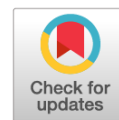


Оригинальное исследование

УДК 621.9.048.7: 621.375.826: 621.373.8

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_291

EDN: JAFYZG



О влиянии параметров импульсов на интенсивность удаления органических слоев с углеродистой стали и других материалов при пиролизной очистке с использованием наносекундных технологических лазеров

О.Г. Девойно, Д.А. Шпакевич, А.В. Горбунов, А.С. Лапковский, Л.И. Пилецкая, А.Ю. Рудницкий

Научно-исследовательский политехнический институт — филиал Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Статья посвящена исследованию в области технологий импульсной лазерной очистки (ЛО), актуальной для современных металлообрабатывающих производств.

Цель работы — получить новые данные для описания (на полуколичественном уровне) связи между выходными параметрами ЛО и набором регулируемых режимных параметров этих процессов, с использованием методов экспериментального исследования по удалению слоев органических материалов с металлических образцов с применением импульсного лазера мощностью до 200 Вт и параметрического анализа его результатов, а также аналогичных экспериментальных данных, полученных ранее в сходных исследованиях с лазерами с наносекундными импульсами.

Материалы и методы. Проведена серия опытов по ЛО стальных образцов от пленок краски и слоя резиносодержащих загрязнений (образующихся в шинном производстве), с варьированием параметров лазеров и определением производительности ЛО, энергозатрат и некоторых характеристик, влияющих на разрушение органического слоя.

Результаты. Анализ результатов в сочетании с данными аналогичных работ по ЛО показал сложный многофакторный характер связи входных режимных параметров с выходными, а также то, что одними из наиболее явно (и прямо пропорционально) влияющих на интенсивность очистки металлов параметров являются длительность импульса t_p и коэффициент заполнения DC . В оптимальных режимах энергозатраты на ЛО близки к 13 МДж/(дм³ слоя) в варианте с ЛО эластомерсодержащего слоя. Поверхность образцов из Ст3 при такой ЛО не подвергается заметной эрозии и ее микротвердость находится на уровне ≤ 180 HV, что близко к этому показателю для исходной стали.

Заключение. В дальнейших НИОКР целесообразным будет выбирать параметры для реализации процессов ЛО с учетом механизма удаления слоя, которое, по предварительной оценке, в режимах с невысокими энергозатратами идет с сочетанием энергоемкой термообработки (пиролиза) и механизма отслоения покрытия за счет роста термоупругих напряжений в нем.

Ключевые слова: очистка поверхности металла; удаление органических слоев; наносекундные лазеры; пиролиз; краска; длительность импульсов; коэффициент заполнения; энергозатраты.

Как цитировать

Девойно О.Г., Шпакевич Д.А., Горбунов А.В., Лапковский А.С., Пилецкая Л.И., Рудницкий А.Ю. О влиянии параметров импульсов на интенсивность удаления органических слоев с углеродистой стали и других материалов при пиролизной очистке с использованием наносекундных технологических лазеров // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 291–301. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_291 EDN: JAFYZG

Original Study Article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_291

EDN: JAFYZG

The Effect of Pulse Parameters on Intensity of Removal of Organic Layers From Carbon Steel and Other Materials During Pyrolysis Using Nanosecond Industrial Lasers

Oleg G. Devoino, Dmitry A. Shpakevich, Andrei V. Gorbunov, Alexander S. Lapkovsky, Lyudmila I. Piletskaya, Andrei Yu. Roudnitsky

Research Polytechnic Institute — Branch of Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

BACKGROUND: The article investigates pulsed laser cleaning (LC) technologies relevant for contemporary metalworking industries.

AIM: To obtain new data for describing (at a semi-quantitative level) the relationship between LC output parameters and a set of adjustable operating parameters of these processes by experimental research of removing organic layers from metal samples using an up to 200 W pulsed laser, parametric analysis, and similar experimental data obtained earlier in similar studies with nanosecond lasers.

METHODS: A series of experiments on LC of steel samples from paint films and a layer of rubber-containing contaminants (generated in tire production) was carried out with varying laser parameters and determining the LC performance, energy consumption, and some parameters affecting the destruction of the organic layer.

RESULTS: An analysis of the results in combination with data from similar LC operations showed the complex multifactorial relationship between the input and the output operating parameters. In addition, it demonstrated that one of the most clearly (and directly proportional) parameters affecting the intensity of metal cleaning are the pulse duration t_p and the duty cycle DC . In optimal conditions, the LC energy consumption is close to 13 MJ/(dm³ layer) in the LC option of elastomer-containing layer. In this LC option, the surface of St3 samples does not have noticeable erosion and its microhardness is approximately ≤ 180 HV, which is close to this parameter of the initial steel.

CONCLUSION: In further R&D, it will be advisable to select LC parameters based on the layer removal mechanism, which, according to preliminary estimates, in low energy consumption conditions comes with combination of energy-intensive thermal ablation (pyrolysis) and the coating exfoliation due to higher thermoelastic stresses in it.

Keywords: metal surface cleaning; removal of organic layers; nanosecond lasers; pyrolysis; paint; pulse duration; duty cycle; energy consumption.

To cite this article

Devoino OG, Shpakevich DA, Gorbunov AV, Lapkovsky AS, Piletskaya LI, Roudnitsky AYu. The Effect of Pulse Parameters on Intensity of Removal of Organic Layers From Carbon Steel and Other Materials During Pyrolysis Using Nanosecond Industrial Lasers. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):291–301. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_291 EDN: JAFYZG

ВВЕДЕНИЕ

Как показано во многих работах, ЛО (лазерная очистка, т. е. удаление) органических слоев и покрытий — это сложный быстропротекающий процесс, ход которого определяется физическими параметрами многофазной среды, возникающей в зоне лазерного воздействия (характеризующейся энергетическим вкладом до 1–3 МДж/м² и выше), и может изменяться за счет управления входными режимными параметрами ЛО. Для ЛО часто применяются импульсные лазеры с диапазоном длительности импульса (t_p) от миллисекунд до наносекунд [1–12]. При этом удаление органических слоев может идти двумя основными способами: (а) прямое удаление материала с поверхности, если длина волны лазера достаточно хорошо поглощается материалом слоя/покрытия, или (б) не прямое удаление, когда лазерное излучение (ЛИ) поглощается металлической подложкой на границе раздела покрытие/металл [1], где нагрев вызывает термоупругие напряжения или другие эффекты, приводящие к отслаиванию и диспергированию материала покрытия. В ряде исследований по ЛО признается, что ключевой момент для эффективного процесса — это выбор оптимальных входных параметров. В частности, в работах [1, 3–5, 12–15] показано, что режимные параметры ЛО, в т. ч. t_p (варьировалась в диапазоне 1–2000 нс), частота импульсов ЛИ f (варьировалась от 10 Гц до 30 МГц), их энергия E_p (в диапазоне от 10⁻³ до 100 мДж), лазерный флюенс F и некоторые другие могут существенно влиять на уровень выходных параметров обработки. При эффективном лазерном процессе по теоретическим и экспериментальным данным возможно повышение эффективности удаления слоя за счет снижения энергозатрат на единицу его площади поверхности (S) и единицу объема. В целом, следует отметить, что опубликованные данные в области ЛО органических слоев, в т. ч. лакокрасочных покрытий (ЛКП) с применением импульсных наносекундных лазеров (высокоперспективных для промышленных целей, как наиболее используемых пока в технологиях очистки поверхностей сталей и сплавов) [1–13, 15] носят несколько противоречивый характер и не содержат достаточного объема детальных данных по влиянию входных технологических параметров лазерной системы на такие важные выходные параметры

процессов ЛО, как удельная производительность по очищаемой площади и энергозатраты на ЛО.

В связи с этим нами была поставлена, а также некоторыми физическими характеристиками процесса, — на примере ЛО стальных образцов с полимерсодержащими слоями на них.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения эксперимента использовался аппарат лазерной очистки HS-LC200 (КНР) с параметрами: средняя выходная мощность — 205 Вт, длина волны лазера $\lambda = 1,070$ мкм, максимальная энергия импульса ЛИ — 5,0 мДж, диапазон регулирования частоты f — 1–3000 кГц, диапазон регулирования длительности импульса t_p — 13–500 нс. Форма импульса излучения в различных режимах работы лазера приведена на рис. 1.

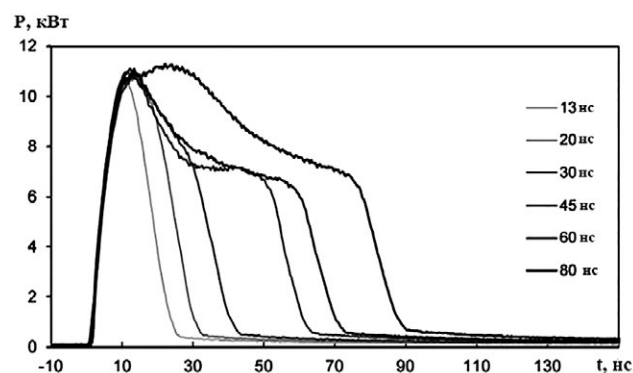


Рис. 1. Форма импульса лазерного излучения (т. е. изменение выходной мощности (приведена в кВт) во времени (оно обозначено в наносекундах)) при различной его длительности (для шести вариантов в интервале t_p от 13 до 80 нс) для использованной нами системы импульсной лазерной очистки HS-LC200 (КНР) со средней по времени тепловой мощностью излучения $N \geq 200$ Вт и с длительностью импульса $t_p \leq 500$ нс. Зависимости для формы импульса приведены по данным фирмы-производителя лазерной системы.

Fig. 1. Laser pulse waveform (i.e. the change in output power [kW] over time [nanoseconds]) with different durations (for six variants in the range t_p from 13 to 80 ns) for the HS-LC200 pulse laser cleaning system (China); time-average thermal radiation power $N \geq 200$ W, pulse duration $t_p \leq 500$ ns. Dependencies for the pulse waveform are taken from the laser system's manufacturer data.

Таблица 1. Выражения для некоторых входных режимных параметров импульсной лазерной очистки

Table 1. Expressions for some input processing parameters of pulsed laser cleaning

Обозначение	Величина	Единицы измерения	Базовое выражение
t_p	Длительность импульса ЛИ	с	$t_p = DC/f$
f	Частота импульсов ЛИ	Гц	$f = DC/t_p$
DC	Коэффициент заполнения (обратная скважность)	безразмерный	$DC = f \cdot t_p$
N	Мощность	Вт	$N_{peak} = E_p / t_p$; $N_{avg} = N_{peak} \cdot DC = E_p \cdot f$
E_p	Энергия единичного импульса	Дж	$E_p = N_{peak} \cdot t_p = N_{avg} / f$
P	Удельная мощность на единицу очищаемой поверхности	Вт/см ²	$P = N/S$; $P_{peak} = F/t_p$; $P_{avg} = P_{peak} \cdot DC = F \cdot f$

На рис. 2 показан пример вида очищаемой поверхности в ходе экспериментальной серии по ЛО от органических слоев. В табл. 1 нами приведены выражения для определения некоторых важных режимных параметров, задаваемых как входные в экспериментах с использованием импульсных лазеров [13].

Интенсивность газификации (испарения) органического слоя (например, ЛКП) с металлической подложки при лазерной абляции (в $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) приближенно можно найти с помощью уравнения Герца–Кнудсена (в известной форме [8, 16]) — как скорость адсорбции/десорбции на границе пар/поверхность, что является функцией давления насыщенных паров p_{sat} у плоской поверхности (с температурой T) и других параметров пара и конденсированной фазы (в т.ч. ее коэффициента испарения–конденсации):

$$G_V \approx 0,82 \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} p_{sat}(T), \quad (1)$$

где $p_{sat}(T) = P_0 \exp \left[\frac{m \Delta H_v}{k_B} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T} \right) \right]$, P_0 — стандартное атмосферное давление, m — масса молекулы испаряющегося вещества (в случае ЛО смеси CO , H_2 , CH_4 , H_2O), k_B — постоянная Больцмана, ΔH_v — энтальпия и T_v — температура испарения, соответственно.

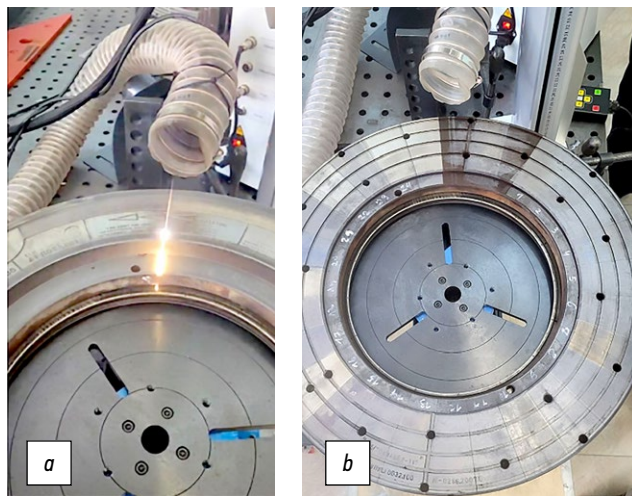


Рис. 2. Фотографии поверхности со слоем остаточных органических продуктов от нагрева эластомерного материала на вулканизационной форме из стали 40X с диаметром 556 мм (применяемой в шинном производстве на ОАО «Белшина») в ходе проведения нами лазерной очистки и после нее: *a* — вид изделия в ходе эксперимента по лазерной очистке; *b* — очищенная после лазерной очистки поверхность, в верхней части снимка из изделия оставлен неочищенный от исходных органических веществ конусный сектор (он виден по резкой границе серой окраски).

Fig. 2. Photos of a surface with a residual organic layer produced by heating the elastomer on a 40X steel mould with a diameter of 556 mm (used in tire production at Belshina JSC) during and after laser cleaning: *a*, view of the product during the laser cleaning experiment; *b*, clean surface after laser cleaning. The top view shows a conical sector of the product with the original organic substance (visible as the sharp gray boundary).

К числу пригодных для оценки производительности и интенсивности процессов ЛО от органических слоев или пленок относится и такой параметр, как приближенная скорость удаления органической пленки с металла при импульсной ЛО G_{ts} (в $\text{м}^3/\text{с}$) [7] (в режиме с преобладанием динамического механизма очистки (генерация термоупругих напряжений для разрушения слоя (без его испарения) или отслоения его от основы)):

$$G_{ts} = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \left(\frac{\alpha \cdot E_p}{\rho \cdot c_p \cdot \delta} \right). \quad (2)$$

В выражении (2) использованы физические свойства удаляемого слоя: E (в Па) — модуль упругости (модуль Юнга), α (в К^{-1}) — коэффициент линейного термического расширения, и ρ и c_p — плотность слоя и его удельная теплоемкость, соответственно. Также в выражении (2) учтены параметры режима лазерной обработки, в т.ч. энергия импульса ЛИ (ϵ) в Дж и исходная толщина удаляемого органического слоя (δ) в метрах.

Амплитуда давления (в Па) фронта квазисферической ударной волны (УВ) в лазерной плазме в процессе ЛО может быть оценена, например, по варианту из [17]):

$$P \approx \Delta P = \frac{8}{25} \left(\frac{1}{\gamma + 1} \right) \left(\frac{E_p}{R_s^3} \right) Y^4, \quad (3)$$

где γ — показатель адиабаты газа в зоне УВ (воздуха в нашем случае, $\gamma = c_p/c_v = 1,40$ (при 293 К и 0,101 МПа)), $Y = f(\gamma) = 1,03$ по данным [17]. Использовано также выражение [17] для определения радиуса УВ (в метрах), индуцируемой импульсом ЛИ:

$$R_s = t_p^{2/5} \cdot \left(\frac{E_p}{\rho_1} \right)^{1/5} \cdot Y(\gamma), \quad (4)$$

где t_p , E_p — длительность и энергия импульса, ρ_1 — плотность газа (нагретого в УВ) [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нами была выполнена серия опытов в режимах лазерного удаления со стальных образцов пленки ЛКП (алкидного типа) и слоя резиносодержащих загрязнений (образующихся на технологической оснастке в шинном производстве ОАО «Белшина», Бобруйск), с варьированием набора параметров импульсов лазера с длиной волны $\lambda \approx 1064$ нм и с определением уровня удельной производительности процесса очистки и энергозатрат в различных режимах, а также некоторых существенных физических характеристик (удельной мощности импульса излучения P_p и размера облака лазерно-индуцируемой приповерхностной плазмы R_{sw}), по-видимому, влияющих на механизм разрушения органического слоя.

Параллельно с экспериментами по ЛО (результаты их приведены в табл. 2) мы провели систематизацию и анализ некоторых современных опубликованных данных по характеристикам выходных параметров ЛО органических слоев на нескольких видах металлов при варьировании режимных параметров ЛО-процесса с импульсными ОКГ,

определяющих специфику их импульсов, в частности, коэффициент заполнения (обратную скважность) [2] и энергию единичного импульса ЛИ E_p . Их результаты представлены в табл. 3. Далее на рис. 3 и 4 показана морфология некоторых образцов со слоем ЛКП до и после удаления нами этих слоев.

Таблица 2. Сравнение измеренных экспериментальных характеристик (и производных от них параметров) для различных режимов удаления органических слоев со стальных поверхностей (марок Ст3 и 40X), с использованием импульсных наносекундных лазеров

Table 2. Comparison of measured experimental characteristics (and parameters derived from them) for different parameters of organic layer removal from steel surfaces (St3 and 40X) using pulsed nanosecond lasers

№	t_p , нс	f , кГц	DC , с/с	E_p , мДж	$DC \cdot t_p$, нс	E' , МДж/дм ³	G_i , см ² /с	R_{sw} , мм	P_p , (Вт/см ²)-10 ⁻⁶
1 — очистка синего ЛКП (алкидного с $\delta = 120 \pm 20$ мкм) на углеродистой стали Ст3, с лазерной системой HS-LC200	13	700	0,0091	0,29	0,1183	59,94	0,95 (при $\alpha \approx 0,30$)	0,14	31,9
2 — то же	13	700	0,0091	0,30	0,1183	52,63	0,95 (при $\alpha \approx 0,35$)	0,14	32,65
3 — то же	80	164	0,0131	1,25	1,048	18,93	0,95 (при $\alpha \approx 0,95$)	0,38	22,1
4 — то же	200	64	0,0128	3,20	2,56	17,98	0,95 (при $\alpha = 1$)	0,66	22,7
5 — очистка пресс-формы для шин от резино-содержащих загрязнений (с $\delta \approx 70$ мкм) на поверхности стали 40X	200	165	0,0330	1,24	6,6	22,88	1,28 (при $\alpha \approx 1$)	0,54	8,79
6 — то же	500	165	0,0825	1,24	41,25	12,70	2,30 (при $\alpha = 1$)	0,79	3,52
7 — то же	80	165	0,0132	1,24	1,056	22,88	1,28 (при $\alpha = 1$)	0,38	22,0
8 — то же	200	600	0,1200	0,342	24,0	12,70	2,30 (при $\alpha = 1$)	0,42	2,42
9 — то же	80	180	0,0140	1,14	1,12	22,88	1,28 (при $\alpha = 1$)	0,37	20,1

Обозначения в таблицах 2 и 3: DC — «Duty cycle» (коэффициент заполнения) при ЛО ($DC = 1/S_p$, где S_p — скважность при импульсной ЛО ($S_p = t_0/t_p$ — отношение длительности межимпульсной паузы (точнее, интервала между амплитудными моментами двух соседних импульсов) к длительности импульса ЛИ в ходе технологического цикла ЛО)); E' — удельные энергозатраты на единицу облучаемой поверхности, определяемые по удельному времени цикла при ЛО единицы поверхности t_{cycle} и по N (в соответствии с [1]); G_i — интегральная поверхностная скорость ЛО («выходная», т. е. с учетом повторных проходов луча по поверхности, если они были); * — пятно ЛИ квадратной формы; α — степень удаления объема органического слоя с поверхности металла в данном режиме ЛО (в %/%) ; E_p — амплитудная энергия импульса ЛИ; R_{sw} — приближенный радиус квазисферической ударной волны в лазерной плазме, возможной при ЛО; P_p — удельная мощность (на единицу площади пятна излучения на поверхности материала) в момент действия импульса ЛИ.



Рис. 3. Макроморфология участков (площадью по 4 см²) с лакокрасочного покрытия алкидного типа (со средней толщиной 120 мкм), сфотографированных до и после лазерной очистки в режимах с разными параметрами: *a* — поверхность лакокрасочного покрытия до лазерной очистки; *b* — частично очищенная поверхность после лазерной очистки в режиме 2 по табл. 2; *c* — полностью очищенная часть поверхности после лазерной очистки в режиме 4 по табл. 2.

Fig. 3. Macroscopic morphology of sections (4 cm² each) of an alkyd paint coating (average thickness: 120 μm) before and after laser cleaning with different parameters: *a*, paint coating surface before laser cleaning; *b*, partially cleaned surface after laser cleaning in regime 2 according to Table 2; *c*, completely cleaned part of the surface after laser cleaning in regime 4 according to Table 2.

Таблица 3. Сравнение экспериментальных характеристик (и производных от них параметров) для некоторых режимов удаления органических слоев с металлических поверхностей, опубликованных в современных (2020–2024 гг.) зарубежных исследованиях [1, 10–12], с использованием импульсных наносекундных технологических лазеров

Table 3. Comparison of measured experimental characteristics (and parameters derived from them) for some parameters of organic layer removal from metal surfaces using pulsed industrial nanosecond lasers published in contemporary (2020–2024) foreign studies [1, 10–12]

№	t_p , нс	f , кГц	DC , с/с	E_p , мДж	$DC \cdot t_p$, нс	E' , МДж/дм ³	G_p , см ² /с	R_{svr} , мм	P_p , (Вт/см ²)·10 ⁻⁶
1 — ЛО от ЛКП (уретановой грунтовки) толщиной $\delta \approx 50$ мкм на стали [12] (лазер LXF-500-2D, одномодовый режим, $\lambda = 1,064$ мкм)	100	500	0,050	1,00	5,0	7,46	13,40 (при $\alpha \approx 1$)	0,40	88,4
2 — тоже, что и в № 1	100	100	0,010	1,00	1,0	8,064	2,48 ($\alpha \approx 1$)	0,40	198,9
3 — тоже для ЛО от ЛКП (из полиэфирной краски (жидкой)) толщиной $\delta \approx 25$ мкм [12]	100	500	0,050	1,00	5,0	16,08	12,44 ($\alpha \approx 1$)	0,40	88,4
4 — тоже, что и в № 3	100	100	0,010	1,00	1,0	20,00	2,00 ($\alpha \approx 1$)	0,40	198,9
5 — тоже для ЛО от ЛКП (из полиэфирной краски (порошок)) толщиной $\delta \approx 75$ мкм [12]	100	500	0,050		5,0	22,52	2,96 ($\alpha \approx 1$)	0,40	88,4
6 — тоже, что и в № 5	100	100	0,010		1,0	23,26	0,573 ($\alpha \approx 1$)	0,40	198,9
7 — ЛО эмаливого покрытия (двухслойного (полиэфир-амид-имид + полиамидимид (PAI)) с общей толщиной $\delta = 95$ мкм) на медных обмотках электродвигателей [1] (с лазерной системой NIR-типа, при $\lambda = 1,064$ мкм)	100	50	0,005	1,00	0,5	4,80	1,10 ($\alpha \approx 1$)	0,40	837,1
8 — тоже, что и в № 7, при $\lambda = 1,030$ мкм (лазерная система NIR-BS-типа) [1]	30	20	6,0·10 ⁻⁴	50,0	0,018	10,11	10,42 ($\alpha \approx 1$)	0,50	638,3
9 — тоже, что и в № 7, при $\lambda = 0,532$ мкм (лазерная система VIS-типа) [1]	1,2	3·104	0,036	0,0033	0,0432	5,31	1,98 ($\alpha \approx 1$)	0,022	2,33
10 — тоже, что и в № 7, при $\lambda = 0,355$ мкм (лазерная система UV-типа) [1]	25	60	0,0015	0,433	0,0375	10,94	0,25 ($\alpha \approx 1$)	0,19	17,03
11 — тоже, что и в № 7, при $\lambda = 10,60$ мкм (лазерная система IR10-типа) [1]	2000	27	0,054	11,11	108,0	9,60	3,29 ($\alpha \approx 1$)	2,12	2,83
12 — ЛО (с оптоволоконным лазером (Q-switching), многомодовый режим с $N = 1$ кВт) от четырехслойного ЛКП (в т. ч. два слоя (100 + 130 мкм) эпоксидной краски) с общей $\delta = 0,34$ мм на углеродистой стали, $\lambda \approx 1,07$ мкм [10-11]	100	17	0,0017	58,8	0,17	12,98	2,27 ($\alpha \approx 1$)	0,89	40,8
13 — тоже, что и в № 12	100	15	0,0015	71,4	0,15	14,01	2,10 ($\alpha \approx 1$)	0,93	49,6
14 — тоже, что и в № 12	100	12	0,0012	83,3	0,12	14,30	2,06 ($\alpha \approx 1$)	0,96	57,9
15 — тоже, что и в № 12	100	12	0,0012	83,3	0,12	16,34	1,80 ($\alpha \approx 1$)	0,96	57,9
16 — ЛО того же покрытия, что и в № 12 (с использованием сходного ОКГ в одномодовом ($N = 0,2$ кВт) режиме) с $\lambda \approx 1,07$ мкм [10–11]	60	200	0,0120	1,0	0,72	7,35	0,80 ($\alpha \approx 1$)	0,32	129,5

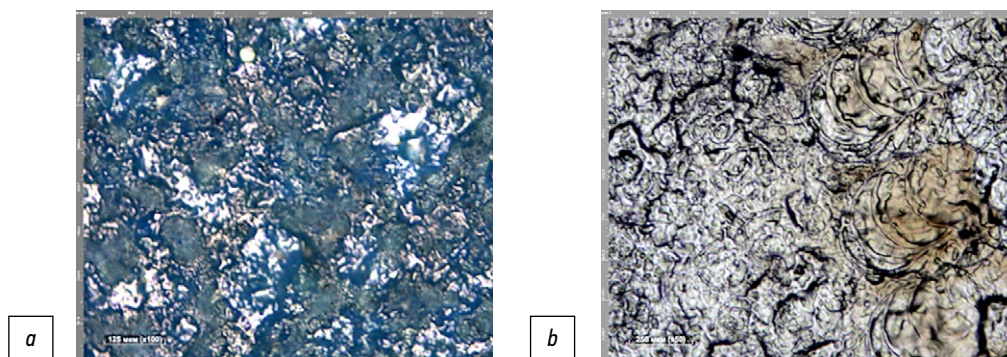


Рис. 4. Микроморфология участков стальных образцов, подвергавшихся лазерной очистке в наших экспериментах: *a* — вид частично очищенной от лакокрасочного покрытия поверхности в режиме № 2 по табл. 2 (при степени удаления слоя лакокрасочного покрытия $\alpha \approx 0,30$), репер на фото (слева внизу) — 125 мкм; *b* — вид полностью очищенной от лакокрасочного покрытия поверхности в режиме № 4 по табл. 2 (при степени удаления слоя ЛКП $\alpha \approx 1,0$), репер на фото (слева внизу) — 250 мкм.

Fig. 4. Microscopic morphology of sections of steel samples subjected to laser cleaning in our experiments: *a*, view of the surface partially cleaned of paint coating in regime 2 according to Table 2 (coating removal rate: $\alpha \approx 0,30$), the reference bar in the photo (bottom left) is 125 μm ; *b*, view of the surface cleaned of paint coating in regime 4 according to Table 2 (coating removal rate: $\alpha \approx 1,0$), the reference bar in the photo (bottom left) is 250 μm .

С использованием экспериментальных измерений по методике [19] нами найдено, что поверхность стальных образцов (на примере пластин из Ст3 с покрытием из краски алкидного сорта) при удалении с них покрытия в оптимальном режиме не подвергается существенной эрозии и степень шероховатости поверхности по данным оптической микроскопии является умеренной, а микротвердость (показатель по Виккерсу $HV = 155\text{--}180$ единиц) находится на уровне, незначительно превышающем этот показатель для исходной углеродистой стали под неудаленным покрытием, для которой мы зарегистрировали микротвердость в интервале 140–170 HV. Отметим также, что сравнение морфологии поверхности стали в наших образцах после лазерного удаления указанных слоев показывает сходный ее характер (см. пример на рис. 4 *b*) с морфологией поверхности некоторых образцов после импульсной лазерной очистки в работе В.П. Вейко с соавторами, где был найден побочный эффект частичной модификации поверхности углеродистой стали [6].

Анализ полученных нами в экспериментальной серии данных (в табл. 2) в сочетании с результатами аналогичных работ в данном направлении (с применением ОКГ с наносекундными импульсами — см. табл. 3 и рис. 5 и 6) показал наличие сложного многопараметрического характера связи между входными режимными параметрами и выходными характеристиками, а также то, что одними из наиболее явно (и прямо пропорционально) влияющих на интенсивность (т. е. обратные энергозатраты) процесса удаления органических слоев (различного состава) входных параметров являются коэффициент заполнения и длительность импульса излучения. Причем для случая небольшой группы режимов в нашей экспериментальной серии по ЛО зависимость для удельных энергозатрат (как показано на рис. 7) в однофакторном приближении может быть аппроксимирована в виде: $\sim (\text{const} + (1/\lg(DC \cdot t_p)))$, т.е. как обратно пропорциональная зависимость (параболического типа)

параметра E' от логарифма произведения $DC \cdot t_p = f \cdot t_p^2$. При этом в оптимальных режимах по нашим данным эти энергозатраты на ЛО находятся на уровне 12,7 МДж на 1 дм^3 вещества слоя (для случая режимов с удалением эластомерсодержащих загрязняющих веществ с поверхности из стали 40Х).

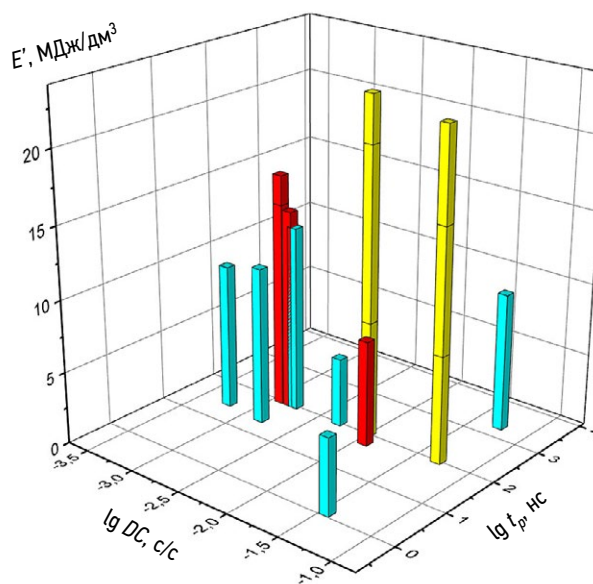


Рис. 5. Параметрическая зависимость для набора данных из трех экспериментальных серий по лазерной очистке различных видов слоев лакокрасочного покрытия-типа (16 точек (6+5+5)) по данным авторов публикаций [1, 10–12], — зависимость удельных энергозатрат E' (на единицу площади удаляемого слоя) от двух входных параметров (коэффициента заполнения DC и длительности импульса лазерного излучения t_p).

Fig. 5. Parametric dependence for a data set from three experimental laser cleaning series of reference coating layers (16 points [6 + 5 + 5]) according to the authors of publications [1, 10–12]; dependence of specific energy consumption E' (per unit area of the removed layer) on two input parameters (duty cycle DC and laser pulse duration t_p).

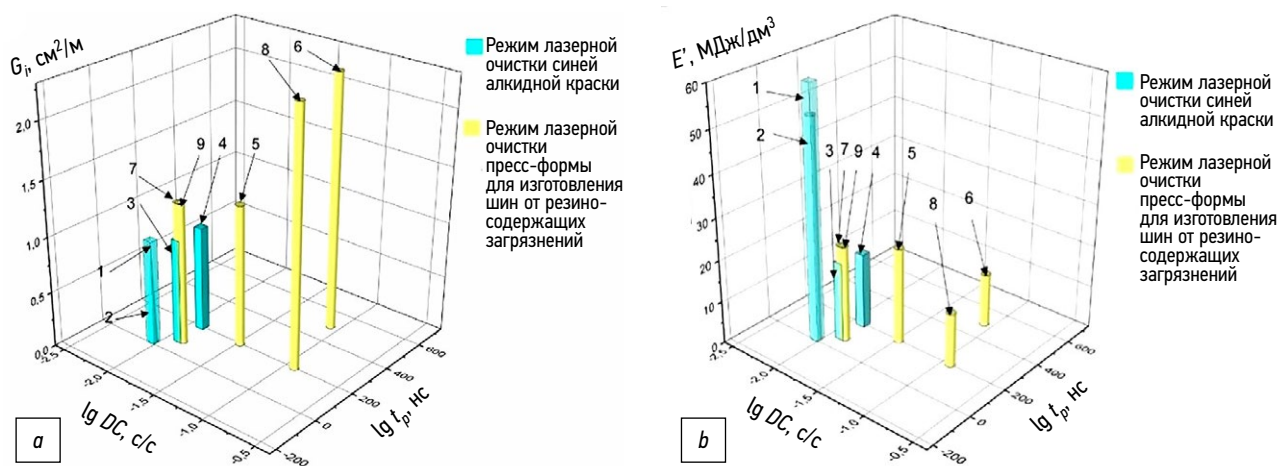


Рис. 6. Параметрические зависимости для наших экспериментов по лазерной очистке от алкидного лакокрасочного покрытия и от слоя резиносодержащих загрязнений: *a* — зависимость выходного параметра G_i (удельная производительность лазерной очистки) от двух входных параметров (коэффициент заполнения DC и длительность импульса лазерного излучения t_p); *b* — зависимость выходного параметра E' (энергозатраты на $дм^3$ объема удаляемого слоя) от двух входных параметров (от коэффициента заполнения DC и от t_p).

Fig. 6. Parametric dependencies for our experiments on laser cleaning from alkyd coating and a layer of rubber-containing contaminants: *a*, dependence of the output parameter G_i (specific performance of laser cleaning) vs. two input parameters (duty cycle DC and laser pulse duration t_p); *b*, dependence of the output parameter E' (energy consumption per $дм^3$ of the removed layer volume) vs. two input parameters (duty cycle DC and t_p).

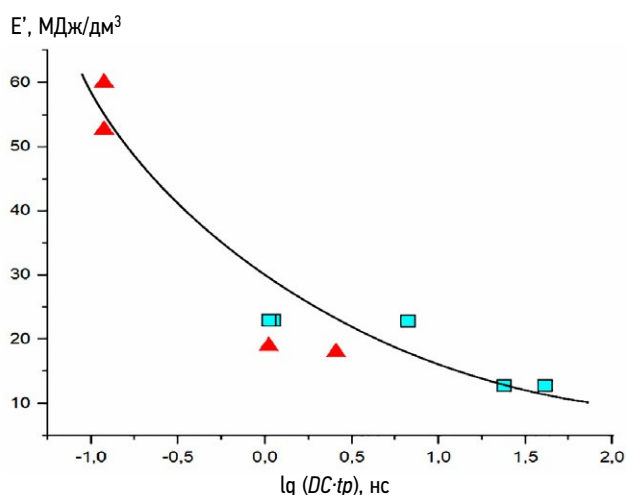


Рис. 7. Зависимость выходного параметра — удельных энергозатрат E' в однофакторном приближении от $DC \cdot t_p$ для нашей серии опытов в режимах (9 штук) очистки стали от алкидного лакокрасочного покрытия и слоя резиносодержащих загрязнений.

Fig. 7. Dependence of the output parameter (specific energy consumption E') in a single-factor approximation vs. $DC \cdot t_p$ for our series of experimental cleaning (9 regimes) of steel from alkyd coating and a layer of rubber-containing contaminants.

Физические свойства слоев, удаляемых при ЛО, могут отличаться (на десятки процентов, а иногда, еще сильнее) в зависимости от их химического состава и это может быть дополнительной причиной некоторого разброса данных (помимо влияния двух рассмотренных режимных параметров лазера — длительности и частоты импульсов ЛИ), наблюдаемых, в частности на рис. 5 и 6. Так, на примере двух сортов ЛКП из полимерных красок по данным работ [8] и [9] можно видеть, что значения

свойств находятся в диапазонах (см. обозначения в уравнении (2)): $\rho = 1700-1300 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 1,80-2,51 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$, $E = (0,416-1,0) \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $\alpha = (60,0-1,0) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Кроме того, для этих двух ЛКП такие важные свойства (влияющие на теплоперенос в материале при ЛО), как коэффициенты их теплопроводности k и температуропроводности a , находятся в интервалах $0,2-0,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $(6,5-9,2) \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно.

Важно также отметить, что с учетом рассмотренных экспериментальных данных будет целесообразно в дальнейших разработках технологий изучаемого типа (т. е. ЛО-процессов) проводить выбор режимных параметров для реализации таких технологий с учетом специфики возможных механизмов удаления органических слоев, которое по данным нашего предварительного анализа экспериментальных результатов в большинстве режимов с невысокими энергозатратами [19] проходит при сочетании как наиболее изученного энергоемкого термообляционного механизма (т.е. пиролиз с активным выходом летучих компонентов из слоя в виде смеси простых газов — CO , H_2 , CH_4 , H_2O и иных), так и механизма отслоения фрагментов слоя/покрытия, реализующегося за счет действия индуцируемых лазерным излучением термоупругих напряжений на границе покрытие — металлическая основа и в объеме покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании режимов импульсной лазерной очистки (ЛО) слоев краски и резиносодержащих загрязнений (на оснастке шинных производств) с конструкционных сталей определены параметры производительности ЛО и удельных энергозатрат. Эти результаты в сочетании

с данными современных работ по ЛО (с наносекундными лазерами) показали, что, несмотря на сложный многофакторный характер связи режимных параметров с указанными выходными параметрами ЛО, можно в первом приближении считать длину импульса ЛИ t_p и коэффициент заполнения DC (обратную скважность при ЛИ) одними из сильно влияющих на интенсивность очистки металлов параметров.

В оптимальных режимах энергозатраты на ЛО близки к 13 МДж на 1 дм^3 удаляемого слоя при очистке от резиносодержащих веществ. Для режимов в проведенных экспериментах по ЛО зависимость для удельных энергозатрат в однофакторном приближении имеет вид: $E' \sim (\text{const} + (1/\lg(DC \cdot t_p)))$. На примере образцов из СтЗ в ходе ЛО показано, что поверхность почти не подвергается эрозии. В целом, полученные нами результаты могут быть полезны как основа для дальнейших технологических работ по подбору, оптимизированных с точки зрения энергоэффективности, режимов ЛО органических слоев и покрытий.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. О.Г. Девойно — научная идея исследования, интерпретация полученных результатов; Д.А. Шпакевич — подготовка оборудования для эксперимента, получение экспериментальных данных; А.В. Горбунов — техническая реализации идеи исследования, участие в получении экспериментальных данных, анализ и интерпретация полученных результатов; А.С. Лапковский — подготовка и наладка оборудования для эксперимента, участие в интерпретации полученных результатов; Л.И. Пилецкая — участие в получении экспериментальных данных, подготовка рукописи статьи; А.Ю. Рудницкий — подготовка и наладка оборудования для эксперимента. Все авторы статьи одобрили ее рукопись (версию для публикации).

Источники финансирования. Подпрограмма «Фотоника и ее применения» государственной программы научных исследований Республики

Беларусь «Фотоника и электроника для инноваций» на 2021–2025 гг., задание 1.4.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFO

Author contributions: Oleg G. Devoino: conceptualization, formal analysis, validation; D.A. Shpakevich: resources, investigation; A.V. Gorbunov: investigation, data curation, formal analysis, validation; A.S. Lapkovsky: resources, formal analysis; L.I. Piletskaya: investigation, writing—original draft; A.Yu. Rudnitsky: resources. All the authors approved the version of the manuscript to be published.

Funding sources: Photonics and Its Applications Subprogram of the State Scientific Research Program of the Republic of Belarus Photonics and Electronics for Innovations for 2021–2025, Assignment 1.4.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D'Arcangelo S., Caprio L., Chesi D., et al. Methodological comparison of laser stripping solutions with contemporary pulsed lasers for e-drive copper hairpins // *Production Engineering. Research and Development*. 2024. Vol. 18, N. 3–4. P. 557–572. doi: 10.1007/s11740-023-01236-0 EDN: XHWIDC
2. Steen W.M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. London: Springer, 2010. doi: 10.1007/978-1-4471-3752-8
3. Brygo F., Dutouquet C., Le Guern F. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation // *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252, N. 6. P. 2131–2138. doi: 10.1016/j.apsusc.2005.02.143 EDN: MFHYHJ
4. Brygo F., Semerok A., Weulersse J.-M. Laser ablation of a turbid medium: Modeling and experimental results // *Journal of Applied Physics*. 2006. Vol. 100, N. 3. doi: 10.1063/1.2220647 EDN: LVZFTX
5. Madhukar Y.K., Mullick S., Shukla D.K. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 264. P. 892–901. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.10.193
6. Вейко В.П., Кишалов А.А., Мутин Т.Ю., Смирнов В.Н. Перспективы промышленных применений лазерной очистки материалов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 3 (79). С. 50–54.
7. Zhao H., Qiao Y., Du X. Laser cleaning performance and mechanism in stripping of Polyacrylate resin paint // *Applied Physics A*. 2020. Vol. 126, N. 5. doi: 10.1007/s00339-020-03551-0 EDN: NKACAQ
8. Li Y., Li J., Dong H., et al. Simulation and Experimental Study of Nanosecond Pulse Laser Removal of Epoxy Paint on 6061 Aluminum Alloy Surface // *Photonics*. 2024. Vol. 11, N. 1. doi: 10.3390/photonics11010025 EDN: LMWBEE
9. Lu Y., Yang L., Wang M., Wang Y. Simulation of nanosecond laser cleaning the paint based on the thermal stress // *Optik*. 2020. Vol. 227, N. 3. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165589
10. Kim J.-D., Kim J.-E., Song M.-K., Lee J.-M. A Fundamental Study on the High-Power Fiber Laser Cleaning for Removing the Multi-Layer Coating (in Korean) // *Journal of Welding and Joining*. 2020. Vol. 38, N. 6. P. 563–568. doi: 10.5781/JWJ.2020.38.6.6 EDN: YDORZO
11. Kim J.-E., Lee J.-M., Hyun J.-H. A Study on the Laser Removal of Epoxy Coatings on SS400 Surface by Beam Scanning Patterns // *Coatings*. 2021. Vol. 11, N. 12. doi: 10.3390/coatings11121510 EDN: RXGDKR

12. Deschênes J.M., Fraser A. Empirical Study of Laser Cleaning of Rust, Paint, and Mill Scale from Steel Surface. In: Lee J., Wagstaff S., Lambotte G., et al. (eds). *Materials Processing Fundamentals 2020. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer, 2020. P. 189–201. doi: 10.1007/978-3-030-36556-1_17
13. Li X., Wang H., Yu W., et al. Laser paint stripping strategy in engineering application: A systematic review // *Optik*. 2021. Vol. 241, N. 509. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167036 EDN: XLFKHP
14. Siggs E.B. Laser and electron beam treatments for corrosion protection of friction stir welds in aerospace alloys. [Doctorate Thesis] Birmingham, 2010. Дата обращения: 20.07.2025. Режим доступа: <https://core.ac.uk/reader/77070>
15. Liu K., Garmire E. Paint removal using lasers // *Applied Optics*. 1995. Vol. 34, N. 21. P. 4409–4415. doi: 10.1364/AO.34.004409
16. Stafe M., Negutu C., Popescu I.M. Theoretical determination of the ablation rate of metals in multiple-nanosecond laser pulses irradiation

- regime // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 253, N. 15. P. 6353–6358. doi: 10.1016/j.apsusc.2007.01.060 EDN: MHUQSV
17. Lammers N.A., Bleeker A. Laser shockwave cleaning of EUV reticles // *Proceedings SPIE*. 2007. Vol. 6730. doi: 10.1117/12.746388
18. Campanella B., Legnaioli S., Pagnotta S. Shock Waves in Laser-Induced Plasmas // *Atoms*. 2019. Vol. 7, N. 2. doi: 10.3390/atoms7020057 EDN: FNQBLT
19. Девойно О.Г., Горбунов А.В., Шпакевич Д.А., и др. Оценка параметров лазерной очистки от продуктов коррозии на стали и низколегированных сплавах при сопоставлении со скоростью лазерно-пиролизного удаления органических пленок с металлов. В кн.: *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов физико-технического института нан беларуси*. В 2 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Минск: ФТИ НАНБ, 2024. С. 31–47. EDN: WIDHCA

REFERENCES

1. D'Arcangelo S, Caprio L, Chesi D, et al. Methodological comparison of laser stripping solutions with contemporary pulsed lasers for e-drive copper hairpins. *Production Engineering. Research and Development*. 2024;18(3-4):557–572. doi: 10.1007/s11740-023-01236-0 EDN: XHWIDC
2. Steen WM, Mazumder J. *Laser Material Processing*. London: Springer; 2010. doi: 10.1007/978-1-4471-3752-8
3. Brygo F, Dutouquet C, Le Guern F. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation. *Applied Surface Science*. 2006;252(6):2131–2138. doi: 10.1016/j.apsusc.2005.02.143 EDN: MFHYHJ
4. Brygo F, Semerok A, Weulersse J-M. Laser ablation of a turbid medium: Modeling and experimental results // *Journal of Applied Physics*. 2006;100(3). doi: 10.1063/1.2220647 EDN: LVZFTX
5. Madhukar YK, Mullick S, Shukla DK. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser. *Applied Surface Science*. 2013;264:892–901. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.10.193
6. Veiko VP, Kishalov AA, Mutin TYu, Smirnov VN. Prospects for industrial applications of laser cleaning of materials. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2012;3(79):50–54. (In Russ.)
7. Zhao H, Qiao Y, Du X. Laser cleaning performance and mechanism in stripping of Polyacrylate resin paint. *Applied Physics A*. 2020;126(5). doi: 10.1007/s00339-020-03551-0 EDN: NKACAQ
8. Li Y, Li J, Dong H, et al. Simulation and Experimental Study of Nanosecond Pulse Laser Removal of Epoxy Paint on 6061 Aluminum Alloy Surface. *Photonics*. 2024;11(1). doi: 10.3390/photonics11010025 EDN: LMWBEE
9. Lu Y, Yang L, Wang M, Wang Y. Simulation of nanosecond laser cleaning the paint based on the thermal stress. *Optik*. 2020;227(3). doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165589
10. Kim J-D, Kim J-E, Song M-K, Lee J-M. A Fundamental Study on the High-Power Fiber Laser Cleaning for Removing the Multi-Layer Coating (in Korean). *Journal of Welding and Joining*. 2020;38(6):563–568. doi: 10.5781/JWJ.2020.38.6.6 EDN: YDORZO
11. Kim J-E, Lee J-M, Hyun J-H. A Study on the Laser Removal of Epoxy Coatings on SS400 Surface by Beam Scanning Patterns. *Coatings*. 2021;11(12). doi: 10.3390/coatings11121510 EDN: RXGDKR
12. Deschênes JM, Fraser A. Empirical Study of Laser Cleaning of Rust, Paint, and Mill Scale from Steel Surface. In: Lee J., Wagstaff S., Lambotte G., et al. (eds). *Materials Processing Fundamentals 2020. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2020:189–201. doi: 10.1007/978-3-030-36556-1_17
13. Li X, Wang H, Yu W, et al. Laser paint stripping strategy in engineering application: A systematic review. *Optik*. 2021;241(509). doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167036 EDN: XLFKHP
14. Siggs EB. Laser and electron beam treatments for corrosion protection of friction stir welds in aerospace alloys [Doctorate Thesis] Birmingham; 2010. Accessed: 20.07.2025. Available from: <https://core.ac.uk/reader/77070>
15. Liu K, Garmire E. Paint removal using lasers. *Applied Optics*. 1995;34(21):4409–4415. doi: 10.1364/AO.34.004409
16. Stafe M, Negutu C, Popescu IM. Theoretical determination of the ablation rate of metals in multiple-nanosecond laser pulses irradiation regime. *Applied Surface Science*. 2007;253(15):6353–6358. doi: 10.1016/j.apsusc.2007.01.060 EDN: MHUQSV
17. Lammers NA, Bleeker A. Laser shockwave cleaning of EUV reticles. *Proceedings SPIE*. 2007;6730. doi: 10.1117/12.746388
18. Campanella B, Legnaioli S, Pagnotta S. Shock Waves in Laser-Induced Plasmas. *Atoms*. 2019;7(2). doi: 10.3390/atoms7020057 EDN: FNQBLT
19. Devoino OG, Gorbunov AV, Shpakevich DA, et al. Evaluation of the parameters of laser cleaning from corrosion products on steel and low-alloy alloys in comparison with the rate of laser-pyrolysis removal of organic films from metals. In: *Modern methods and technologies for the creation and processing of materials. Collection of works of the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus*. In 2 books. Book 2. Minsk: Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus; 2024;2:31–47. (In Russ.) EDN: WIDHCA

ОБ АВТОРАХ

Девойно Олег Георгиевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий отраслевой научно-исследовательской лабораторией плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»;
ORCID: 0000-0001-7088-0435;
eLibrary SPIN: 3663-9748;
e-mail: devoino-o@mail.ru

AUTHORS' INFO

Oleg G. Devoino,

Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Plasma and Laser Technology Laboratory, Belarusian National Technical University;
ORCID: 0000-0001-7088-0435;
eLibrary SPIN: 3663-9748;
e-mail: devoino-o@mail.ru

*** Шпакевич Дмитрий Алексеевич,**

инженер, научно-исследовательская лаборатория
плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-
исследовательский политехнический институт»;
адрес: Республика Беларусь, 220013, Минск,
пр. Независимости, д. 65;
e-mail: dimaschpakevitch@gmail.com

Горбунов Андрей Васильевич,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
научно-исследовательская лаборатория плазменных
и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-
исследовательский политехнический институт»;
ORCID: 0009-0001-4800-3724;
eLibrary SPIN: 6517-2035;
e-mail: gorbunov_hmti@mail.ru

Лапковский Александр Сергеевич,

научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория
плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-
исследовательский политехнический институт»;
eLibrary SPIN: 2439-3009;
e-mail: alapkovskii@gmail.com

Пилецкая Людмила Игнатьевна,

научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория
плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-
исследовательский политехнический институт»;
eLibrary SPIN: 5133-8078;
e-mail: pileckayli@bntu.by

Рудницкий Андрей Юрьевич,

младший научный сотрудник, научно-исследовательская
лаборатория плазменных и лазерных технологий, филиал
БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»;
eLibrary SPIN: 8913-3014;
e-mail: rud5001@mail.ru

*** Dmitry A. Shpakevich,**

engineer, Plasma and Laser Technology Laboratory,
Belarusian National Technical University;
address: 65, Nezavisimosti Ave, 220013, Minsk,
Republic of Belarus;
e-mail: dimaschpakevitch@gmail.com

Andrei V. Gorbunov,

Cand. Sci. (Engineering), senior researcher,
Plasma and Laser Technology Laboratory, Belarusian National
Technical University;
ORCID: 0009-0001-4800-3724;
eLibrary SPIN: 6517-2035;
e-mail: gorbunov_hmti@mail.ru

Alexander S. Lapkovsky,

researcher, Plasma and Laser Technology Laboratory,
Belarusian National Technical University;
eLibrary SPIN: 2439-3009;
e-mail: alapkovskii@gmail.com

Lyudmila I. Piletskaya,

researcher, Plasma and Laser Technology Laboratory,
Belarusian National Technical University;
eLibrary SPIN: 5133-8078;
e-mail: pileckayli@bntu.by

Andrei Yu. Roudnitsky,

junior researcher, Plasma and Laser Technology Laboratory,
Belarusian National Technical University;
eLibrary SPIN: 8913-3014;
e-mail: rud5001@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author