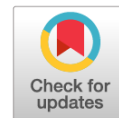


Оригинальное исследование

УДК 621.77.02

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_385

EDN: ZDAYRH



Снятие термобарьерного покрытия посредством лазерной очистки

В.С. Жданов, Г.А. Аккузин, Г.Г. Задыкян, Р.С. Корсмик

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Различные типы покрытий используются для защиты конструкционных материалов от коррозии и износа, а также для обеспечения теплоизоляции. Среди них наиболее сложную структуру имеют те покрытия, которые эксплуатируются в условиях высоких температур, например, в авиационных и промышленных газотурбинных двигателях, изолируя компоненты турбины от потока горячего газа, повышая этим долговечность и энергоэффективность двигателей [1]. К термобарьерным покрытиям предъявляются три основных требования: низкая температуропроводность, стабильность при высоких температурах, высокая долговечность, поэтому удалить их довольно трудно.

Цель — решение проблемы снятия термобарьерного покрытия с рабочих лопаток газотурбинных двигателей, которые подвергаются интенсивному износу из-за сложных условий эксплуатации. В качестве наиболее эффективного метода очистки предлагается технология лазерной очистки — передовая технология, позволяющая найти решения для снижения производственных затрат и повышения производительности и качества производственного процесса [2]. Обсуждается важность сохранения основного материала лопатки при снятии термобарьерного покрытия для его последующей эксплуатации (нанесения нового покрытия). Ставится цель удалить термобарьерного покрытия без повреждения основного металла и определить оптимальный режим для данного рода задач.

Методы. Для достижения цели лопатка из сплава ЧС-70ВИ подверглась резке по длине пера на несколько частей, одна из которых стала образцом-свидетелем. Эта часть не подвергалась очистке. С остальными образцами были проведены лабораторные экспериментальные исследования, направленные на изучение влияния входных параметров процесса лазерной очистки на полноту удаления термобарьерного покрытия. Далее все образцы подвергались металлографическим исследованиям для определения структуры материала, микротвердости и толщины термобарьерного покрытия.

Результаты. В статье представлен металлографический анализ микротвердости и толщины термобарьерного покрытия после проведения испытаний, подтверждающий эффективность лазерной очистки для обеспечения долговечности и надежности рабочих лопаток газотурбинного двигателя.

Выводы. В соответствии с задачами был проведен литературный обзор статей по теме лазерной очистки. Далее были выбраны диапазоны варьирования основных параметров обработки. Произведена серия экспериментов, после которой образцы были отправлены на металлографический анализ. На основе полученных в результате металлографического анализа данных определен режим, обеспечивающий полное снятие термобарьерного покрытия, и установлена зависимость толщины термобарьерного покрытия от мощности излучения.

Ключевые слова: лазерная очистка; термобарьерное покрытие; рабочие лопатки газотурбинных двигателей; никелированный сплав; металлографический анализ; ЧС70-ВИ; СДП-3А.

Как цитировать

Жданов В.С., Аккузин Г.А., Задыкян Г.Г., Корсмик Р.С. Снятие термобарьерного покрытия посредством лазерной очистки // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 385–392. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_385 EDN: ZDAYRH

Original Study Article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_385

EDN: ZDAYRH

Removal of Thermal Barrier Coating by Laser Cleaning

Vladislav S. Zhdanov, Grigoriy A. Akkuzin, Grigoriy G. Zadykyan, Rudolf S. Korsmik

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Various types of coatings are used for corrosion and wear protection of structural materials and thermal insulation. Coatings that are used in high-temperature conditions, e.g. aircraft and industrial gas turbine engines, have the most complex structure. They are used to isolate the turbine components from the hot gas flow, increasing the durability and energy efficiency of engines [1]. Thermal barrier coatings have three main requirements, including low thermal conductivity, stability at high temperatures, and high durability, and they are fairly difficult to remove.

AIM: To solve the problem of removing thermal barrier coating from moving blades of gas turbine engines subjected to intensive wear in tough operating conditions. Laser cleaning technology is proposed as the most effective cleaning method. It is an advanced technology that allows finding solutions to reduce production costs and increase the performance and quality of processes [2]. The paper discusses the importance of preserving the basic blade material during thermal barrier coating removal for its subsequent use (new coating). The aim is to remove the thermal barrier coating without damaging the basic metal and to determine the optimal conditions for such works.

METHODS: To achieve the aim, the blade made of CS70-VI alloy was cut into several parts along the length of the airfoil; one part was selected as a check test piece that was not cleaned. The remaining test pieces were tested during laboratory experiments aimed at studying the influence of input laser cleaning parameters on the removal of the thermal barrier coating. All samples were then subjected to metallographic tests to determine the material structure, microhardness, and thickness of the thermal barrier coating.

RESULTS: The paper presents metallographic analysis of microhardness and thickness of thermal barrier coating after testing confirming the effectiveness of laser cleaning to ensure the durability and reliability of moving blades for gas turbine engines.

CONCLUSION: The study involved a literature review of papers related to laser cleaning. Next, we selected the variation ranges of the main processing parameters and conducted a series of experiments followed by the metallographic analysis of test pieces. Metallographic analysis allowed to determine the conditions ensuring complete removal of the thermal barrier coating and the relationship between the thickness of the thermal barrier coating and the radiation power.

Keywords: laser cleaning; thermal barrier coating; moving blades of gas turbine engines; nickel-plated alloy; metallographic analysis; CS70-VI; SDP-3A.

To cite this article

Zhdanov VS, Akkuzin GA, Zadykyan GG, Korsmik RS. Removal of Thermal Barrier Coating by Laser Cleaning. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):385–392. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_385 EDN: ZDAYRH

Submitted: 25.03.2025

Accepted: 24.06.2025

Published online: 22.09.2025

ВВЕДЕНИЕ

Лопатки имеют высокую себестоимость изготовления ввиду сложной геометрии и дорогостоящих материалов, из которых они производятся, но быстро изнашиваются из-за условий, в которых работают [3].

Рабочих лопаток (РЛ) турбин в процессе эксплуатации подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок, работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре, подвергаются механическому износу. Под воздействием перечисленных факторов происходит разрушение тела лопаток [2].

Важным пунктом является подготовка поверхности, то есть очищение слоя загрязнений, т.к. поверхности РЛ газотурбинных двигателей (ГТД) во время работы подвергаются воздействию различных загрязняющих веществ, таких как летучая зола, мелкий песок, горячее масло [3]. Кроме того, на лопатку наносится термобарьерное покрытие (ТБП) для продления времени работы, и для сохранения эффективности в термически активной среде. Примеры химического состава покрытий: $Me-Cr-Al-Y$; $Ni-Co-Cr-Al-Y$; $Ni-Co-Cr-Al-Y+ZrO_2$ [4].

Основной задачей является снятие ТБП (для нанесения нового) без повреждения основного материала лопатки. Следовательно, необходима технология, с помощью которой можно выполнить эту операцию.

В данной работе рассматривается технология лазерной очистки как более точная и качественная в сравнении с альтернативными вариантами, такими как: химическая очистка при помощи различных веществ, например, фтористого водорода (HF); механическая очистка с использованием абразивных составов; пескоструйная; дробеструйная; ультразвуковая. Лазерная очистка — это передовая технология очистки поверхности, которая позволяет мгновенно удалять загрязнения, ржавчину и покрытия посредством высокоэнергетического лазерного луча для облучения поверхности компонентов [5].

Цель работы: определение оптимального режима лазерной очистки для снятия термобарьерного покрытия (ТБП) с РЛ ГТД.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи:

- провести литературный обзор по теме исследования;
- провести серию экспериментов по очистке РЛ на разных режимах;
- исследовать структуру обработанных лопаток и выбрать лучший режим.

МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА

Материалы

В данной работе использовалась РЛ из жаропрочного сплава ЧС-70ВИ на основе никеля (Ni). В табл. 1

представлен химический состав этого сплава (содержание некоторых элементов, % по массе).



Рис. 1. Образец до очистки.

Fig. 1. Test piece before cleaning.

Таблица 1. Химический состав некоторых элементов сплава ЧС-70ВИ [8]

Table 1. Chemical composition of some CS-70VI alloying elements [8]

Элемент	Cr	Mo	Ti	Al	W	Co
Содержание, %	15–16,7	1,5–2,5	4,2–5,0	2,4–3,2	4,5–5,9	10–11,5

Таблица 2. Химический состав защитного покрытия СДП-3А [9]

Table 2. Chemical composition of SDP-3A protective coating [9]

Элемент	Co	Cr	Al	Y
Содержание, %	62,5–66,8	22–24	11–13	0,2–0,5

Жаростойкость сплава ЧС-70ВИ обусловлена включением в его состав большего количества хрома (до 16 %). Следует отметить, что в данном случае концентрация вольфрама (W) находится на нижней границе легирования, поскольку технические условия допускают его содержание от 3,5 до 5%. Именно этот элемент ответствен за уменьшение диффузии в сплаве и в значительной степени обеспечивает его жаропрочность. Сплав ЧС-70 обладает высокой длительной прочностью и жаростойкостью в интервале температур до 900 °С, в частности высокой стойкостью к сульфидной коррозии и термической стойкостью к окислению [6].

На наружную поверхность пера и верхнюю часть полки лопаток нанесено двухслойное жаростойкое покрытие системы $Co-Cr-Al-Y$ (СДП-3А) толщиной ~120 мкм + ZrO_2 (КДП-1) – ~50 мкм [9].

Процентное содержание химических элементов (по массе) защитного покрытия приведено в табл. 2.

На рис. 1 приведена фотография образца до очистки.

Оборудование

Для лазерной очистки экспериментальных образцов применялся аппарат Raptor SFW-3000 (рис. 2, а) —

комплекс для лазерной чистки, резки и сварки с лазерной головкой RELFAR FWH20-S10A (рис. 2, *b*).

Технические характеристики аппарата Raptor SFW-3000R представлены в табл. 3.

Для проведения металлографических исследований микро- и макрошлифов образцы были подготовлены с использованием шлифовально-полировальной машины SAPHIR 250 A1-ECO, представленной на рис. 3.

Для измерения микротвердости образца по шкалам Виккерса был использован микротвердомер Future Tech FM-31, представленный на рис. 4. Расстояние между отпечатками измерений составляло 150 мкм, измерения проводились по методу Виккерса с нагрузкой в 300 г.

Методика

Для достижения цели лопатка из сплава ЧС-70ВИ подверглась резке по длине пера на несколько частей, одна из которых стала образцом-свидетелем. Эта часть не подвергалась очистке. С остальными образцами были

Таблица 3. Технические характеристики Raptor SFW-3000R

Table 3. Raptor SFW-3000R specifications

Характеристика	Значение
Диапазон длин волн, нм	1080
Номинальная мощность, Вт	≤3000
Коллиматорное фокусное расстояние, мм	50
Фокусное расстояние, мм	150
Диапазон регулировки фокуса, мм	±10
Максимальное давление газа, МПа	≤1
Максимальная ширина чистки, мм	80
Частота, Гц	50–5000
Скорость сканирования, мм/с	1000–10 000

проведены лабораторные экспериментальные исследования, направленные на изучение влияния входных параметров процесса лазерной очистки на полноту удаления ТБП. Далее все образцы подвергались металлографическим

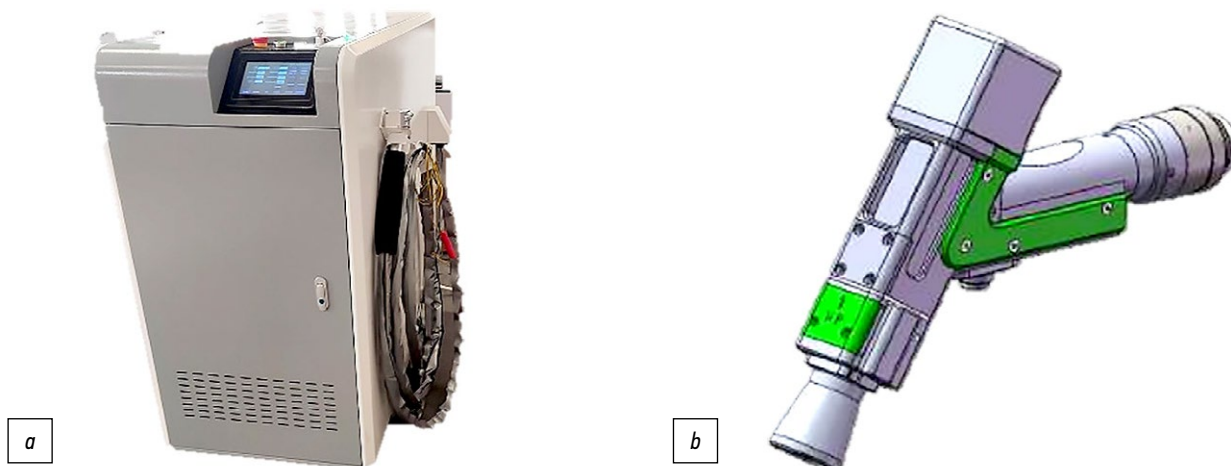


Рис. 2. Оборудование для чистки: *a* — аппарат Raptor SFW-3000R; *b* — лазерная головка RELFAR FWH20-S10A.
Fig. 2. Cleaning equipment: *a*, Raptor SFW-3000R device; *b*, RELFAR FWH20-S10A laser head.



Рис. 3. Шлифовально-полировальная машина SAPHIR 250 A1-ECO.
Fig. 3. Grinding and polishing system (SAPHIR 250 A1-ECO).



Рис. 4. Микротвердомер Future Tech FM-31.
Fig. 4. Microhardness tester (Future Tech FM-31).

исследованиям для определения структуры материала, микротвердости и толщины ТБП.

В качестве основных технологических параметров служили: мощность лазерного излучения (Вт), частота (кГц), скорость сканирования (мм/с), ширина луча (мм).

В процессе анализа литературных источников по данной теме были выбраны варьируемые диапазоны параметров режимов очистки, приведенные в табл. 4.

Лазерная обработка экспериментальных образцов проводилась по нормали к обрабатываемой поверхности на расстоянии 300 мм от источника излучения посредством двух проходов с реверсивным движением [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Визуальный контроль (ВК)

После проведения лазерной чистки был произведен ВК обработанных поверхностей. Контролировались дефекты поверхности типа трещин, перегрева (цвета побежалости), неравномерности удаления слоя. Внешний вид некоторых образцов представлен на рис. 5.

В результате ВК наблюдались образцы с неравномерностью очищения, проплавлениями и трещинами.

На рис. 6 представлен образец, на котором видна неравномерность очищения, вызванная малой скоростью сканирования.

Таблица 4. Варьируемые диапазоны параметров очистки образцов

Table 4. Variable ranges of test piece cleaning parameters

Мощность излучения, Вт	Частота, кГц	Скорость сканирования, мм/с	Ширина луча, мм
500–2000	3–5	5000–7000	40–60

На рис. 7 представлена фотография образца, на котором заметны повреждения от обработки: трещины и проплавления. У данного образца множество трещин и проплавлений, что обусловлено мощностью, на которой проводилась чистка, а именно 2000 Вт. Повреждения по краям, в отличие от середины, объясняются более тонким слоем материала.

На рис. 8 приведена фотография образца, обработанного на мощности 1500 Вт. На левом краю этого образца видно потемнение, вызванное чрезмерным нагревом поверхности.

На рис. 9 приведенные образцы более светлые, чем предыдущие, следовательно, ТБП не снято.

Далее все образцы, вне зависимости от дефектов, были отправлены на металлографический анализ.

Металлографический анализ

С образцов, отправленных на металлографический анализ, снимались характеристики: толщина ТБП,

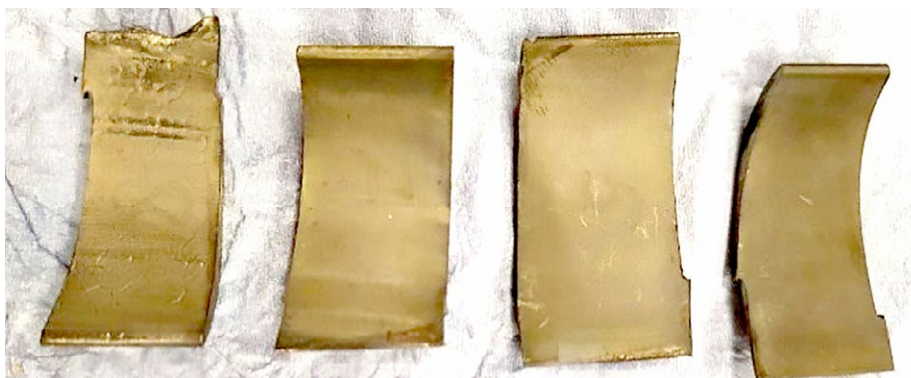


Рис. 5. Образцы после чистки.

Fig. 5. Test pieces after cleaning.



Рис. 6. Образец с неравномерностью очищения.

Fig. 6. Unevenly cleaned test piece.



Рис. 7. Образец с трещинами и проплавлениями.

Fig. 7. Test piece with cracks and penetrations.



Рис. 8. Образец, обработанный на мощности 1500 Вт.
Fig. 8. Test piece processed at 1500 W.



Рис. 9. Образцы с неснятым термобарьерным покрытием.
Fig. 9. Test pieces with the thermal barrier coating not removed.

микротвердость, химический состав. После получения результатов были составлены графики и диаграммы, отображающие зависимости измеряемых характеристик от мощности излучения лазера.

На рис. 10 приведена зависимость толщины ТБП от мощности. Исходное значение толщины ТБП — 150 мкм.

Из этого графика следует, что наиболее эффективной мощностью является 500 Вт, т.к. при этом значении достигается минимальная толщина ТБП.

На рис. 11 показан график зависимости микротвердости от мощности. Начальное значение микротвердости поверхности — 402 HV.

По графику видно, что значение микротвердости в зависимости от мощности резко не изменяется и находится в установленном техническими условиями диапазоне, следовательно, основной металл не поврежден, что означает правильно выбранные характеристики обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с задачами был проведен литературный обзор статей по теме лазерной очистки. Далее были выбраны диапазоны варьирования основных параметров обработки. Произведена серия экспериментов, после которой образцы были отправлены на металлографический анализ. На основе полученных в результате металлографического анализа данных определен режим, обеспечивающий полное снятие ТБП, и установлена зависимость толщины ТБП от мощности излучения.

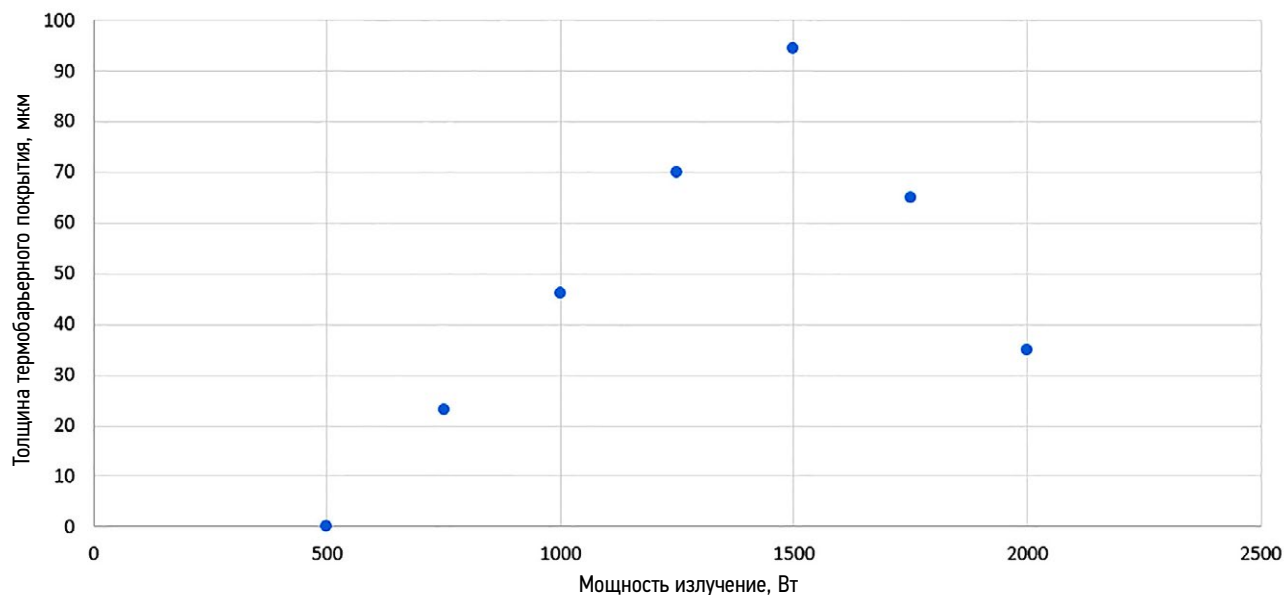


Рис. 10. Зависимость толщины термобарьерного покрытия от мощности.
Fig. 10. Relationship between the thermal barrier coating thickness and the power.

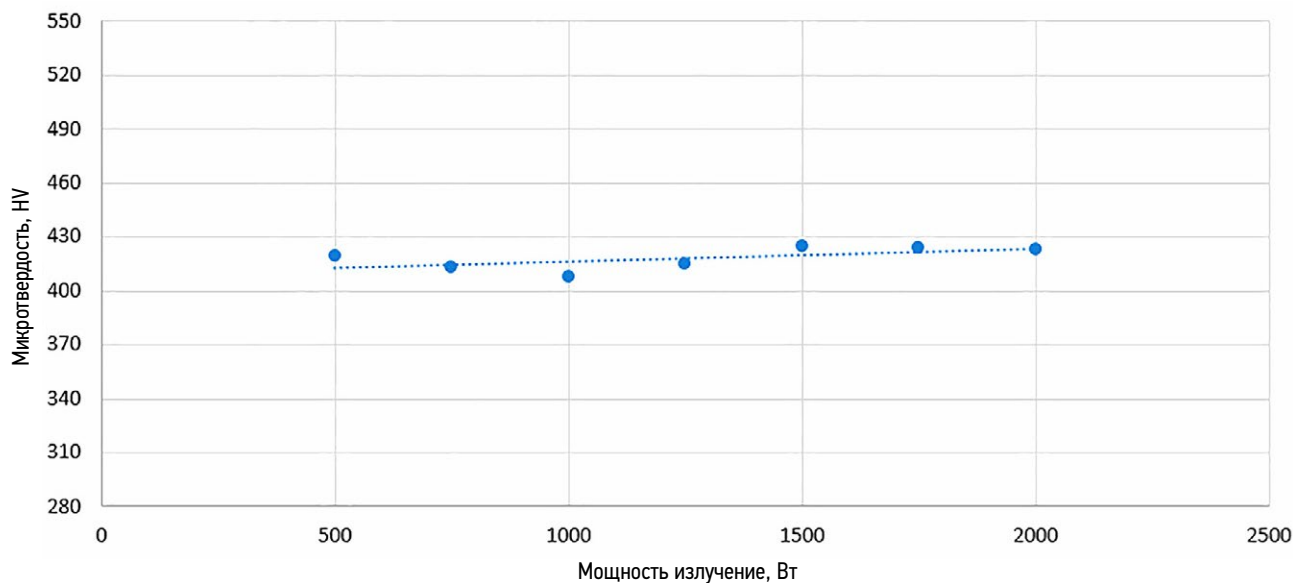


Рис. 11. Зависимость микротвердости от мощности.

Fig. 11. Relationship between the microhardness and the power.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В. Жданов и Г. Аккузин — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений; Г. Задыкян и Р. Корсмик — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

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

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 INFORMATION

Author contributions: V.S. Zhdanov, G.A. Akkuzin: investigation, writing—original draft, writing—review & editing, visualization; G.G. Zadykyan, R.S. Korsmik: expert review, validation. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agree to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: No funding.

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.

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

Provenance and peer review: This work was submitted to the journal on its own initiative and reviewed according to the usual procedure. One reviewer, a member of the editorial board and the scientific editor of the publication participated in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Padture N.P., Gell M., Jordan E.H. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications. In: Science: Reflections on Self: Immunity and Beyond. Washington: Science, 2002. P. 280–284.
2. Burdel T., Weiler S., Faißt B., et al. Lasers and applications in parts cleaning and surface pre-treatment // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2013. doi: 10.1117/12.2004124
3. Кротинов Н.Б. Продление ресурса лопаток газотурбинных двигателей упрочняющей обработкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 5. С. 221. EDN: WLNAXX
4. Корсмик Р.С. Порошковая наплавка жаропрочного никелевого сплава ЖС32 на рабочие лопатки газотурбинных двигателей. дисс. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2022. EDN: XYDWWH

5. Jafari Eskandari M., Karimi M., Araghchi M., Hadipour A. Laser cleaning process of high-pressure turbine blade: Characterization and removal of surface contaminants // *Surface and Coatings Technology*. 2023. № 470. С. 401. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129885 EDN: FIWWPK

6. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 60–70. EDN PFTMXZ

7. Zhu G., Xu Z., Jin Y., et al. Mechanism and application of laser cleaning: A review // *Optics and Lasers in Engineering*. 2022. № 157. P. 180–194. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107130 EDN: KQKYW

8. Давыдов Д.И. Структура турбинной лопатки из сплава ЧС-70 после аварийного воздействия. В кн.: *X Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов — молодых ученых* (Екатеринбург, 7–11 декабря 2009 г.). Екатеринбург, 2009. С. 224–226.

9. Тарасенко Ю.П., Сорокин В.А., Бердник О.Б., Кривина Л.А. Аналитическая оценка постэксплуатационного состояния лопаток турбин высокого давления двигателей ДЦ 59Л и ДЖ 59 и технологические особенности их ремонтно-восстановительной обработки // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2006. № 2-1.

REFERENCES

1. Padture NP, Gell M, Jordan EH. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications. In: *Science: Reflections on Self: Immunity and Beyond*. Washington: Science. 2002. P. 280–284.

2. Burdel T, Weiler S, Faißt B, et al. Lasers and applications in parts cleaning and surface pre-treatment. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2013. doi: 10.1117/12.2004124

3. Krotinov NB. Extension of the service life of gas turbine engine blades by hardening treatment. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2016;5:221. (In Russ.) EDN: WLNAXX

4. Korsmik R.S. *Powder surfacing of heat-resistant nickel alloy ZhS32 on working blades of gas turbine engines*. [dissertation] St. Petersburg; 2022. (In Russ.) EDN: XYDWWH

5. Jafari Eskandari M, Karimi M, Araghchi M, Hadipour A. Laser cleaning process of high-pressure turbine blade: Characterization and removal of surface contaminants. *Surface and Coatings Technology*. 2023;470:401. doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129885 EDN: FIWWPK

6. Kablov EN, Muboyadzhyan SA. Heat-resistant and heat-protective coatings for high-pressure turbine blades of advanced gas turbine engines. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2012;5:60–70. (In Russ.) EDN PFTMXZ

7. Zhu G, Xu Z, Jin Y, et al. Mechanism and application of laser cleaning: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2022;157:180–194. doi: 10.1016/j.optlaseng.2022.107130 EDN: KQKYW

8. Davydov DI. Structure of a turbine blade made of ChS-70 alloy after an accidental impact. In: *X International scientific and technical Ural school-seminar of metallurgists – young scientists (Ekaterinburg, December 7–11, 2009)*. Ekaterinburg; 2009:224–226. (In Russ.)

9. Tarasenko YuP, Sorokin VA, Berdnik OB, Krivina LA. Analytical assessment of the post-operational condition of high-pressure turbine blades of the DC 59L and DJ 59 engines and technological features of their repair and restoration processing. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2006;2-1. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

* Задьян Григорий Григорович,

инженер технологического отдела, институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: Россия, 198262, Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, 38-а; eLibrary SPIN: 5240-2062; e-mail: gzadykyan@mail.ru

Корсмик Рудольф Сергеевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры цифровых лазерных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: r.korsmik@ltc.ru

Жданов Владислав Сергеевич,

магистрант кафедры цифровых лазерных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: fylhtq1995ujlf@gmail.com

Аккузин Григорий Андреевич,

магистрант кафедры цифровых лазерных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: Akkuzyn@yandex.ru

AUTHORS' INFO

* Grigoriy G. Zadykyan,

engineer of the technology department, Institute of Laser and Welding Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 38-a Marshala Zhukova Ave, Saint Petersburg, Russia, 198262; eLibrary SPIN: 5240-2062; e-mail: gzadykyan@mail.ru

Rudolf S. Korsmik,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Digital Laser Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: r.korsmik@ltc.ru

Vladislav S. Zhdanov,

Master's student of the Department of Digital Laser Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: fylhtq1995ujlf@gmail.com

Grigoriy A. Akkuzin,

Master's student of the Department of Digital Laser Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: Akkuzyn@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author