исследовательский институт реставрации»
107014, г. Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
e-mail: journal@gosniir.ru
Сайт: <http://www.journal-gosniir.ru/>