

Оригинальное исследование

УДК 621.791.92

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_259

EDN: BOFWQZ

Разработка технологического процесса ремонта рабочих лопаток первой ступени турбины высокого давления газотурбинного двигателя ДР-59Л методом лазерной порошковой наплавки

С.В. Тюков, Г.Г. Задыкян, Д.В. Мукин, Р.В. Мендагалиев, Р.С. Корсмик

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Современный авиационный газотурбинный двигатель — это передовой технологический комплекс, состоящий из компрессора, камеры сгорания, турбины, сопла и других модулей. Среди них важную роль для надежности работы газотурбинного двигателя играет осевой компрессор, который состоит из многоступенчатых лопаток ротора и статора. И все эти компоненты подвергаются воздействию статических, динамических и циклических нагрузок, из-за чего возникают усталостные трещины, термические напряжения и механические повреждения. Чтобы увеличить срок службы газотурбинных двигателей и снизить затраты на его обслуживание, применяются технологии восстановления изношенных или поврежденных поверхностей рабочих лопаток.

Цель работы — восстановление изношенных поверхностей серии рабочих лопаток турбины высокого давления ДР-59Л методом лазерной порошковой наплавки.

Материалы и методы. Перед выполнением ремонта рабочих лопаток предварительно была произведена апробация диапазона технологических параметров лазерной наплавки для получения бездефектной структуры на образце-свидетеле. В качестве присадочного материала выступал металлический порошок кобальтового сплава Stellite-21. Для оценки структуры и механических свойств наплавленных образцов были проведены металлографические исследования и механические испытания.

Результаты. Посредством моделирования процесса восстановления пера рабочей лопатки определен рабочий режим лазерной порошковой наплавки. В ходе капиллярного метода контроля восстановленных поверхностей рабочих лопаток не были выявлены дефекты. Результаты испытания на одноосное растяжение восстановленного пера рабочей лопатки показали повышенный предел прочности и относительного удлинения.

Заключение. С применением технологии лазерной порошковой наплавки удалось восстановить изношенные поверхности серии рабочих лопаток турбины высокого давления ДР-59Л, тем самым увеличив жизненный цикл изделий силовой установки.

Ключевые слова: лазерная порошковая наплавка; рабочая лопатка; турбина высокого давления; ремонт компонентов ГТД; ЧС-70.

Как цитировать

Тюков С.В., Задыкян Г.Г., Мукин Д.В., Мендагалиев Р.В., Корсмик Р.С. Разработка технологического процесса ремонта рабочих лопаток первой ступени турбины высокого давления газотурбинного двигателя ДР-59Л методом лазерной порошковой наплавки // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 259–270. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_259 EDN: BOFWQZ

Original study article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_259

EDN: BOFWQZ

Development of Laser Cladding Repair Process for First Stage Blading of High-Pressure Turbine for DR-59L Gas Turbine Engine

Stepan V. Tyukov, Grigory G. Zadykyan, Dmitriy V. Mukin, Ruslan V. Mendagaliev, Rudolf S. Korsmik

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: A state-of-the-art aircraft gas turbine engine is an advanced technology consisting of a compressor, combustion chamber, turbine, nozzle, and other components. It includes the axial compressor with multistage rotor and stator blades important for the reliable operation of the gas turbine engine. All these components are subject to static, dynamic, and cyclic loads causing fatigue cracking, thermally induced stress, and mechanical damage. To increase the service life of gas turbine engines and reduce maintenance costs, technologies are used to restore worn or damaged moving blade surfaces.

AIM: To restore worn surfaces of moving blades of DR-59L high-pressure turbine by laser cladding.

MATERIALS AND METHODS: Prior to repairing the blades, we tested a range of laser cladding parameters on a check test piece to determine a defect-free structure. Stellite-21 cobalt alloy powder was used as a filler. To evaluate the structure and mechanical properties of the claded test pieces, we conducted metallographic studies and mechanical tests.

RESULTS: By modeling the blade airfoil restoration process, we determined the operational conditions of the laser cladding process. No defects were detected during the capillary test of the restored surfaces. The uniaxial tensile test of the restored blade airfoil showed increased tensile strength and elongation.

CONCLUSIONS: Laser cladding technology allowed to restore the worn surfaces of moving blades of DR-59L high-pressure turbine; thereby increasing the service life of the engine unit.

Keywords: laser cladding; moving blade; high-pressure turbine; repair of gas turbine engine components; CS70.

To cite this article

Tyukov SV, Zadykyan GG, Mukin DV, Mendagaliev RV, Korsmik RS. Development of Laser Cladding Repair Process for First Stage Blading of High-Pressure Turbine for DR-59L Gas Turbine Engine. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):259–270. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_259 EDN: BOFWQZ

ВВЕДЕНИЕ

С быстрым ростом применения лазеров и снижением стоимости лазерных систем лазерная обработка материалов приобретает все большее значение в различных отраслях промышленности. Автомобильная, аэрокосмическая, военно-морская, оборонная и многие другие отрасли широко применяют лазерные технологии для сварки, резки и закалки. Среди применений лазерных технологий лазерная порошковая наплавка получила значительное внимание в последние годы благодаря своему разностороннему потенциалу для обработки материалов, таких как нанесение металлических покрытий, ремонт дорогостоящих компонентов, создание прототипов и даже мелкосерийное производство [1].

Газотурбинный двигатель (ГТД) — это передовой технологический комплекс, состоящий из осевого компрессора, камеры сгорания, турбины, сопла и других модулей, который преобразует энергию газа в механическую работу. Каждая секция осевого компрессора имеет набор лопаток ротора и статора. Рабочие лопатки газотурбинных двигателей представляют собой детали с наивысшим показателем прочности, подвергающиеся наиболее интенсивным условиям эксплуатации: высокие скорости при различных температурах, высокое трение с воздухом и с различным мусором, статические, динамические и циклические нагрузки, из-за чего возникают усталостные трещины, термические напряжения и механические повреждения. Трещины в лопатках могут образовываться вследствие вибрации в различных местах, однако наиболее вероятное возникновение трещин в местах концентрации напряжений, например, у корня лопаток в хвостовой части, на входных и выходных кромках лопаток. Все эти факторы сокращают срок эксплуатации рабочих лопаток и увеличивают вероятность их преждевременного повреждения с существенными проблемами безопасности и финансовыми потерями. Поврежденная или изношенная лопатка отправляется на металлолом или на ремонт, но процесс ремонта имеет ряд особых характеристик, обусловленных используемыми материалами и требованиями к качеству [2, 3].

Восстановление рабочих лопаток газотурбинного двигателя требует особых условий, таких как низкое теплоотделение, локальное и точное добавление материала и сплавление с трудноплавляемыми жаропрочными сплавами. В настоящее время лазерная порошковая наплавка хорошо известна как лучшее решение для восстановления поврежденных лопаток, поскольку технология позволяет выполнить все специфические условия, предъявляемые к восстановлению компонентов газотурбинного двигателя. Связи с этим проводятся многочисленные исследования с целью улучшения процесса восстановления реактивного двигателя путем разработки новых присадочных материалов, оптимизации параметров и автоматизации процесса [4–6].

Обработка жаропрочных материалов на сегодняшний день связана с высокими затратами. Поэтому ремонт и восстановление компонентов становятся первоочередными задачами как для производителей, так и для операторов газовых турбин. Чтобы избежать дорогостоящей замены всей лопатки, проводится процесс ремонта, в большинстве случаев состоящий из нескольких этапов работ: выборка поврежденных участков, восстановление геометрии, механическая обработка и термообработка [7].

Авторы исследования [8] реализовали метод лазерной порошковой наплавки для восстановительного ремонта геометрии пера лопатки турбины, изготовленной из жаропрочного сплава. Для разработки стратегии наплавки и наилучшего формирования наплавленного слоя на перо лопатки авторы производили компьютерное моделирование процесса с измерением температурных полей в основном металле лопатки. Помимо этого, был подобран рабочий режим наплавки, где в качестве присадочного материала выступал сплав Inconel 718, после чего была отработана геометрия пера на подложке. В конечном итоге авторам удалось восстановить перо изношенной лопатки с небольшим припуском.

Также авторы работы [9] продемонстрировали возможность ремонта пера лопатки турбины, изготовленной из жаропрочного сплава, методом лазерной порошковой наплавки. В качестве присадочного материала использовался металлический порошок сплава Stellite-6. Было выявлено, что для того, чтобы свести деформацию лопатки к минимуму необходимо свести к минимуму потребление тепла, используя низкую мощность лазера и избегать накопления тепла на кромках, помимо этого толщина наплавленного слоя должна быть минимальной. При изменении параметров наплавки, таких как расход порошка, мощность лазера и скорость наплавки, в материале может образоваться пористая структура, что снижает его износостойкость и может привести к дефектам на поверхности. Это связано с недостаточной энергией для полного расплавления наплавленного слоя из-за большого отношения высоты валика к его ширине.

МЕТОДИКА, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Объект исследования

Объектом исследования в данной работе является рабочая лопатка турбины высокого давления газотурбинного двигателя ДР-59Л, изготовленная из сплава ЧС-70. Химический состав сплава ЧС-70 представлен в табл. 1.

Для оценки износа рабочих лопаток турбины высокого давления был проведен измерительный контроль поверхностей, которые подвергаются износу, с последующим сравнением размеров 3D-модели рабочей лопатки в программном обеспечении SolidWorks 2020. Размеры

Таблица 1. Химический состав сплава ЧС-70

Table 1. Chemical composition of CS70 alloy

Марка сплава	Содержание элементов, масс. %								
	Ni	Co	Al	Ti	Mo	W	C	Cr	Nb
ЧС-70	Осн.	10,5	2,8	4,6	2,0	5,0	0,08	15,5	0,3

Таблица 2. Химический состав сплава Stellite-21

Table 2. Chemical composition of Stellite-21 alloy

Марка сплава	Содержание элементов, масс. %						
	Ni	Co	Fe	Mo	C	Cr	Si
Stellite-21	3,0	Осн.	1,5	5,5	0,25	27,0	1,0

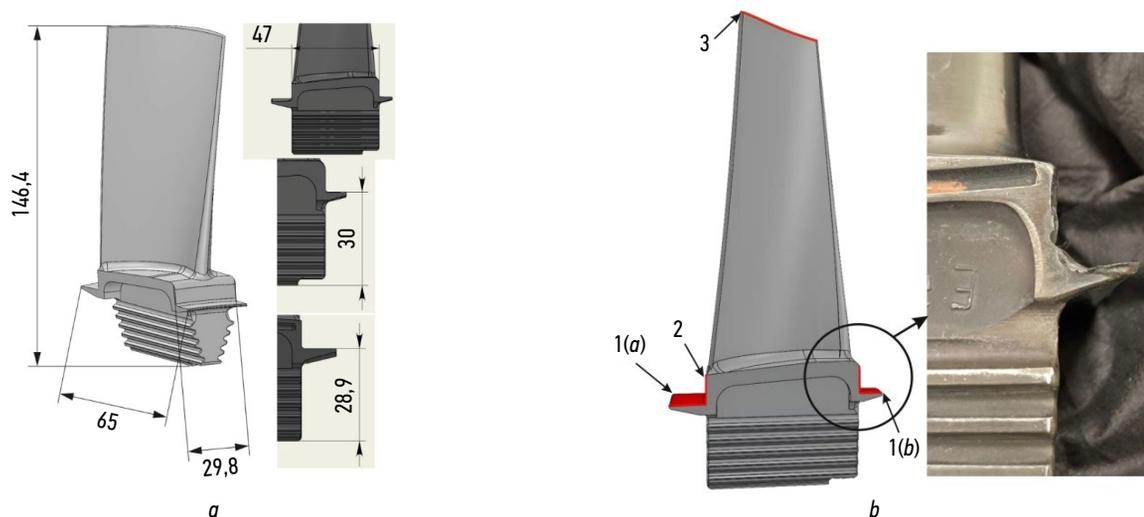


Рис. 1. Внешний вид рабочей лопатки ДР-59Л: *a* — размеры рабочей лопатки; *b* — изношенные поверхности рабочей лопатки.
Fig. 1. View of DR-59L moving blade: *a*, blade dimensions; *b*, worn blade surfaces.

рабочей лопатки приведены на рис. 1, *a* в миллиметрах. Сравнив полученные результаты измерений с исходной 3D-моделью рабочей лопатки, было выявлено, что износу подверглись: торцы замка (рис. 1, *a*, *b*), уплотнительные гребешки (2), а также перо (3), как указано на рис. 1, *b* в виде красных областей.

Описание тепловой модели наплавки пера рабочей лопатки

Для определения температурного состояния поверхности пера рабочей лопатки непосредственно в процессе наплавки необходимо решить задачу нестационарной теплопроводности в условиях действия концентрированного источника тепла. Уравнение, описывающее распространение тепла в трехмерном пространстве, можно записать в следующем виде:

$$\rho(T)C(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (1)$$

где ρ — плотность; C — теплоемкость; $\frac{\partial T}{\partial t}$ — скорость изменения температуры; λ — коэффициент теплопроводности; $\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}$ — градиент температуры.

Граничные условия на лицевой поверхности расчетной области:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_L(x, y), \quad (2)$$

где $\frac{\partial T}{\partial n}$ — температурный градиент; q_L — плотность мощности.

На остальных поверхностях задается условие конвективного теплообмена с окружающей средой (T_0):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_0), \quad (3)$$

где h_c — коэффициент теплообмена.

Решение уравнения теплопроводности (1) с граничными условиями (2), (3) для геометрии, соответствующей рабочей лопатке, было получено методом конечных элементов и реализовано средствами программного пакета Comsol Multiphysics.

Используемый материал для наплавки рабочей лопатки

В табл. 2 приведен химический состав сплава Stellite-21, который выступает в роли материала для

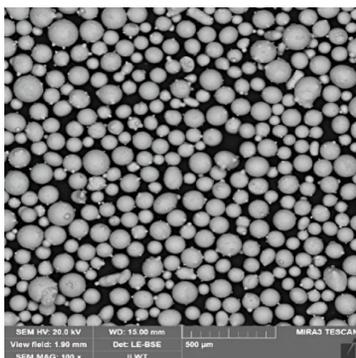


Рис. 2. Морфология порошка Stellite-21.
Fig. 2. Stellite-21 powder morphology.

восстановительной наплавки. Форма частиц порошка сферичная, фракция составляет 40–150 мкм, морфология металлического порошка представлена на рис. 2.

Оборудование лазерной порошковой наплавки и постановка эксперимента

Для восстановления изношенных рабочих лопаток газотурбинного двигателя использовалась установка прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-М, представленная на рис. 3, *а*. Комплекс представляет собой герметичную кабину, в которой расположен одноосевой позиционер и шестиосевой промышленный робот Fanuc M10iD/12. Робот оснащен лазерной головкой (рис. 3, *б*), в качестве источника излучения используется встраиваемый иттербиевый волоконный лазер IPG YLR-1500-U.

Для определения рабочего режима наплавки была проведена серия экспериментальных исследований

Таблица 3. Диапазон варьируемых технологических параметров
Table 3. Range of process variables

Параметр	Мощность (P), Вт	Скорость (V), мм/с	Расход порошка (G), г/мин	Диаметр пятна (D), мм
Диапазон значений	200–400	2–5	2–7	1

с варьированием технологических параметров в конкретном диапазоне, который приведен в табл. 3.

С варьированием параметров обработки была произведена наплавка технологических проб. В качестве материала подложек выступал сплав ЧС-70, в качестве присадочного материала выступал сплав Stellite-21. Сжатая газопорошковая струя подается коаксиально лазерному лучу с помощью струйного сопла, в качестве транспортного газа выступает аргон.

После этого на рабочем режиме наплавки была произведена наплавка пера на образце-свидетеле. Образец-свидетель подвергался неразрушающему контролю, металлографическому анализу, испытанию на растяжение и определению микротвердости.

Исследование макроструктуры образцов

Напавленные образцы подвергались визуальному осмотру (рис. 4) на предмет наличия/отсутствия явных дефектов (трещин, неустойчивых областей). По окончанию визуального контроля осуществлялась пробоподготовка напавленных образцов с целью дальнейшего металлографического исследования. Полученные в рамках



а



б

Рис. 3. Используемое оборудование для лазерной порошковой наплавки: *а* — установка прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-М; *б* — технологический инструмент.

Fig. 3. Laser cladding equipment: *a*, laser direct deposition unit ILIST-M; *b*, process tool.



Рис. 4. Внешний вид технологической пробы.
Fig. 4. View of a process sample.

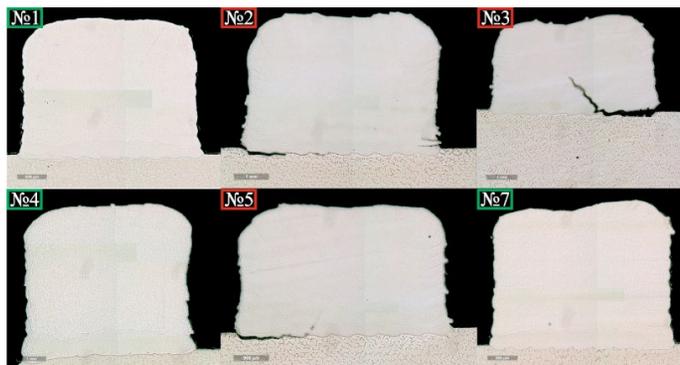


Рис. 5. Поперечное сечение технологических проб.
Fig. 5. Cross-section of process samples.

экспериментальных исследований образцы исследовались с помощью инвертированного металлографического микроскопа Leica DMi8A и сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3. Макрошлифы технологических проб на разных режимах обработки представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, образцы на режимах обработки № 1, № 4 и № 7 не имеют такие дефекты как трещины и несплавления, также все 3 режима наплавки показали устойчивость формирования слоев по высоте. Помимо этого, на режиме № 1 можно наблюдать небольшое скопление мелких пор в пределах допустимого.

Оборудование для испытаний на механические свойства

Для определения механических свойств образца-свидетеля, который представлял из себя восстановленное перо рабочей лопатки, были проведены испытания на одноосное растяжение. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Shimadzu AG-50kNX. Схема вырезки образцов представлена на рис. 6. Для измерения микротвердости был использован микротвердомер Future-Tech FM-310. Расстояние между отпечатками измерений составляло 150 мкм, измерения проводились по методу Виккерса с нагрузкой в 300 г.



Рис. 6. Схема вырезки образцов для механического испытания.
Fig. 6. Sample cutting diagram for mechanical tests.

Стратегии наплавки изношенных поверхностей рабочей лопатки

Для наплавки торца пера рабочей лопатки необходимо закладывать припуск наплавленного металла на дальнейшую механическую обработку 0,5 мм. Поскольку диаметр пятна равен 1 мм, необходимо производить наплавку таким образом, чтобы центр пятна был на кромке пера, чтобы получить необходимый припуск наплавленного металла. В качестве стратегии наплавки пера рабочей лопатки была составлена следующая последовательность формирования валиков, которая отображена на рис. 7, где стрелками указано направление перемещения технологического инструмента. Смещение между валиками (ΔX) составляет 2/3 от ширины валика.

Первый валик формируется по кромке пера рабочей лопатки, как упоминалось выше, начиная с выходной кромки заканчивая также в области выходной кромки пера. Старт наплавки второго валика располагается по центру выходной кромки и повторяет траекторию движения 1-го

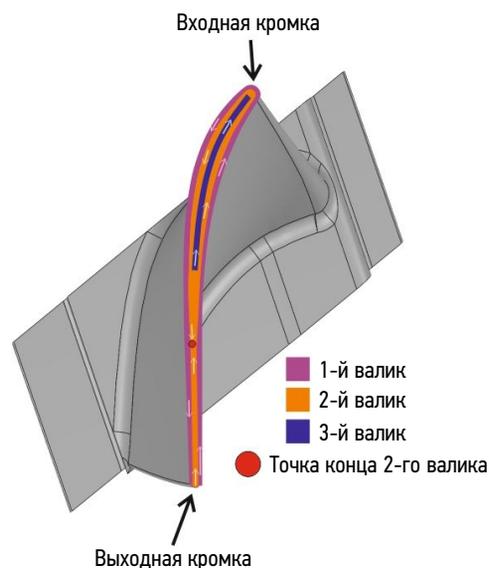


Рис. 7. Стратегия наплавки пера рабочей лопатки.
Fig. 7. Blade airfoil deposition strategy.

валика, однако стоит, заметить, что наплавка завершается в тот момент, когда расстояние между центрами сформированных соседних валиками меньше значения ΔX (красная точка на рис. 7), тем самым замыкая траекторию 2-го валика. Завершающий третий валик начинает и заканчивает свое формирование в той области, где 2-й валик не обеспечивает перекрытие наплавленного металла.

Для наплавки торцов замка и уплотнительных гребешков рабочей лопатки, необходимо сперва произвести наплавку галтели, как указано на рис. 8, *a*, где цифрами обозначен порядок наплавки валиков, т.е. сперва формируется центральный валик, а затем соседние валики, наплавка производится в 3 слоя. После наплавки галтели производится наплавка торцов замка и уплотнительных гребешков, как представлено на рис. 8, *b*.

При наплавке торца замка технологический инструмент наклоняется на 30 градусов, и начало наплавки осуществляется с границы крайнего валика, полученного на предыдущем этапе. Наплавка осуществляется до конца торца в 2 слоя. Восстановление уплотнительного гребешка осуществляется аналогично.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты моделирования наплавки пера рабочей лопатки

Поскольку режимы наплавки № 1, № 4 и № 7 имеют одинаковые технологические параметры, за исключением мощности, численное моделирование сводится к исследованию влияния мощности лазерного излучения на температурное поле лопатки в области наплавки. Соответственно, параметры мощности лазерного излучения варьировались в пределах от 200 Вт до 300 Вт с шагом 50 Вт, при постоянной скорости перемещения рабочего инструмента 3 мм/с, размера пятна лазерного излучения 1 мм, расхода присадочного материала 2 г/мин. Траектория движения точечного источника тепла в модели соответствует стратегии наплавки пера рабочей лопатки. Фрагменты модели наплавки пера рабочей лопатки в виде сверху представлены на рис. 9 с разными промежутками времени, с установленной термопарой, точка А на рис. 10.

Как говорилось ранее, сложная геометрия пера рабочей лопатки приводит к тому, что размеры ванны

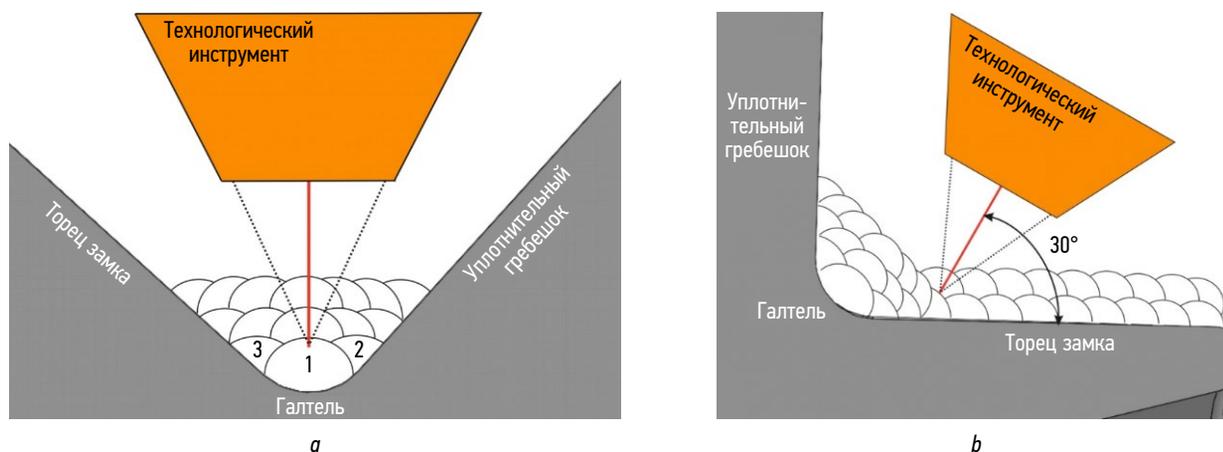


Рис. 8. Схема наплавки изношенных поверхностей: *a* — схема наплавки галтели; *b* — схема наплавки торца замка.

Fig. 8. Worn surface deposition diagram: *a*, fillet deposition diagram; *b*, blade root deposition diagram.

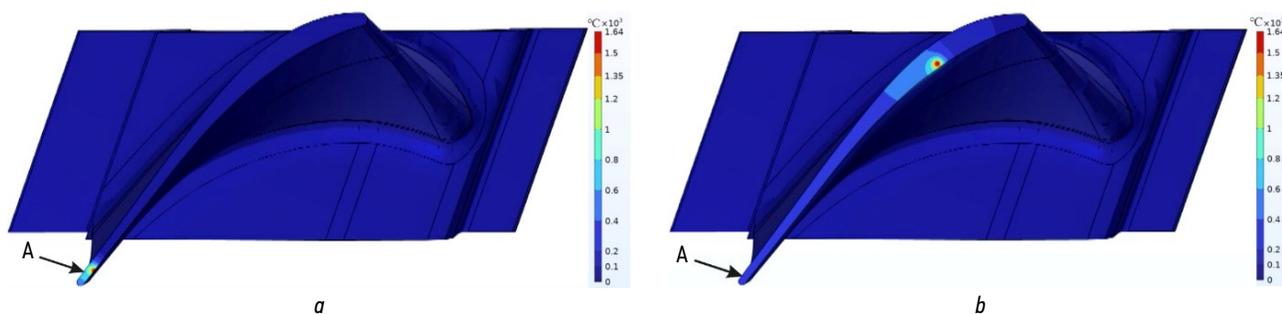


Рис. 9. Модель наплавки пера рабочей лопатки при мощности 300 Вт: *a* — наплавка в момент времени 2 секунды; *b* — наплавка в момент времени 73 секунды; А — точка установки термопары.

Fig. 9. Deposition model of the blade airfoil at 300 W: *a*, deposition at 2 seconds; *b*, deposition at 73 seconds; A, thermocouple installation point.

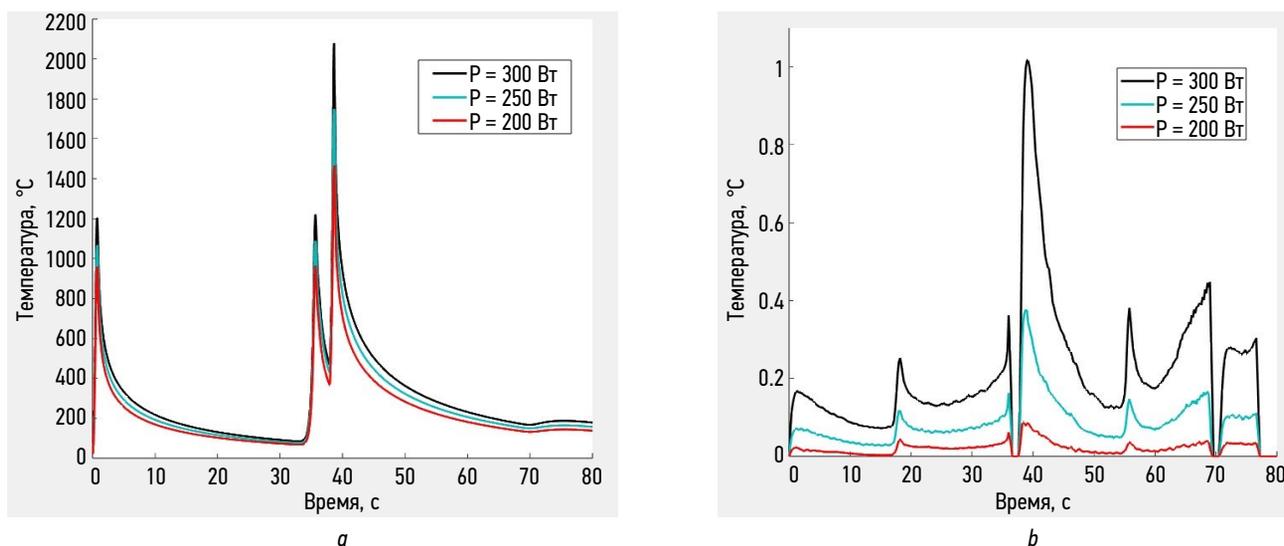


Рис. 10. Результаты моделирования: *a* — термический цикл в точке А при различных значениях мощности лазерного излучения; *b* — зависимость объема ванны расплава при различных значениях мощности лазерного излучения.

Fig. 10. Modeling outcome: *a*, thermal cycle at point A at different laser power; *b*, molten pool volume at different laser power.

расплава, определяемые температурным полем, зависят от пространственного положения ванны на поверхности пера рабочей лопатки. Таким образом, наибольший интерес вызывает область с наименьшей толщиной, подвергающаяся вследствие этого наибольшему нагреву, что соответствует выходной кромке пера рабочей лопатки.

На рис. 10, *a* представлены термические циклы в точке А, которая отображена на рис. 9, в процессе наплавки при различных мощностях лазерного излучения. На рис. 10, *b* приведено сравнение размеров ванны расплава также при варьировании мощности.

Как и следовало ожидать, с увеличением мощности лазерного излучения растут значения температур и размеры ванны расплава соответственно. Однако, согласно результатам численного анализа, при мощности 200 Вт на первом валике объем ванны принимает значения близкие к 0, что будет означать отсутствие сплавления присадочного и основного материалов. Максимальный объем ванны наблюдается в начале второго валика, когда лазерный луч проходит через область выходной кромки пера, при этом в данной зоне температура остается все еще высокой после предыдущего валика. При мощности 300 Вт зона, температура которой превышает температуру плавления, формируется по всей ширине лицевой поверхности лопатки в области выходной кромки пера, а объем жидкой фазы становится чрезмерно большим и превышает в три раза объем ванны при мощности

200 Вт. При такой мощности излучения (300 Вт) велика вероятность возникновения прожога выходной кромки пера рабочей лопатки. Таким образом результаты численного анализа показали, что мощность 200 Вт является недостаточной по причине отсутствия или недостаточного сплавления присадочного материала, а мощность 300 Вт является избыточной, поскольку наблюдается чрезмерный рост объема зоны с температурой, превышающей температуру плавления материала. Поэтому для наплавки пера, торца замка и уплотнительного гребешка рабочей лопатки была выбрана мощность 250 Вт, что соответствует режиму № 4, который приведен в табл. 4, где ΔZ — смещение по высоте.

Результаты анализа макрошлифов образца-свидетеля

В результате металлографического исследования были получены макрошлифы образца-свидетеля в продольном и поперечном сечении, представленные на рис. 11.

Как видно из рис. 11, в структуре наплавленного образца не наблюдаются внутренние дефекты, такие как трещины и несплавления. Однако наблюдаются единичные поры на границах валиков в пределах допустимого.

Механические исследования

После получения металлографии были проведены испытания измерения микротвердости по длине образца. По результатам измерения микротвердости, представленных в табл. 5, был построен график изменения микротвердости, представленный на рис. 12.

Из результатов измерения микротвердости по длине образца видно, что микротвердость основного

Таблица 4. Рабочий режим наплавки рабочих лопаток

Table 4. Operational conditions of the blade deposition process

<i>P</i> , Вт	<i>V</i> , мм/с	<i>G</i> , г/мин	ΔX , мм	ΔZ , мм	<i>D</i> , мм
250	3	2	0,66	0,4	1

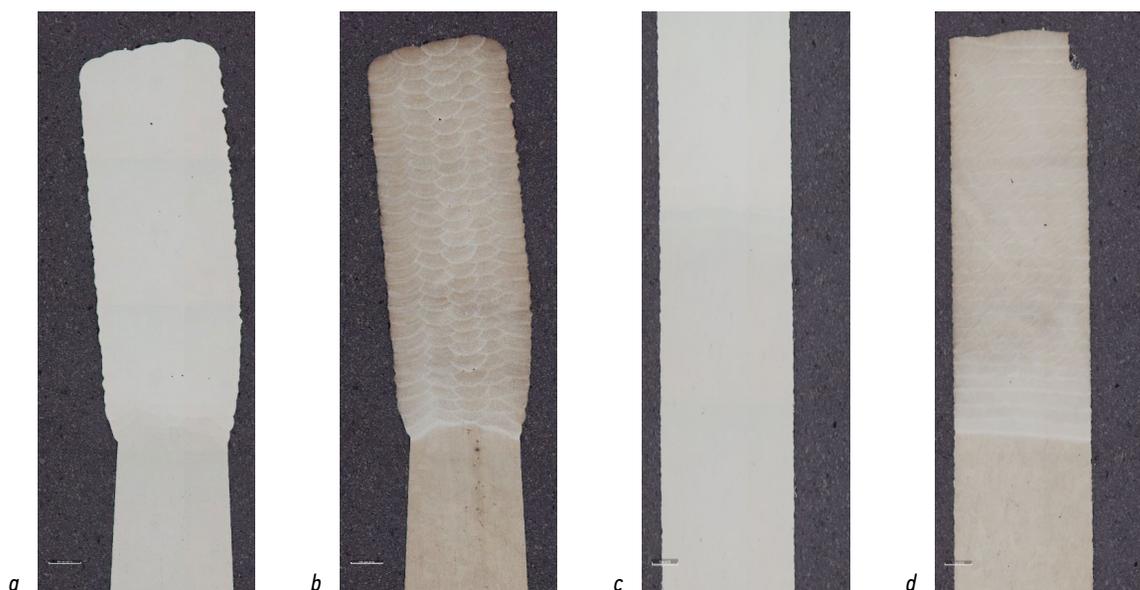


Рис. 11. Поперечное и продольное сечение образца-свидетеля: *a* — до травления; *b* — после травления; *c* — до травления; *d* — после травления.
Fig. 11. Cross-section and longitudinal section of the check test piece: *a*, before etching; *b*, after etching; *c*, before etching; *d*, after etching.

Таблица 5. Результаты измерений микротвердости

Table 5. Microindentation hardness measurements

Сплав	Номер измерения, микротвердость, HV									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЧС-70	428	433	447	448	441	398	349	339	350	372
Stellite-21	415	429	425	429	428	415	441	432	434	427

Таблица 6. Механические свойства сплавов Stellite-21, ЧС-70 и образцов № 1, № 2

Table 6. Mechanical properties of Stellite-21, CS70, and test pieces 1 and 2

Сплав/№ образца	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности, σ_B , МПа	Относительное удлинение, δ , %
ЧС-70	750	900	3,0
Stellite-21	550	724	9,0
1	692	995	6,7
2	743	982	4,5

и присадочного материала схожи. Однако в переходной зоне наблюдается небольшой спад микротвердости, что соответствует области перемешивания сплавов и образования периферийной структуры.

В результате проведения механического испытания на одноосное растяжение был определен предел прочности, предел текучести и относительное удлинение образцов (№ 1, № 2), образцы при этом разрушились в зоне присадочного материала. Механические свойства сплавов Stellite-21 и ЧС-70 согласно стандартам [10, 11] и полученных образцов (№ 1, № 2) приведены в табл. 6.

Результаты испытаний показывают повышенную прочность, достаточно хорошее относительное удлинение, в особенности у первого образца. Предел текучести близок к значениям сплава ЧС-70, изготовленного традиционными методами.

Результат ремонта рабочих лопаток

Результат ремонта рабочих лопаток представлен на рис. 13.

После наплавки изношенных поверхностей рабочих лопаток было проведено измерение восстановленной геометрии. В результате проведенных измерений было выявлено, что все размеры отремонтированных сегментов рабочих лопаток соответствуют размерам 3D-модели лопатки с учетом дополнительного припуска в 1 мм на механическую обработку. Результаты измерений восстановленной геометрии представлены в табл. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения работы был разработан технологический процесс восстановления рабочих лопаток турбины

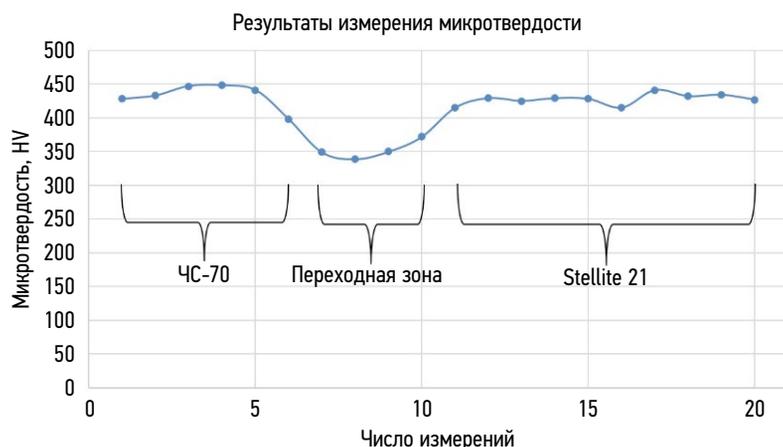


Рис. 12. График результатов измерения микротвердости.
Fig. 12. Microindentation hardness graph.

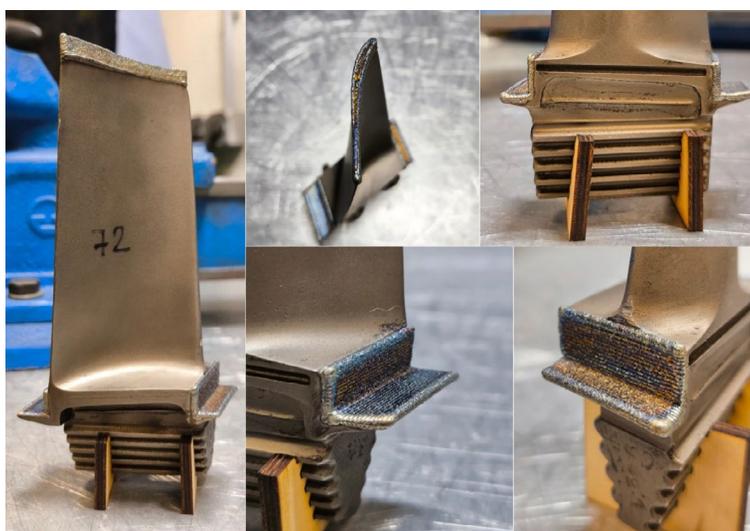


Рис. 13. Внешний вид восстановленной рабочей лопатки.
Fig. 13. View of the restored blade.

Таблица 7. Результаты измерений восстановленной геометрии рабочих лопаток

Table 7. Physical dimensions of the restored blades

Поверхность	Перо, мм	Торец замка (a), мм	Торец замка (b), мм	Уплотнительный гребешок, мм
Значение	147,5–148	30–30,4	31,1–31,5	48,1–48,5

высокого давления ДР-59Л газотурбинного двигателя методом лазерной наплавки.

Определены режимы процесса лазерной наплавки, обеспечивающие бездефектную структуру и стабильную геометрию наплавляемых технологических проб. Были разработаны стратегии наплавки изношенных поверхностей рабочих лопаток, куда входит наплавка пера, галтелей, торцов замка и уплотнительного гребешка.

Для определения рабочего режима наплавки был смоделирован процесс восстановления пера рабочей лопатки с варьированием мощности лазерного излучения, где было выявлено, что при мощности 200 Вт объем ванны на поверхности пера рабочей лопатки предельно мал, ввиду того что большая часть мощности поглощается на расплавление

присадочного материала. И поскольку при 300 Вт наблюдается чрезмерный рост температуры, превышающей температуру плавления материала, особенно в зоне наименьшей толщины пера, в области выходной кромки, был выбран рабочий режим наплавки с мощностью в 250 Вт.

В результате анализа макрошлифов не были обнаружены дефекты в структуре наплавленного материала, за исключением образования единичных пор на границах валиках в пределах допустимого.

Результаты испытаний на одноосное растяжение показали повышенный предел прочности и достаточно хорошее относительное удлинение по сравнению с механическими свойствами присадочного и основного материала, изготовленных традиционными методами.

Тем самым, метод лазерной порошковой наплавки позволяет производить ремонт рабочих лопаток первой ступени турбины высокого давления газотурбинного двигателя ДР-59Л, не прибегая к изготовлению новых лопаток.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.В. Тюков — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, разработка методологии, создание изображений, анализ данных, проведение исследования. Г.Г. Задьян — проверка данных, контроль, разработка методологии. Д.В. Мукин — моделирование в программном обеспечении, анализ данных, создание изображений. Р.В. Мендагалиев — проведение исследования, анализ данных, создание изображений. Р.С. Корсмик — руководство проектом, утверждение финальной версии, получение финансирования. 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. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках проекта «Жаропрочные никелевые сплавы для аддитивных технологий: дизайн и исследование структуры и свойств» № 23-19-00622.

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 использовались.

ADDITIONAL INFO

Author contributions: S.V. Tyukov: investigation, writing—original draft, methodology, visualization, formal analysis; G.G. Zadykhan: validation, supervision, methodology; D.V. Mukin: software, formal analysis, visualization; R.V. Mendagaliev: investigation, formal analysis, visualization; R.S. Korsmik: supervision, writing—review & editing, funding acquisition. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: The study was supported by the Russian Science Foundation as part of the project No. 23-19-00622, entitled Heat-resistant Nickel Alloys for Additive Technologies: Design and Study of Structure and Properties.

Disclosure of interests: The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. *Laser Cladding*. New York: Boca Raton, CRC Press; 2004.
2. Богуслав В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Запорожье: ОАО Мотор Сич. 2003.
3. Zheng J., Li Z., Chen X. Worn area modeling for automating the repair of turbine blades // *Int J Adv Manuf Technol*. 2006. Vol. 29. P. 1062–1067. doi: 10.1007/s00170-003-1990-6
4. Gao J., Folkes J., Yilmaz O., Gindy N. Investigation of a 3D non-contact measurement-based blade repair integration system // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2015. С. 34–41.
5. Richter K., Orban S., Nowotny S. Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades In: *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*. 2004. doi: 10.2351/1.5060222
6. Jones J., McNutt P., Tosi R., et al. Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine. In: *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication*

Symposium — An Additive Manufacturing Conference, SFF. 2015. P. 821–827.

7. Nicolaus M., Rottwinkel B., Alfred I., et al. Future regeneration processes for high-pressure turbine blades // *CEAS Aeronaut J*. 2018. Vol. 9. P. 85–92. doi: 10.1007/s13272-017-0277-9

8. Uenal T., Gahn L., Kittel J., et al. Process Development for Tip Repair of Complex Shaped Turbine Blades with IN718 // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 47. P. 1050–1057. doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.114 EDN: QQNHKW

9. Brandt M., Sun S., Alam N., et al. Laser cladding repair of turbine blades in power plants: from research to commercialization // *International Heat Treatment and Surface Engineering*. 2019. Vol. 3, N. 3. P. 105–114. doi: 10.1179/174951409X12542264513843 EDN: GKKZTA

10. ТУ 14-1-3658-83 Прутки литые из жаропрочного литейного сплава марок ХН58КВТЮМБЛ-ВИ(ЧС70-ВИ), (СН25-ВИ) : дата введения 1984-06-01. М.: Стандартинформ, 2001.

11. Material property data : official site. Дата обращения: 11.06.2024. Режим доступа: <https://matweb.com>

REFERENCES

1. Toyserkani E, Khajepour A, Corbin S. *Laser Cladding*. New York: Boca Raton, CRC Press; 2004.
2. Boguslayev VA, Muravchenko FM, Zhemanyuk PD, et al. *Technological support of operational characteristics of gas turbine engine parts*. Zaporozhye: Motor Sich OJSC; 2003. (In Russ.)
3. Zheng J, Li Z, Chen X. Worn area modeling for automating the repair of turbine blades. *Int J Adv Manuf Technol*. 2006;29:1062–1067. doi: 10.1007/s00170-003-1990-6
4. Gao J, Folkes J, Yilmaz O, Gindy N. Investigation of a 3D non-contact measurement-based blade repair integration system. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2015;34–41.
5. Richter K, Orban S, Nowotny S. Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades. In: *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*. 2004. doi: 10.2351/1.5060222
6. Jones J, McNutt P, Tosi R, et al. Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine. In: *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication*

Symposium — An Additive Manufacturing Conference, SFF. 2015:821–827.

7. Nicolaus M, Rottwinkel B, Alfred I, et al. Future regeneration processes for high-pressure turbine blades. *CEAS Aeronaut J*. 2018;9:85–92. doi: 10.1007/s13272-017-0277-9

8. Uenal T, Gahn L, Kittel J, et al. Process Development for Tip Repair of Complex Shaped Turbine Blades with IN718. *Procedia Manufacturing*. 2020;47:1050–1057. doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.114 EDN: QQNHKW

9. Brandt M, Sun S, Alam N, et al. Laser cladding repair of turbine blades in power plants: from research to commercialization. *International Heat Treatment and Surface Engineering*. 2019;3(3):105–114. doi: 10.1179/174951409X12542264513843 EDN: GKKZTA

10. TU 14-1-3658-83 Cast rods from heat-resistant casting alloy grades KhN58KVYUМBL-VI (ChS70-VI), (SN25-VI): date of introduction 1984-06-01. Moscow: Standartinform; 2001. (In Russ.)

11. Material property data: official site. Accessed: 11.06.2024. Available from: <https://matweb.com>

ОБ АВТОРАХ

***Степан Витальевич Тюков**, инженер технологического отдела, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; eLibrary SPIN: 5740-6330; e-mail: step@tukv.ru

Григорий Григорович Задьян, специалист технологического отдела, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 5240-2062; e-mail: gzadykyan@mail.ru

Дмитрий Вячеславович Мукин, младший научный сотрудник, специалист отдела моделирования и информационных технологий, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 7660-7455; e-mail: mukin@ilwt.smtu.ru

Руслан Валисович Мендагалиев, канд. техн. наук, младший научный сотрудник, начальник отдела исследований и разработки новых материалов, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 5187-4723; e-mail: ruslanm888@mail.ru

Рудольф Сергеевич Корсмик, канд. техн. наук, младший научный сотрудник, начальник технологического отдела, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: r.korsmik@ltc.ru

AUTHORS' INFO

***Stepan V. Tyukov**, engineer of technological department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: Lotsmanskaya, 3, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 5740-6330; e-mail: step@tukv.ru

Grigory G. Zadykyan, specialist of technological department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 5240-2062; e-mail: gzadykyan@mail.ru

Dmitriy V. Mukin, junior researcher, specialist of the modelling and information technology department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 7660-7455; e-mail: mukin@ilwt.smtu.ru

Ruslan V. Mendagaliev, Cand. Sci. (Engineering), junior researcher, Head of research and development of new materials department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 5187-4723; e-mail: ruslanm888@mail.ru

Rudolf S. Korsmik, Cand. Sci. (Engineering), junior researcher, Head of technological department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: r.korsmik@ltc.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author