

М. В. Полоник¹, А. А. Манцыбора¹

ПРОБЛЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования и численных расчетов процессов лазерного удаления красок с поверхности металлических деталей. Проведены теоретические исследования температурных полей в зоне обработки сканирующим лазерным излучением, позволяющие провести практические испытания и разработать условия, при которых физическое воздействие энергии лазера наносит минимальные повреждения тонкостенным конструкциям. Полученные результаты нашли свое отражение в технологии очистки планеров летательных аппаратов.

Ключевые слова: Лазерная очистка, лазерная абляция, тонкостенные конструкции, численное моделирование, температурные поля, лазерное излучение, воздушное судно.

Полоник Марина Васильевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики необратимого деформирования; e-mail: polonik@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4092-8957>; AuthorID: 5247

Манцыбора Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории нелинейной механики деформирования; e-mail: manzubor@iacp.dvo.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5060-5436>; AuthorID: 5243

для цитирования: Полоник М. В., Манцыбора А. А. Проблемы лазерной очистки тонкостенных конструкций // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2024. № 3(61). С. 117–127. DOI: 10.37972/chgpu.2024.61.3.002 EDN: JTNJZG

Статья опубликована на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)*.

M. V. Polonik¹, A. A. Manzybora¹

PROBLEMS OF LASER CLEANING OF THIN-WALLED CONSTRUCTIONS

¹*M. Polonik Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia*

Abstract. The article presents the results of modeling and numerical calculations of processes of laser removal of paints from the surface of metal parts. Theoretical studies of temperature fields in the area of processing by scanning laser radiation are presented, allowing practical tests to be carried out and the conditions under which the radioactive effect of the laser radiation causes minimal damage to thin-walled structures to be developed. The results obtained are reflected in the technology for cleaning of aircraft.

Keywords: laser cleaning, laser ablation, thin-walled structures, numerical modeling, temperature fields, laser radiation, aircraft.

Marina V. Polonik, PhD in Physical & Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of irreversible deformation; e-mail: polonik@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4092-8957>; AuthorID: 5247

Alexander A. Manzybora, PhD in Physical & Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Nonlinear Deformation Dynamics; e-mail: manzubor@iacp.dvo.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5060-5436>; AuthorID: 5243

to cite this article: Polonik M. V., Manzybora A. A. Problems of laser cleaning of thin-walled constructions // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2024. No 3(61). p. 117–127. DOI: 10.37972/chgpu.2024.61.3.002 EDN: JTNJZG

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение. Летательные аппараты не могут эффективно эксплуатироваться без лакокрасочных покрытий (ЛКП), так как их поверхность подвергается сложному воздействию многих факторов: широкий диапазон температурных перепадов воздушной атмосферы, интенсивная солнечная радиация, повышенная доля ультрафиолета и высокая концентрация озона на больших высотах, эрозийный износ, воздействие горючесмазочных веществ, гидрожидкостей и многое другое [1]. Таким образом, главной функцией ЛКП является защита металлических сплавов, образующих всю конструкцию самолетов. Однако, в процессе эксплуатации воздушных судов неизбежно возникает задача контролируемого удаления ЛКП с их обшивки. Регламентируются такие процедуры инструкциями разработчиков, изготовителями оборудования, отраслевыми центрами и основаны на использовании опасных химических или абразивных материалов [2], [3], [4]. В качестве химических веществ в таких процессах используются летучие органические соединения [2], [3], что приводит к образованию большого количества опасных отходов, подлежащих высокочувствительной утилизации. В настоящее время лазерная очистка рассматривается как более эффективная и экологически безопасная технологическая операция [5].

В современной промышленности наиболее востребованными и эффективными являются волоконные лазеры [6], [7], [8]. Это связано с их небольшими габаритами, удобством в эксплуатации и возможностью проникания в сложнодоступные места [9]. Кроме того, волоконные лазеры нового поколения характеризуются высоким качеством оптического излучения, высокой мощностью и скоростью сканирования по обрабатываемой поверхности [10].

В основе механизмов лазерной очистки лежат физико-химические процессы лазерного нагревания, испарения и абляции материала с образованием плазмы, а также быстрое тепловое расширение и возникновение ударных волн. Таким образом, для очистки представляет интерес весь спектр процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, в том числе и в жидкой среде, где процессы удаления загрязнений идут гораздо более эффективно при меньших мощностях излучения [11].

Отметим, что лазерное селективное удаление ЛКП является не кинетическим энергетическим процессом. Высокий уровень поглощения энергии происходит на поверхности материала покрытия и приводит к его разложению и удалению. Приложенная энергия в основном поглощается и используется для разложения краски, что в свою очередь должно привести к минимальному увеличению температуры основы покрытия. При этом происходит полное, селективное (послойное) удаление ЛКП с поверхности металла вплоть до основного материала. При удалении выбранных участков лазерные импульсы должны быть точно направлены и контролироваться. При этом количество импульсов на пятно является решающим [12], [13]. С каждым импульсом тонкий слой удаляется. Лазер может удалить выбранные слои краски слой за слоем. Данный результат

достигается при правильно подобранном режиме обработки за счет использования специального программного обеспечения, мощности лазерного излучения и подходящей оптической линзы.

В настоящей работе, для учета множества различных факторов, влияющих на ход технологического процесса лазерной очистки ЛКП с поверхности образца [14], изготовленного из элемента крыла самолета КБ Сухого, исследуются температурные поля в зоне ЛИ при селективном удалении тонкого слоя краски иттербиевым волоконным лазером YLR-150/1500-QCW-MM-AC [13], [14], [15], [16]. Образцы из обшивки планера самолета [14] изготовлены из алюминиевого сплава толщиной 1 мм и имеют покрытие из материалов: анодный слой (22.67 мкм); грунт (30.09 мкм); краска серо-голубая (1240 мкм). Проведенные теоретические исследования и численные расчеты позволили провести практические испытания и разработать условия, при которых физическое воздействие энергии лазера наносит минимальные повреждения сплавам и композитам образца в технологии очистки планеров летательных аппаратов.

1. Исследование температурных полей в зоне обработки ЛКП лазерным излучением. Нагревание тела лазерным излучением описывается дифференциальным уравнением теплопроводности [17], граничное условие на поверхности задает действие поверхностного источника:

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \nabla^2 T(r, z, t), \quad -k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \Big|_{z=0} = \begin{cases} (1-R)q(r, t), & r \leq r_0, \\ 0, & r > r_0, \end{cases} \quad (1)$$

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – радиальное расстояние от точки облучаемой поверхности до оси луча; $\{x, y, z\}$ – прямоугольные декартовы координаты с началом в центре пятна ЛИ на поверхности материала; ось z совпадает с осью луча, перпендикулярна нагреваемой поверхности и направлена в глубь материала; ∇^2 – оператор Лапласа; t – время; $q(r, t)$ – плотность мощности излучения на поверхности тела; R – коэффициент отражения металла в зоне воздействия ЛИ $(1-R) = A$; $(1-R)q(r, t)$ – поглощенный удельный поток ЛИ.

При моделировании процесса удаления ЛКП с поверхности обшивки ЛА существенную роль играют теплофизические параметры краски и образца из алюминиевого сплава (таб. 1).

Таким образом, согласно (1) и исходя из теплофизических характеристик краски (таб. 1) решение может быть построено согласно [17] при условии

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=\infty} = \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=\infty} = \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = T_0,$$

$q(r) = q_{max} e^{-r^2/r_0^2}$, $q(t) = const$ на поверхности $r \neq 0$, $z = 0$ и на глубине облучаемого материала $r \neq 0$, $z \neq 0$ соответственно:

$$T(r, z) = 2A\sqrt{atk}^{-1} q_{max} e^{-r^2/r_0^2} + T_0, \quad r \neq 0, \quad z = 0, \quad q_{max} = P_0 / \int_0^{r_0} 2\pi e^{-r^2/r_0^2} r dr, \quad (2)$$

№	Теплофизические характеристики	Обозначение	Краска	Образец	Единицы измерения
1	Плотность материала	ρ	2045	2800	кг/м ³
2	Теплоемкость	c	1730	797	Дж/(кг°С)
3	Теплопроводность	k	0.3	140	Вт/(м°С)
4	Температуропроводность	$a=k/(c\rho)$	$8.47973 \cdot 10^{-8}$	$6.274 \cdot 10^{-5}$	м ² /с
5	Высота (толщина краски)	h	$2 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	м
	Длина	d		0.08	м
	Ширина	b		0.01	м
6	Начальная температура	T_0	20	25	°С
7	Температура плавления	T_p		660	°С
8	Температура кипения	T_k		2500	°С
9	Коэффициент поверхностного поглощения ЛИ	A	0.6	0.28	

Таблица 1. Теплофизические характеристики краски и образца из алюминиевого сплава

$$T(r, z) = 2A\sqrt{atk}^{-1}q_{max}e^{-r^2/r_0^2}erfc[z/(2\sqrt{at})] + T_0, \quad r \neq 0, \quad z \neq 0. \quad (3)$$

В (2)-(3) q_{max} – максимальное значение плотности мощности лазерного воздействия по Гауссу, $erfc[z/(2\sqrt{at})]$ – интеграл дополнительной функции интеграла вероятности, P_0 , r_0 , τ – являются параметрами лазерной обработки таб. 2. Аддитивность функций (2)-(3) позволяет определить поле температур при скоростном сканировании лазерного пучка (ЛП) по поверхности материала с заданной скоростью сканирования v .

Для заданных параметров (таб. 1) проведена серия численных расчетов. Учитывалось, что при установившемся ($v = const$) равномерном режиме сканирования ЛП по поверхности – происходит равномерное перераспределение температур и соответственно областей проплавления и испарения краски. В таб. 2 представлены численные расчеты серий 1-4. Расчеты проводились для переменных параметров радиус пятна лазерного излучения r_0 и мощности лазерного излучения P_0 (таб. 2), постоянном времени воздействия ЛП (длительность импульса) $\tau = 5 \cdot 10^{-5}$ с и равномерной скорости $v = 1.5$ м/с. В таб. 2 T_h – расчетная температура на глубине h материала, T_b – расчетная температура на поверхности b материала.

На рис. 2 и рис. 1 представлены графические расчеты распределения температуры вглубь h материала и на его поверхности b соответственно (серия 1, таб. 2) при установившемся и равномерном процессе сканирования ЛП по поверхности материала.

На рис. 4 и рис. 3 представлены графические расчеты распределения температуры вглубь h материала и на его поверхности b соответственно (серия 1,

№	r_0 , м	P_0 , Вт	h , мкм	T_h , °С	b , мкм	T_b , °С
1	0.00005	185	2	>1000	≤ 120	>1000
			9	200	150	60
			13.5	21	≥210	20
2	0.00005	260	2	>2000	≤ 120	>1000
			10.5	200	140	60
			14	21	≥190	20
3	0.00015	185	2	>2000	≤ 290	>2000
			8.7	200	310	200
			12	20	≥590	20
4	0.00015	260	5	>2000	≤ 270	>2000
			8.5	200	300	200
			12	21	≥ 530	20

Таблица 2. Численные расчеты при заданных параметрах лазерной обработки r_0 и P_0

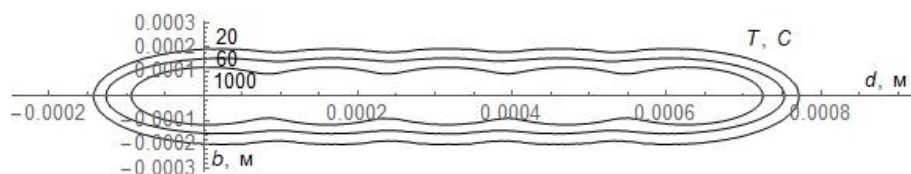


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности b материала, при установившемся и равномерном процессе сканирования ЛП по поверхности материала

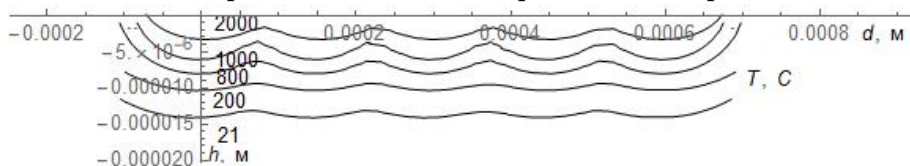


Рис. 2. Распределение температуры вглубь h материала, при установившемся и равномерном процессе сканирования ЛП по поверхности материала

таб. 2) при не установившемся и не равномерном процессе сканирования ЛП по поверхности материала.

Исследуемый материал красок является внешним защитным покрытием для конструкций. Величина теплопроводности краски мала и даже тонкий ее слой порядка 20 мкм на поверхности конструкции будет обладать достаточным тепловым сопротивлением, что и демонстрируют представленные расчеты.

Полученные численные результаты показали, не смотря на то, что температура на глубине 2 мкм выше 2000°C , на глубине 10 мкм температура составляет

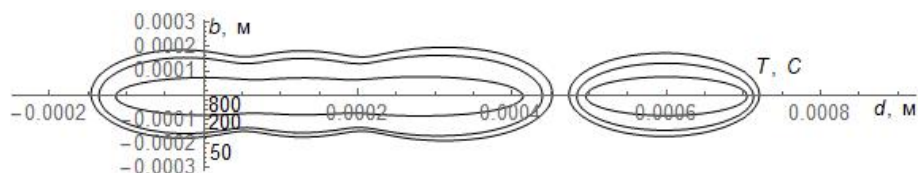


Рис. 3. Распределение температуры на поверхности b материала, при не установившемся и не равномерном процессе сканирования ЛП по поверхности материала

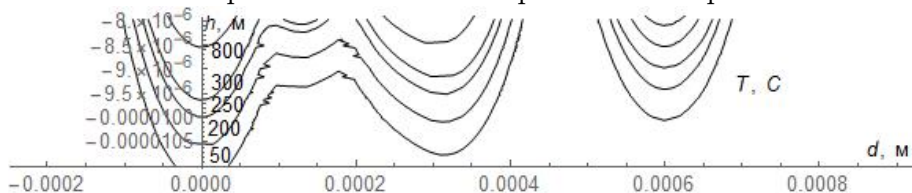


Рис. 4. Распределение температуры вглубь h материала, при не установившемся и не равномерном процессе сканирования ЛП по поверхности материала

порядка 200°C , в то время как на глубине 15 мкм температура не превосходит 20°C . Так же, согласно проведенным расчетам, температура на поверхности материала в окрестности 0.5 мм от радиуса пятна лазерного излучения не превышает 20°C , в то время как внутри лазерного пятна температура выше 2000°C . Таким образом, выбранный режим обработки лазерным воздействием, может быть безопасным для всей конструкции. Однако, при лазерной обработке многослойных материалов, необходим расчет температурного поля в каждом слое, так как теплофизические свойства и поглощательные способности контактирующих материалов не равны и изменяются скачком на границе прилегания слоев, что может приводить к смещению максимума температур от поверхности вглубь многослойного материала и перераспределению температур в зоне контакта, а, следовательно, и к перегреву одного из слоев конструкции [18], [19]. Более того, не смотря на многослойное нанесение красок, слои могут быть не равномерными и при их очистки в области лазерной абляции могут возникать области не покрытые краской - это области конструкционного алюминиевого сплава [19]. С этой целью было предложено провести расчеты, представленные ниже.

2. Распространение тепла в образце из алюминиевого сплава под воздействием лазерного излучения. Расчет распределения поля температур в обрабатываемом образце из алюминиевого сплава был выполнен с использованием метода конечных элементов системы ANSYS [20]. С использованием анализа Transient Thermal построено движение ЛП по поверхности с заданной скоростью v . Модельные соотношения (1) описывают поведение среды в температурном анализе. Для задания граничных условий в области падения ЛП:

$$T(x, y, t)|_{z=0} = \begin{cases} \frac{AP_0}{\pi r_0^2(1-e^{-r_0})} e^{-(x^2+(y-v_y t-y_0)^2)/(x_0^2+y_0^2)}, & x^2 + (y - v_y t - y_0)^2 \leq r_0^2 \\ 0, & x^2 + (y - v_y t - y_0)^2 > r_0^2 \end{cases}, \quad (4)$$

На нижней границе обрабатываемого образца задается конвективный теплообмен со средой. Расчеты проведены в рамках модели изотропной теплопроводности с параметрами материала таб. 1 и заданных $r_0=0.0001$ м, $P_0=185$ Вт. Результаты численного решения представлены на рис. 5 и рис. 6 в виде распределения температурных полей на образце. На рис. 5. представлено распределение температур в начале движения ЛП по поверхности образца, на рис. 6 - в конце движения ЛП по поверхности образца.

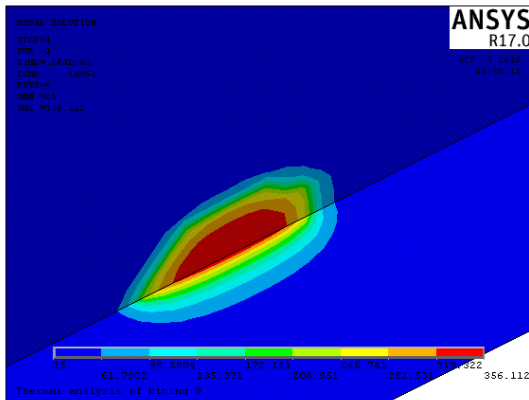


Рис 5. Распределение температур в образце из алюминиевого сплава в начале движения ЛП по поверхности образца

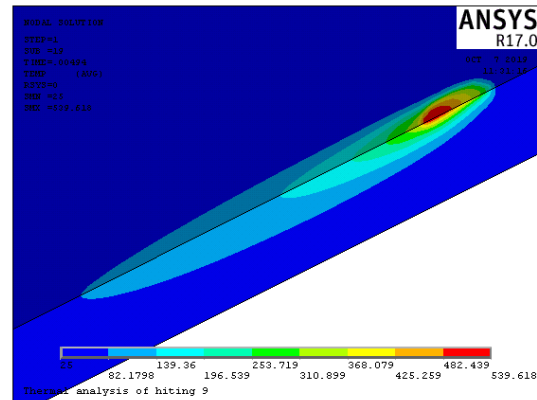


Рис 6. Распределение температур в образце из алюминиевого сплава в конце движения ЛП по поверхности образца

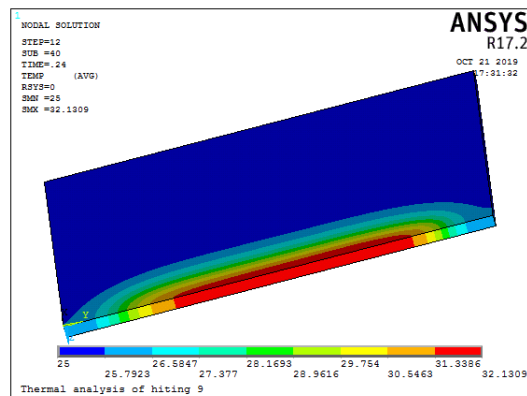
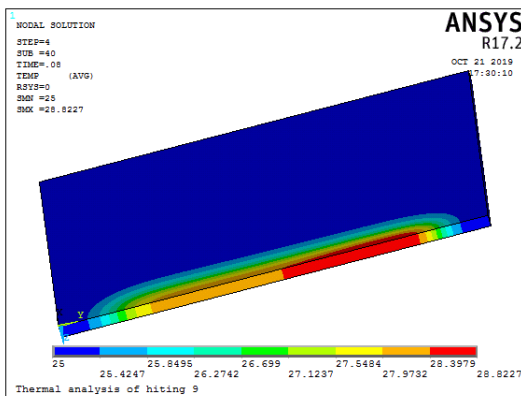


Рис 7. Распределение температур в образце из алюминиевого сплава в процессе 1 и 5 проходов ЛП по обрабатываемой поверхности

Для оценки возможного возникновения температурных деформаций, было рассчитано, на сколько градусов нагреется материал и за сколько проходов. Для увеличения точности численного решения в области движения ЛП была задана частая сетка. Пятно лазера возвращали в начало, смещали от первоначальной линии прохода на величину радиуса и начинали следующий проход. Распределение температур в образце из алюминиевого сплава в процессе 1 и 5 проходов ЛП по обрабатываемой поверхности представлены на рис. 7.

Согласно проведенным расчетом установлено, что значительный прогрев металла осуществляется только в малой окрестности падения ЛП в глубину на несколько микрон, причем на малый промежуток времени. В случае большого числа проходов ЛП, из расчетов следует, что максимальная температура в пятне практически не изменяется. Согласно проведенным вычислениям при выбранных параметрах процесса, средняя температура в процессе длительной обработки с несколькими проходами ЛП последовательно смещающегося от предыдущего прохода, растет незначительно, что не должно привести к возникновению температурных деформаций.

Таким образом, из проведенного вычислительного эксперимента следует, что при выбранных параметрах воздействия, длительность обработки не приводит к значительному повышению средней температуры образца до величин, способных вызывать нежелательные эффекты, такие как пластические деформации.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Выполнены численные расчеты процессов взаимодействия лазерного излучения с указанным лакокрасочным покрытием. Полученные результаты свидетельствуют о том, что расчетные параметры лазерного излучения не должны оказывать существенного воздействия на материал основы алюминиевого сплава толщиной 1 мм. Результаты моделирования процесса распространения тепла в металлическом образце под воздействием лазерного излучения показали, что при расчетных параметрах воздействия лазера на металлическую поверхность длительность обработки не приводит к значительному повышению средней температуры образца до величин, способных вызывать пластические деформации.

Полученные результаты нашли свое отражение в технологии очистки планов летательных аппаратов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. М. В. Полоник математическое моделирование, численные расчеты, написание текста рукописи, согласование финальной версии рукописи, обзор литературы по теме статьи, А. А. Манцыбора математическое моделирование и численные расчеты в ANSYS, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи.

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

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема No FFW-2021-0005).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. M. V. Polonik mathematical modeling, numerical calculations, writing the text of the manuscript, agreeing of the final version of the manuscript, the literature on the topic of the article, A. A. Manzybora mathematical modeling and numerical calculations in ANSYS, writing the text of the manuscript, editing the text of the manuscript.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. The research was carried out within the state assignment of IACP FEB RAS (Theme FWW-2021-0005).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кондрашов Э. К., Семенова Л. В., Кузнецова В. А., др. Развитие авиационных лакокрасочных материалов. Энциклопедический справочник. Москва : ВИАМ, 2012. С. 5.
- [2] Ицко Э. Ф., Дринберг А. С. Удаление лакокрасочных покрытий. Москва : ЛКМ-пресс, 2010. С. 116.
- [3] Ицко Э. Ф., Дринберг А. С. Смывки для удаления лакокрасочных покрытий // Промышленная окраска. 2003. № 4. С. 2–6.
- [4] Семенова Л. В., Новикова Т. А., Нефедов Н. И. Изучение смывающей способности смывок для удаления систем лакокрасочных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 1(46). С. 32–37.
- [5] Лазерная очистка // РИТМ машиностроения. 2019. № 7.
- [6] Ion J. Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [7] Morey B. Laser welding applications expand // Manufacturing Engineering. 2014. no. 152(3). P. 81–93.
- [8] Kawahito Y., Mizutani M., Katayama S. High quality welding of stainless steel with 10 kW high power fibre laser // Science and Technology of Welding and Joining. 2009. no. 14(4). P. 288–294.
- [9] Вейко В. П., Шахно Е. А. Сборник задач по лазерным технологиям. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2007. С. 66.
- [10] Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. Москва : Машиностроение, 1951. С. 297.
- [11] Вейко В. П., Смирнов В. Н., Чирков А. М., др. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. С. 103.
- [12] Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции // Успехи физических наук. 2002. № 172. С. 301–333.
- [13] Polonik M. V., Dudko O. V. Selection of the Optimal Parameters of the Process for Thermal Laser Treatment of Metals for Creating the Molten Pool with a Required Depth // CEUR-WS. No. 1623. 2016. P. 768–778.
- [14] Кульчин Ю. Н., Анисимов Н. Ю., Ионов А. А., др. Роботизированная лазерная влажная очистка тонкостенных конструкций // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2021. № 4. С. 30–39.
- [15] Yatskom D. S., Polonik M. V., Dudko O. V. Optimization of the fiber laser parameters for local high-temperature impact on metal // Proc. SPIE. No. 10176. 2016.
- [16] Кульчин Ю. Н., Змеу С. Б., Субботин Е. П., др. Волоконные лазеры // Вестник ДВО РАН. 2015. № 3(181). С. 67–78.
- [17] Малащенко А. А., Мезенов А. В. Лазерная сварка в металлах. Москва : Машиностроение, 1984. С. 44.

- [18] Рыкалин Н. Н., Углов А. А. Температурное поле разнородных материалов при сварке встык поверхностным источником // Физика и химия обработки материалов. 1969. № 5. С. 12–22.
- [19] Рыкалин Н. Н., Углов А. А., др. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. Москва : Машиностроение, 1985. С. 496.
- [20] ANSYS Theory Reference, Structures. SAS IP, Inc.

REFERENCES

- [1] Kondrashov E. K., Semenova L. V., Kuznetsova V. A. et al. Development of Aircraft Paintwork Materials. No. 5. Moscow : Science and Technologies, 2012. P. 49–54.
- [2] Itcko E. F., Drinberg A. S. Removal of Paint Coatings. Moscow : LKMP-Press, 2010. P. 116.
- [3] Itcko E. F., Drinberg A. S. Removers for Removing Paint and Varnish Coatings // Industrial Painting. 2003. no. 4. P. 2–6.
- [4] Semenova L. V., Novikova T. A., Nefedov N. I. Study of Removing Ability of Removers for Paint Systems Removal // Aviation Materials and Technologies. 2017. no. 1(46). P. 32–37.
- [5] Laser Cleaning // Rhythm of Machinery. 2019. no. 7.
- [6] Ion J. Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [7] Morey B. Laser Welding Applications Expand // Manufacturing Engineering. 2014. no. 152(3). P. 81–93.
- [8] Kawahito Y., Mizutani M., Katayama S. High-Quality Welding of Stainless Steel with 10 kW High Power Fibre Laser // Science and Technology of Welding and Joining. 2009. no. 14(4). P. 288–294.
- [9] Veiko V. P., Shakhno E. A. Collection of Problems on Laser Technologies. Saint Petersburg : Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2007. P. 66.
- [10] Rykalin N. N. Calculations of Thermal Processes During Welding. Moscow : Innovative Engineering, 1951. P. 297.
- [11] Veiko V. P., Smirnov V. N., Chirkov A. M., Shakhno E. A. Laser Cleaning in Mechanical Engineering and Instrument Making. Saint Petersburg : ITMO University, 2013. P. 103.
- [12] Anisimov S. I., Lukyanchuk B. S. Selected Problems of Laser Ablation Theory // Physics-Uspekhi. 2002. Vol. 45, no. 3. P. 301–333. DOI: 10.1070/PU2002v045n03ABEH000994.
- [13] Polonik M. V., Dudko O. V. Selection of the Optimal Parameters of the Process for Thermal Laser Treatment of Metals for Creating the Molten Pool with a Required Depth // CEUR Workshop Proceedings. Vol. 1623. 2016. P. 768–778.
- [14] Kulchin Yu. N., Anisimov N. Yu., Ionov A. A. The Robot-Assisted Laser Wet Cleaning of Thin-Walled Constructions // Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. 2021. no. 4. P. 30–39.
- [15] Yatskom D. S., Polonik M. V., Dudko O. V. Optimization of the Fiber Laser Parameters for Local High-Temperature Impact on Metal // Proceedings of SPIE. Vol. 10176. 2016.
- [16] Malashchenko A. A., Mezenov A. V. Laser Welding in Metals. 1984. P. 44.