

Оригинальная статья

УДК 53.09:54-116

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-72-82

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВА ХН65ВМТЮ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

© 2024 г. Д. В. Комаров^{1,2}, С. В. Коновалов^{1,3}, Ю. Ф. Иванов⁴, И. А. Панченко³

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

²АО «Газпром диагностика» (Россия, 196158, Санкт-Петербург, ул. Пулковское шоссе, 40, корпус 4, литера D, помещение D8039)

³Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

⁴Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

Аннотация. Одним из перспективных методов повышения эксплуатационных характеристик деталей горячего тракта газотурбинных двигателей является изменение физико-химических свойств поверхностных слоев основного материала за счет применения радиационно-пучковых технологий, а именно импульсной электронно-пучковой обработки (ЭПО). В работе рассмотрены результаты модификации электронным лучом образцов, вырезанных из замковой части рабочих лопаток турбины высокого давления наземного газотурбинного компрессора ГТК-10-4 после эксплуатации в течение 37444 ч, выполненных из жаропрочного сплава на никелевой основе ХН65ВМТЮ без защитного покрытия. Изменяемым параметром обработки выбрана плотность энергии электронного пучка E_e , которая составила 15, 25 и 35 Дж/см², длительность его воздействия и количество импульсов не варьировались. Измерение микротвердости и нанотвердости модифицированных слоев, а также исследование трибологических характеристик (коэффициента трения и скорости износа поверхностного слоя) поверхности обработанных образцов позволили определить оптимальный режим ЭПО из рассматриваемых, плотность энергии при котором составила 15 Дж/см². Выдвинуты предположения о возможных причинах деградации трибологических свойств поверхностного слоя сплава относительно исходного состояния после ЭПО на других режимах, связанные с полученной структурой модифицированных слоев и наличием в нем трещин и объемных дефектов. Подтверждены основные положения теории направленной кристаллизации в условиях многокомпонентности сплава и высоких скоростей охлаждения поверхностного слоя. Отмечена невозможность применения импульсной ЭПО в условиях массового производства как самостоятельного финишного метода обработки. Использование указанной технологии возможно лишь при условии применения определенных режимов с последующей шлифовкой, необходимой для выравнивания развитого микрорельефа обработанной поверхности, а также снятия слоя металла в объеме, необходимом для устранения поверхностных трещин.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, износостойкость, коэффициент трения, микротвердость, нанотвердость, электронно-пучковая обработка

Финансирование. Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

Для цитирования: Комаров Д.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Модификация поверхностного сплава ХН65ВМТЮ методом импульсной электронно-пучковой обработки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):72–82. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-72-82](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-72-82)

Original article

MODIFICATION OF THE SURFACE LAYER OF THE XH65BMTIO ALLOY BY THE METHOD OF PULSE ELECTRON BEAM TREATMENT

© 2024 D. V. Komarov^{1,2}, S. V. Konovalov³, Y. F. Ivanov⁴, I. A. Panchenko³

¹Samara National Research University (34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation)

²AO «Gazprom diagnostika» (40, housing 4, letter D, room D8039, Pulkovskoe shosse, Sankt-Peterburg, 196158, Russian Federation)

³Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

⁴Institute of High Current Electronics SB RAS (2/3 pr. Akademicheskij, Tomsk, 634055, Russian Federation)

Abstract. One of the promising methods for increasing the performance characteristics of parts of the hot path of gas turbine engines is to change the physicochemical properties of the surface layers of the base material through the use of radiation beam technologies, namely pulsed electron beam processing (EBP). The paper examines the results of modification by an electron beam of samples cut from the locking part of the rotor blades (RB) of the high-pressure turbine (HPT) of the ground-based gas turbine compressor GTK-10-4 after operation for 37,444 hours, made of a heat-resistant nickel-based alloy XH65BMTIO without protective coating. The variable processing parameter was the electron beam energy density E_s , which was $E_s = 15, 25$ and 35 J/cm^2 , the duration of its exposure τ , as well as the number of pulses N did not vary. Measurement of the microhardness and nanohardness of the modified layers, as well as the study of the tribological characteristics (friction coefficient μ and wear rate of the surface layer V_{is}) of the surface of the treated samples made it possible to determine the optimal EPO mode from those considered, the energy density at which was $E_s = 15 \text{ J/cm}^2$. Suggestions have been put forward about the possible reasons for the degradation of the tribological properties of the surface layer of the alloy relative to the initial state after EPB in other modes, related to the resulting structure of the modified layers and the presence of cracks and volumetric defects in it. The main provisions of the theory of directional crystallization under conditions of multicomponent alloy and high cooling rates of the surface layer have been confirmed. The impossibility of using pulsed EPB in mass production conditions as an independent finishing method of processing was noted. The use of this technology is possible only if certain modes are used with subsequent grinding necessary to level the developed microrelief of the treated surface, as well as remove the metal layer in the amount necessary to eliminate surface cracks.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, wear resistance, coefficient of friction, micro-hardness, nanohardness, electron beam processing

Funding. Research was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-00087-2401.

For citation: Komarov D.V., Konovalov S.V. Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. Modification of the surface layer of the XH65BMTIO alloy by the method of pulse electron beam treatment. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):72–82. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-72-82](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-72-82)

Введение

В последние 15 – 20 лет производителям электронно-пучковых установок удалось произвести оборудование, обеспечивающее высокую плотностью энергии электронного луча в сочетании с низким ускоряющим напряжением, высокую энергетическую эффективность, широкий диапазон регулировки параметров и хорошую воспроизводимость импульсов, что позволило рассматривать электронно-пучковую обработку как наиболее перспективную технологию, поз-

воляющую получать новые уникальные физико-механические свойства обрабатываемых материалов, а, как следствие, формировать требуемые эксплуатационные свойства при обработке твердых тел из металлических материалов [1].

Сущность процесса электронно-пучковой обработки (ЭПО) заключается в преобразовании кинетической энергии потока электронов, сформированных в вакууме, в тепловую энергию в зоне взаимодействия с обрабатываемым твердым телом (мишенью). Взаимодействие между ускоренными

электронами и материалом мишени представляет собой сложный процесс. Как правило, одним из основных его результатов является изменение теплового поля в приповерхностных слоях обрабатываемого твердого тела, которое может сопровождаться нагревом, плавлением, испарением и структурно-фазовыми превращениями материала в зависимости от его свойств и условий обработки.

Необходимо отметить, что существующие математические модели расчета пространственно-временных характеристик теплового поля многокомпонентных сплавов имеют целый ряд допущений, что, в конечном счете, не позволяет точно оценить значение температуры в отдельных точках мишени со временем при ее нагреве и последующем охлаждении. А как следствие, не позволяет прогнозировать эволюцию механических и эксплуатационных свойств деталей и изделий после ЭПО на различных режимах. Именно поэтому широкое внедрение указанной технологии в промышленное производство возможно только после проведения большого объема испытаний и прикладных научных исследований.

Анализ работ, опубликованных отечественными авторами за последние годы [2; 3], позволил выделить несколько направлений, по которым развивалось применение ЭПО с целью модификации поверхности твердых тел из различных металлов и сплавов:

- ЭПО поверхностных слоев с применением классической термообработки или без нее;
- ЭПО поверхностных слоев после электро-взрывного легирования;
- ЭПО поверхностных слоев после наплавки;
- ЭПО поверхностных слоев аддитивных сплавов.

Выполненные научные исследования структурно-фазового состояния модифицированных электронным пучком образцов-свидетелей методами современного материаловедения, а также определение механических характеристик и проведение испытаний по установлению некоторых эксплуатационных свойств как до, так и после проведения ЭПО позволили не только принципиально подтвердить применимость указанной технологии к различным металлам и сплавам, но и определить оптимальные режимы электронного пучка в каждом рассматриваемом случае.

Большинство имеющихся на сегодняшний день работ посвящено изучению модифицирующего влияния ЭПО на стали, титановые и алюминидные сплавы, реже рассматриваются сплавы на никелевой и медной основе.

Целью настоящей работы стало изучение модифицирующего воздействия импульсной ЭПО на свойства жаропрочного никелевого сплава ХН65ВМТЮ без защитного покрытия, применяемого для изготовления лопаток и дисков турбин

наземных газотурбинных двигателей (ГТД), а также определение возможности применения технологии в массовом производстве.

Эволюцию свойств поверхностного слоя после обработки предложено определять путем установления коэффициента трения μ и скорости износа поверхности образцов $V_{из}$, а также измерения микротвердости HV , нанотвердости V и модуля упругости E модифицированной зоны. Необходимо отметить, что до настоящего времени работа по подбору оптимальных режимов электронного пучка с целью обработки указанного сплава (а также родственных с ним материалов без защитных покрытий) в РФ не выполнялась. Наиболее близкие научные исследования отечественных авторов опубликованы в работах [4 – 7]. Однако изученные в этих работах сплавы содержали существенное количество кобальта и имели защитные покрытия системы Ni-Cr-Al-Y. В исследованиях зарубежных авторов использовали материалы, содержание никеля в которых существенно ниже, чем в сплаве ХН65ВМТЮ [8; 9].

Материал и принципы исследования

В качестве материала использовали образцы размером $10 \times 10 \times 10$ мм из замковой части рабочих лопаток турбины высокого давления ГТК-10-4 после эксплуатации в течение 37444 ч, изготовленные из жаропрочного сплава ХН65ВМТЮ на никелевой основе следующего химического состава, мас. %: 0,02 – 0,04 С; 15,65 – 16,09 Cr; 8,85 – 9,4 W; 3,72 – 4,05 Mo; 1,32 – 1,47 Al; 1,29 – 1,54 Ti; 0,1 – 0,18 Si; 0,07 – 0,09 Mn; 0,02 Cu; 0,008 – 0,01 В; 0,025 Се; 0,005 S; 0,005 Р; остальное Ni. Перед обработкой поверхность образцов предварительно шлифовали и полировали до зеркального блеска. Электронно-пучковую обработку выполняли на вакуумной импульсной установке «СОЛЮ» Института сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН, Россия, г. Томск), на трех режимах, изменяя плотность энергии электронного пучка E_e . Длительность воздействия электронного пучка электронов t , а также количество импульсов воздействия N не изменялись ($\tau = 200$ мкс; $N = 1$). Трибологические свойства определялись в геометрии диск – штифт с помощью трибометра (CSEM, Швейцария) при комнатной температуре и влажности. В качестве контртела использовался шарик из карбида вольфрама диаметром 6 мм, радиус трека сосавлял 2 мм, скорость вращения – 25 мм/с, нагрузка – от 0,5 до 5 Н, дистанция до остановки – 50 м.

Объем износа поверхностного слоя определяли после установления геометрических размеров образовавшегося трека с помощью лазерного оптического профилометра MicroMeasure 3D Sation (Stil, Франция). Скорость износа рассчитывали по формуле:

$$V_{\text{из}} = \frac{2\pi R A_{\text{ср}}}{\sum_{i=1}^{n=2000} F_i L_i}, \quad (1)$$

где $V_{\text{из}}$ – скорость износа, $\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$; R – радиус трека, мм ; $A_{\text{ср}}$ – средняя площадь поперечного сечения канавки износа, мм^2 ; $n = 2000$ – время, в течение которого выполнялись испытания, с ; F_i – величина приложенной нагрузки к контртелу на i -ом временном отрезке, Н ; L_i – пройденная шариком дистанция на i -ом временном отрезке, м .

Микротвердость определялась на различных глубинах от обрабатываемой поверхности в соответствии с ГОСТ 9450 – 76 на микротвердомере HV-1000 (TIME Group Inc., Китай) методом вдавливания правильной четырехгранной алмазной пирамиды в течение 10 с при нагрузке 0,4903 Н (50 г).

Нанотвердость и модуль упругости определялись на различных глубинах от обрабатываемой поверхности в соответствии с ГОСТ Р 8.748 – 2011 на сканирующем нанотвердомере НаноСкан-4Д (ФГБНУ ТИСНУМ, Россия) методом вдавливания алмазного наконечника Берковича с совместным измерением перемещения наконечника ($S = 10000$ Н/мин) и силы ($F = 0,30$ мН), прикладываемой к наконечнику.

Микрошлифы образцов исследовались методом световой оптической микроскопии с 50 – 500-кратным увеличением на бинокулярном оптическом металлографическом инвертированном микроскопе МЕТАМ ЛВ-31 и методом сканирующей электронной микроскопии на настольном сканирующем электронном микроскопе Thermo Scientific Phenom (Phenom-World BV, Нидерланды) с программным пакетом Pro Suite.

Основные результаты

Шероховатость поверхности лопаток турбин ГТД существенно влияет на коэффициент полезного действия всей установки [10; 11], а также на образование усталостных трещин [12]. Именно поэтому при выборе способа изготовления и технологии финишной обработки рабочих лопаток данный фактор требуется учитывать.

По результатам испытаний среднее значение коэффициента трения сплава в исходном состоянии составило 0,694. После обработки этот показатель увеличился на всех режимах и составил от 0,697 до 0,803. Однако необходимо учитывать, что негативная эволюция коэффициента во многом объясняется дистанцией контр-тела и нагрузкой, которая к нему прикладывается. Обусловлено это тем, что в некоторый момент времени поверхностный (упрочненный) слой образцов протирается.

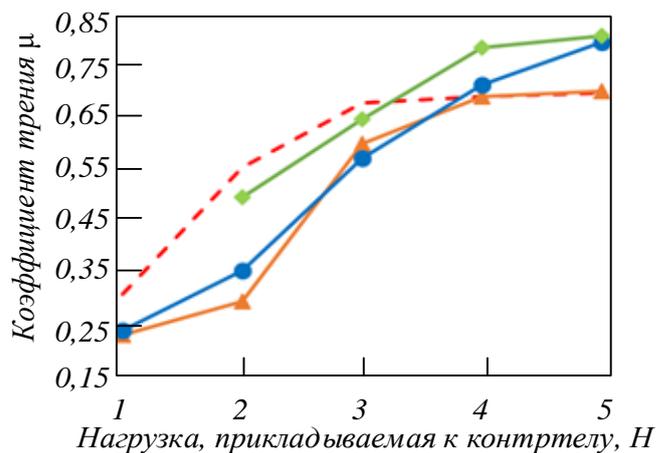


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения μ образца в исходном состоянии (---), после обработки при E_s , равном 15, 25 и 35 Дж/см² (▲, ●, ◆), от минимальной нагрузки, прикладываемой к контртелу трибометра:

1 – 2 Н; 2 – 3 Н; 3 – 3,5 Н; 4 – 4 Н; 5 – 5 Н

Fig. 2. Dependence of the coefficient of friction μ of the sample in the initial state (---), after processing at E_s equal to 15, 25 and 35 J/cm² (▲, ●, ◆) on the minimum load applied to the counterbody of the tribometer:

1 – 2 Н; 2 – 3 Н; 3 – 3,5 Н; 4 – 4 Н; 5 – 5 Н

С этого момента результаты испытаний характеризуют уже свойства не модифицированной поверхности, а подповерхностного слоя. Именно поэтому для более точной оценки коэффициента трения, а, соответственно, и установления оптимального режима ЭПО указанный показатель предложено оценивать при небольших нагрузках, действующих на контртело.

Для решения поставленной задачи исходный массив данных был разделен на четыре диапазона по прикладываемой к шариком нагрузке: 2, 3, 3,5 и 4 Н. Затем для каждого режима ЭПО в зависимости от плотности электронного луча были определены средние значения коэффициента трения (рис. 1). На всех образцах как в исходном состоянии, так и после обработки при увеличении нагрузки на контр-тело в зависимости от степени выкрашивания поверхностного слоя коэффициент трения увеличивается. Внешний вид образцов, подвергнутых облучению ЭПО при различных режимах, после трибологических испытаний показан на рис. 2.

Установлено, что при нагрузках менее 3 Н значения коэффициента оказалось меньше относительно исходного состояния. На графике видно, что лучшее соотношение между показателями, характеризующими шероховатость поверхности, получилось при плотности энергии электронного пучка 15 Дж/см².



Рис. 3. Внешний вид образцов, подвергнутых облучению интенсивным электронным пучком после трибологических испытаний:

$a - E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$; $b - E_s = 25 \text{ Дж/см}^2$; $v - E_s = 35 \text{ Дж/см}^2$

Fig. 4. Appearance of samples irradiated with an intense electron beam at different energy density levels E_s , after tribological tests:

$a - E_s = 15 \text{ J/cm}^2$; $b - E_s = 25 \text{ J/cm}^2$; $v - E_s = 35 \text{ J/cm}^2$

Определение скорости износа поверхностного слоя показало существенное ухудшение показателя при плотностях энергии 25 и 35 Дж/см². В частности, на режиме $E_s = 25 \text{ Дж/см}^2$ скорость износа $V_{\text{из}}$, рассчитанная по объему износа поверхностного слоя материала, увеличилась в 4,1 раза, при $E_s = 35 \text{ Дж/см}^2$ – в 5,9 раза. На режиме $E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$ наблюдалось уменьшение показателя $V_{\text{из}}$ в 1,1 раза относительно исходного состояния сплава.

Деградация указанного параметра может быть объяснена, с одной стороны, развитой сеткой трещин, сформированных на поверхности мишеней в результате быстрого нагрева и охлаждения материала, с другой стороны, неоднородностью структуры и наличием газовых пор в модифицированном объеме сплава. Так, сформированная зеренная структура на обработанных электронным лучом поверхностях (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что более мелкий размер ячеек и высокая степень их однородности соответствуют режиму $E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$, на котором была зафиксирована скорость износа поверхностного слоя $V_{\text{из}}$, превышающая указанный параметр как в исходном состоянии, так и после ЭПО на других режимах.

Вместе с тем трещины, возникшие в результате обработки образца электронным пучком на режиме $E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$, в большинстве своем носят одиночный характер глубиной не более 5 мкм

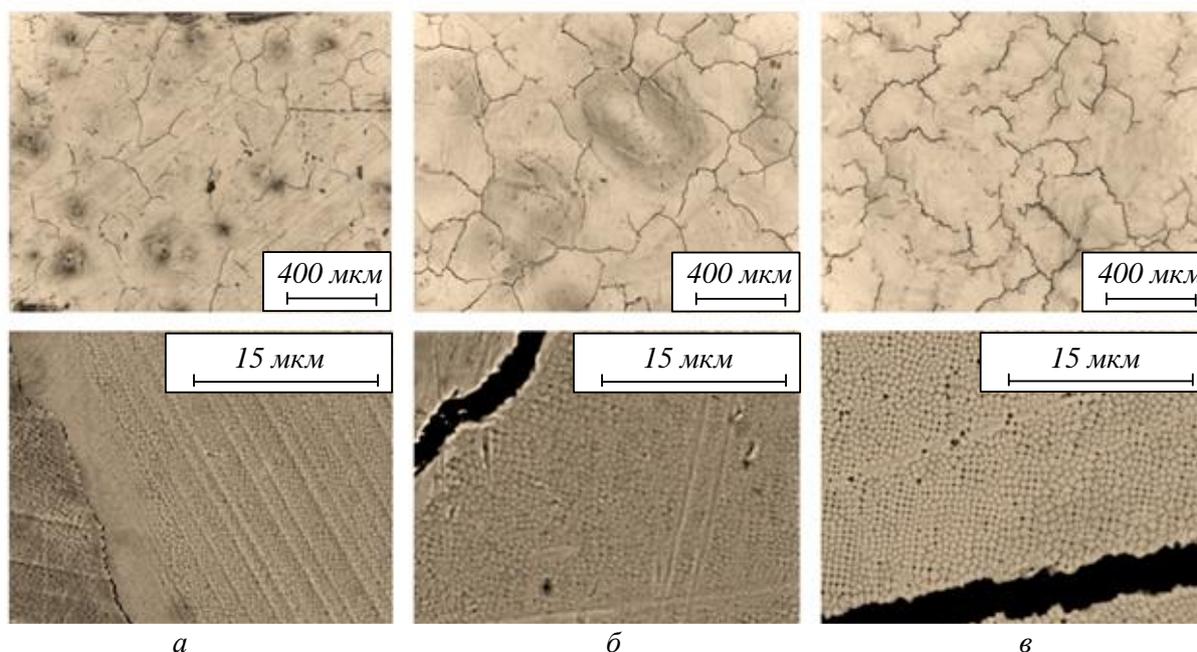


Рис. 5. Поверхность образцов после ЭПО на различных режимах:

$a - E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$; $b - E_s = 25 \text{ Дж/см}^2$; $v - E_s = 35 \text{ Дж/см}^2$

Fig. 6. Surface of samples after EBP in various modes:

$a - E_s = 15 \text{ J/cm}^2$; $b - E_s = 25 \text{ J/cm}^2$; $v - E_s = 35 \text{ J/cm}^2$

Значения микротвердости образцов сплава ХН65ВМТЮ, подвергнутых облучению интенсивным электронным пучком

Table 1. Microhardness values of ХН65ВМТЮ alloy samples subjected to irradiation with an intense electron beam

E_s , Дж/см ²	Микротвердость, МПа образцов на глубине от обработанной поверхности, мкм				
	20	40	60	80	100
15	422,06	434,86	418,24	410,40	391,28
25	426,92	436,80	396,66	376,06	384,20
35	361,44	440,10	427,78	396,54	385,14

Пр и м е ч а н и е: микротвердость сплава в исходном состоянии составила 307,80 МПа.

(рис. 3. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, а), в отличие от подобных поверхностных дефектов, полученных на режимах $E_s = 25$ и $E_s = 35$ Дж/см² (рис. 3, б, в), глубина которых оказалось сопоставимой с размером модифицированной зоны и в отдельных случаях достигала 40 мкм.

Кроме трещин на поверхности образцов, обработанных на режимах $E_s = 15$ и $E_s = 25$ Дж/см², присутствуют зоны углублений (кратеры) диаметром от 25 до 75 мкм и от 200 до 660 мкм соответственно, вероятно возникшие в ходе усадки материала при его высокоскоростной кристаллизации. На режиме $E_s = 35$ Дж/см² указанные дефекты не выявлены.

Необходимо отметить, что вероятность кратерообразования может быть снижена за счет увеличения количества импульсов ЭПО, так как при таком режиме облучения происходит выглаживание микрорельефа поверхности [13], что, в конечном счете, поможет увеличить эффективность технологии.

Микротвердость модифицированных слоев, измеренная на различных глубинах от поверхности обработки (табл. 1), для всех режимов стала выше, чем в исходном состоянии, что, в свою очередь, также может оказывать влияние на охрупчивание сплава и скорость износа поверхностного слоя. Так, среднее значение микротвердости в поверхностном слое после ЭПО при $E_s = 15$ Дж/см² увеличилось в 1,35 раза, при $E_s = 25$ Дж/см² – в 1,31 раза, при $E_s = 35$ Дж/см² – в 1,30 раз. Снижение значения показателя для режима с $E_s = 35$ Дж/см² на глубине 20 мкм, вероятнее всего, связано с высоким количеством газовых пор, образованных в поверхностном слое образца под воздействием электронного луча, делающих, с одной стороны, структуру менее однородной, а с другой – осложняющих процесс визуального определения границ следа от индентора при измерении микротвердости. Также необходимо отметить, что теплоотвод в основной объем материала со скоростью $10^4 - 10^9$ К/с [14], обеспечивающий охлаждение по-

верхностного слоя, привел к увеличению микротвердости материала не только на поверхности, но и к увеличению указанного параметра в центре образцов в 1,12 – 1,27 раз.

В общем случае при условии гомогенности структуры показатели твердости и износостойкости коррелируют между собой и имеют прямопропорциональную зависимость. Например, такая зависимость хорошо видна в работе [15].

В рассматриваемом примере данная зависимость подтверждается обнаруженной корреляцией между средними значениями микротвердости, измеренной на глубине до 100 мкм, и скоростями износа модифицированных слоев, которая составила $r_{VHV} = -0,977$ и говорит о том, что большему значению микротвердости соответствует меньшее значение скорости износа.

Также в работе методом наноиндентирования исследовались изменения нанотвердости V и модуля упругости E . Известно, что указанные характеристики являются весьма информативными, определяющими механические свойства сплава: твердость характеризует сопротивление упругой деформации и пластическому течению, а модуль упругости – упругие свойства сплавов. Комбинация твердости и упругости обуславливает стойкость к износу материала [16].

Нанотвердость модифицированных слоев на различных глубинах от поверхности обработки для всех режимов также стала выше, чем в исходном состоянии (табл. 2), а именно, значение нанотвердости при $E_s = 15$ Дж/см² превысило характеристики металла в исходном состоянии приблизительно в 1,7 – 2,8 раза, при $E_s = 25$ Дж/см² – в 4,5 – 7,1 раза, при $E_s = 35$ Дж/см² – в 1,8 – 1,9 раза. Необходимо отметить, что в общем случае профили нанотвердости являются убывающими до значений, превышающих нанотвердость сплава в состоянии поставки. Кривая для режима $E_s = 35$ Дж/см² имеет монотонный характер, нанотвердость существенно не изменяется на всем диапазоне измерений.

Значения нанотвердости образцов сплава ХН65ВМТЮ, подвергнутых облучению интенсивным электронным пучком*Table 2. Nanohardness values of ХН65ВМТЮ alloy samples subjected to irradiation with an intense electron beam*

E_s , Дж/см ²	Нанотвердость, ГПа, образцов на глубине от обработанной поверхности, мкм						
	10	20	30	40	50	60	70
15	18,03	14,92	12,58	11,17	11,10	11,07	10,97
25	40,12	45,96	44,28	37,62	34,66	30,52	29,27
35	12,50	11,71	11,85	11,67	11,55	12,03	12,47

П р и м е ч а н и е: нанотвердость сплава в исходном состоянии составила 6,45 ГПа.

Увеличение значений нанотвердости после ЭПО относительно аналогичного параметра в состоянии поставки сплава можно связать с формированием мелкозернистой структуры в модифицированной области, полученной в связи с быстрой кристаллизацией расплавленного слоя, а также деформационного упрочнения подповерхностного слоя [17].

Значения модуля упругости, измеренные на глубине до 70 мкм от обработанных поверхностей на всех режимах, превысили указанный параметр в исходном состоянии, который составил 49,85 ГПа. При этом разброс значений оказался существенным: при $E_s = 25$ Дж/см² значение параметра увеличилось в 8 – 12 раз, при $E_s = 25$ Дж/см² – в 16 – 27 раз, при $E_s = 35$ Дж/см² – в 2 – 4 раза.

Определение химического состава сплава, выполненное как на обработанных поверхностях, так и на поперечных шлифах на глубине до 64 мкм, позволило на основании перераспределения элементов сплава после ЭПО подтвердить основные положения теории направленной кристаллизации и получить схожие результаты сформулированные в работах [6; 7]. Так, в указанных работах в ходе облучения жаропрочного сплава на никелевой основе электронным пучком с низкими плотностями энергии ($E_s = 20 \div 22$ Дж/см²) удалось установить, что примеси с коэффициентом распределения $K_0 > 1$ оттесняются фронтом кристаллизации к поверхности (хром, углерод, алюминий), в то время как компоненты с $K_0 < 1$ (молибден, вольфрам) кристаллизуются на границе раздела перекристаллизованный материал – матричный сплав.

В частности, для образца, обработанного на режиме $E_s = 15$ Дж/см², удалось установить, что содержание алюминия в подповерхностном слое увеличилось в 4,17 раз относительно исходного состояния и оставалось выше состояния поставки сплава во всем диапазоне, на котором выполнялось исследование (сравнение содержания элементов до и после импульсной ЭПО оцени-

валось по массовым количествам). Содержание титана в подповерхностном слое оказалось выше в 1,42 раза. При этом его содержание в слоях с увеличением глубины уменьшалось и на отметке в 60 мкм достигло значения исходного состояния сплава. Содержание хрома увеличилось во всем диапазоне, но незначительно, в среднем в 1,07 раза. При этом среднее содержание таких легирующих элементов, как молибден и вольфрам на глубине до 64 мкм уменьшилось в 1,91 и 2,47 раза соответственно.

Исходя из основных положений о влиянии легирующих элементов на жаропрочность никелевых сплавов [18], можно сделать предположение, что перераспределение элементов в модифицированном слое сплава после импульсной ЭПО позволит улучшить его жаростойкость за счет увеличенного содержания хрома и титана, а также обеспечит более эффективную защиту деталей от высокотемпературной газовой коррозии за счет существенного увеличения содержания алюминия в поверхностном слое.

Несмотря на то, что в работе модификация поверхностного слоя сплава ХН65ВМТЮ методом импульсной ЭПО исследовалась на образцах после эксплуатации, полученные данные можно считать репрезентативными в целом для материала, так как металл замковой части лопаток незначительно деградирует в ходе эксплуатации и может характеризовать свойства сплава в исходном состоянии [19].

Для использования технологии импульсной ЭПО в массовом производстве необходимо учитывать, что после модификации поверхностных слоев сплава ХН65ВМТЮ на всех режимах наблюдались поверхностные трещины глубиной от 5 до 40 мкм. При этом упрочнение материала удалось достигнуть на глубине до 70 мкм и более от поверхности. Поэтому для устранения поверхностных трещин после импульсной ЭПО сплава ХН65ВМТЮ требуется осуществлять поверхностную обработку. Одним из ярких

примеров такой технологии является роботизированная адаптивная размерная полировка [20].

Кроме того, для увеличения надежности и долговечности лопаток в поверхностном слое необходимо создать оптимальные остаточные напряжения сжатия [21], например, с помощью проведения термической обработки изделий.

Выводы

Проведение импульсной ЭПО жаропрочного никелевого сплава ХН65ВМТЮ на режимах E_s , равном 15, 25 и 35 Дж/см², $\tau = 200$ мкс, $N = 1$ позволило повысить среднюю микротвердость в модифицированном слое в 1,30 – 1,35 раза, а также среднюю нанотвердость в 1,7 – 7,1 раза.

Коэффициент шероховатости, определенный до момента протирания поверхностного слоя, на всех режимах имел более низкое значение относительно сплава в исходном состоянии, что имеет большое значение для достижения более высоких значений КПД ГТД.

Оценка износостойкости сплава после ЭПО, выполненная по скорости износа модифицированного слоя, показала, что на режиме $E_s = 15$ Дж/см² значение показателя увеличилось в 1,1 раза, на режимах E_s , равном 25 и 35 Дж/см², параметр деградировал в 4,1 и 5,9 раз соответственно, что, скорее всего, объясняется наличием большого количества дефектов, образовавшихся в поверхностном слое образцов при облучении электронным пучком.

Определение химического состава модифицированного слоя на поперечных шлифах показало увеличение массового количества алюминия, титана и хрома вблизи обработанных поверхностей, что, в свою очередь, должно способствовать увеличению жаростойкости материала после ЭПО, а также позволит обеспечить более эффективную защиту деталей из сплава ХН65ВМТЮ от высокотемпературной газовой эрозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ivanov Y.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Y.A., Semin A.P. Prospects for the Application of Surface Treatment of Alloys by Electron Beams in State-of-the-Art Technologies. *Uspehi Fiziki Metallov*. 2022;21(3):345–362. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>
- Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 1. *Ползуновский вестник*. 2021;4:129–139. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.017>; EDN: PEMXHD.
- Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 2. *Ползуновский вестник*. 2022;3:204–215. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028>; EDN: VAJZCT.
- Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н., Теряев Д.А., Быценко О.А., Ширваньянц Г.Г. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для восстановления эксплуатационных свойств лопаток газотурбинных двигателей. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2014; 1:43–49. EDN: RYEQWL.
- Шулов В.А., Громов А.Н., Теряев Д.А., Энгелько В.И. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинных двигателей (обзор). *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2015;1:38–48. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-38-48>; EDN: TNHGB.
- Шулов В.А., Крайников А.В., Пайкин А.Г., Быценко О.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Модифицирование жаростойкого вакуумно-дугового покрытия NiCrAlY на поверхности лопаток из жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У и ЖС26НК сильноточными импульсными электронными пучками. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2009;2:37–40. EDN: KWJKAN.
- Новиков А.С., Пайкин А.Г., Шулов В.А., Быценко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Результаты длительных испытаний на технологическом двигателе РД33 лопаток компрессора ГТД из стали ЭП866Ш, облученных сильноточным импульсным электронным пучком. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010;9:18–22. EDN: MUFMUF.
- Lyu P., Chen Y., Liu Z., Cai J., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Zhao N. Surface modification of CrFeCoNiMo high entropy alloy induced by high-current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2020;504:144453. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144453>.
- Zhao G., Zhang P., Li J., Zhang Z., Li H., Ma L. Effects of different scanning speeds on microstructure evolution and tribological properties of Inconel 718 alloy vacuum electron beam surface modification. *Materials Today Sustainability*. 2024;25:100613. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100613>.

10. Хайрулин В.Т., Самохвалов Н.Ю., Тихонов А.С., Сендюров С.И. Результаты экспериментального исследования лопаток турбин с различной поверхностной шероховатостью. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* 2015;42:20–33. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2015.42.2>. EDN: TZQU DL.
11. Liu J., Li Z., Hanachi H. A physics-based framework for online surface roughness assessment for high-pressure turbines. *Chinese Journal of Aeronautics.* 2021;34(7):135–156. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.06.015>
12. Носов Н.В., Абрамов А.Д., Косулин С.И. Оценка микроструктуры поверхности профиля пера лопаток газотурбинного двигателя. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* 2017;16(2):90–100. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-2-90-100>. EDN: ZAETLZ.
13. Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н., Теряев Д.А., Быценко О.А., Ширваньянц Г.Г. Кратерообразование на поверхности деталей из титановых сплавов при облучении сильноточными импульсными электронными пучками. *Физика и химия обработки материалов.* 2015;5:22–28. EDN: UXBPTV.
14. Громов В.Е., Коновалов С.В., Аксёнова К.В., Кобзарева Т.Ю. *Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016:249.
15. Токтарбаева Г.М., Алпысбаев С.К., Рахадиллов Б.К., Сатабаева З.А., Жапарова М.С. Влияние электролитно-плазменного упрочнения поверхности на структуру и свойства стали 40XH. *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева.* 2020;1:199–204. https://doi.org/10.51885/15614212_2020_1_199. EDN: QZKRJI.
16. Муслев С.А., Лотков А.И. Нанотвердость и модуль упругости монокристаллов и поликристаллов системы сплавов TiNi-TiFe. *Физическая мезомеханика.* 2022;25(6):57–62. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_6_57. EDN: ALVTYQ.
17. Gao Y. Surface modification of TC4 titanium alloy by high current pulsed electron beam (HCPEB) with different pulsed energy densities. *J. Alloys and Comps.* 2013;572:180–185.
18. Мысик Р.К., Сулинин А.В., Брусницын С.В. Литейные сплавы на основе тяжелых цветных металлов. Учебное пособие для вузов. Москва: Юрайт, 2022:140.
19. Белявин А.Ф., Куренкова В.В., Федотов Д.А., Салий С.Г., Щербинин А.П. Продление ресурса рабочих лопаток ГТК 10-4 из сплава ЭИ 893 после продолжительного срока эксплуатации. *Автоматическая сварка.* 2016; 4(752):9–25.
20. Мубаракшин Р.М., Дическул М.Д., Николаев Н.Н., Травкин А.А., Мубаракшин Р.М., Мубаракшин М.Р. Роботизированная адаптивная размерная полировка компрессорных и турбинных лопаток. *Авиационные двигатели.* 2021;4(13):51–62. https://doi.org/10.54349/26586061_2021_4_51 EDN: YGFKKK.
21. Сазонов М.Б., Соловацкая Л. В. Влияние напряжённого состояния поверхностного слоя на выносливость лопаток компрессора газотурбинного двигателя. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* 2019;18(1):109–117. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-1-109-117>. EDN: ZDUVLV.

REFERENCES

1. Ivanov Y.F., Gromov V.E, Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Y.A., Semin A.P. *Prog. Phys. Met.* 2022;21(3):345–362.
2. Komarov D.V., Konovalov S.V., Zhukov D.V., Vinogradov I.S., Panchenko I.A. Analiz sovremennoj situacii v oblasti primeneniya elektronno-puchkovej obrabotki razlichnyh splavov. Part 1. *Polzunovskij vestnik.* 2021;4:129–139. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.0174>; EDN: PEMXHD.
3. Komarov D.V., Konovalov S.V., Zhukov D.V., Vinogradov I.S., Panchenko I.A. Analiz sovremennoj situacii v oblasti primeneniya elektronno-puchkovej obrabotki razlichnyh splavov. Part 2. *Polzunovskij vestnik.* 2022;3:204–215. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028>. EDN: VAJZCT.
4. Shulov V.A., Engel'ko V.I., Gromov A.N., Teryaev D.A., Bycenko O.A., Shirvan'yanc G.G. Primenenie sil'notochnyh impul'snyh elektronnyh puchkov dlya vosstanovleniya ekspluatacionnyh svojstv lopatok gazoturbinnnyh dvigatelej. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Poroshkovaya metallurgiya i funkcional'nye pokrytiya.* 2014;1:43–49. EDN: RYEQWL.
5. Shulov V.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engel'ko V.I. Primenenie sil'notochnyh impul'snyh elektronnyh puchkov dlya modifitsiro-

- vaniya poverhnosti lopatok gazoturbinnih dvigatelej (review). *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2015;1:38–48. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-38-48>; EDN: TNIHGB.
6. Shulov V.A., Krajnikov A.V., Pajkin A.G., Bycenko O.A., Engel'ko V.I., Tkachenko K.I. Modificirovanie zharostojkogo vakuumnodugovogo pokrytiya NiCrAlY na poverhnosti lopatok iz zharoprochnykh nikel'nykh splavov ZhS6U i ZhS26NK sil'notochnymi impul'snymi elektronnyimi puchkami. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2009;2:37–40. EDN: KWJKAN.
 7. Novikov A.S., Pajkin A.G., Shulov V.A., Bycenko O.A., Teryaev D.A., Engel'ko V.I., Tkachenko K.I. Rezul'taty dlitel'nykh ispytaniy na tekhnologicheskom dvigatеле RD33 lopatok kompressora GTD iz stali EP866Sh, obluchennykh sil'notochnym impul'snym elektronnyim puchkom. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2010;9:18–22. EDN: MUFMUF.
 8. Zhao G., Zhang P., Li J., Zhang Z., Li H., Ma L. Surface modification of CrFeCoNiMo high entropy alloy induced by high-current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2020;504:144453. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144453>.
 9. Zhao G., Zhang P., Li J., Zhang Z., Li H., Ma L. Effects of different scanning speeds on microstructure evolution and tribological properties of Inconel 718 alloy vacuum electron beam surface modification. *Materials Today Sustainability*. 2024;25:100613. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100613>.
 10. Hajruln V.T., Samohvalov N.Yu., Tihonov A.S., Sendyurev S.I. Rezul'taty eksperimental'nogo issledovaniya lopatok turbin s razlichnoj poverhnostnoj sferohovatos't'yu. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*. 2015;42:20–33. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2015.42.2>; EDN: TZQUDL.
 11. Liu J., Li Z., Hanachi H. A physics-based framework for online surface roughness assessment for high-pressure turbines. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021;34(7):135–156.
 12. Nosov N.V., Abramov A.D., Kosulin S.I. Ocenka mikrostruktury poverhnosti profilya pera lopatok gazoturbinnogo dvigatelya. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*. 2017;16(2):90–100. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-2-90-100>; EDN: ZAETLZ.
 13. Shulov V.A., Engel'ko V.I., Gromov A.N., Teryaev D.A., Bycenko O.A., Shirvan'yanc G.G. Krateroobrazovanie na poverhnosti detalej iz titanovykh splavov pri oblucheniisil'notochnymi impul'snymi elektronnyimi puchkami. *Fizika i himiya obrabotki materialov*. 2015;5:22–28. EDN: UXBPTV.
 14. Gromov V.E., Konovalov S.V., Aksyonova K.V., Kobzareva T.Yu. *Evolyuciya struktury i svoystv legkih splavov pri energeticheskikh vozdeystviyah*. Min-vo obr. i nauki RF, SibGIU, Mezhgos. Koordinac. Sovet po fizike prochnosti i plastichnosti materialov. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2016:249.
 15. Toktarbaeva G.M., Alpysbaev S.K., Rahadilov B.K., Satabaeva Z.A., Zhaparova M.S. Vliyanie elektrolitno-plazmennogo uprochneniya poverhnosti na strukturu i svoystva stali 40HN. *Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva*. 2020;1:199–204. https://doi.org/10.51885/15614212_2020_1_199 EDN: QZKRJI.
 16. Muslov S.A., Lotkov A.I. Nanotverdost' i modul' uprugosti monokristallov i polikristallov sistemy splavov TiNi–TiFe. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2022;25(6):57–62. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_6_57; EDN: ALVTYQ.
 17. Gao Y. Surface modification of TC4 titanium alloy by high current pulsed electron beam (HCPEB) with different pulsed energy densities. *J. Alloys and Comps*. 2013;572:180–185.
 18. Mysik R.K., Sulinin A.V., Brusnicyn S.V. Litejnye splavy na osnove tyazhelykh cvetnykh metallov: uchebnoe posobie dlya srednego professional'nogo obrazovaniya. Moscow: Yurajt, 2024:140.
 19. Belyavin A.F., Kurenkova V.V., Fedotov D.A., Salij S.G., Shcherbinin A.P. Prodlenie resursa rabochih lopatok GTK 10-4 iz splava EI 893 posle prodolzhitel'nogo sroka ekspluatatsii. *Avtomaticheskaya svarka*. 2016; 4(752):9–25.
 20. Mubarakshin R.M., Dicheskul M.D., Nikolaev N.N., Travkin A.A., Mubarakshin R.M. Robotizirovannaya adaptivnaya razmernaya polirovka kompressornykh i turbinnnykh lopatok. *Aviacionnye dvigateli*. 2021;4(13):51–62. https://doi.org/10.54349/26586061_2021_4_51 EDN: YGFKKK.
 21. Sazonov M.B., Solovackaya L. V. Vliyanie napryazhyonnogo sostoyaniya poverhnostnogo sloya na vynoslivost' lopatok kompressora gazoturbinnogo dvigatelya. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*. 2019;18(1):109–117. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-1-109-117>; EDN: ZDUVLV.

Сведения об авторах

Дмитрий Валерьевич Комаров, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева; начальник отдела организации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, АО «Газпром диагностика»

E-mail: komarov_dimitriy@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2003-2021

SPIN-код: 2858-2704

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет; профессор кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

SPIN-код: 7576-4810

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет.

E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

Information about the authors

Dmitrij V. Komarov, Postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials

Science, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev; Head of the Research and Development Department, АО «Gazprom diagnostika»

E-mail: komarov_dimitriy@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2003-2021

SPIN-код: 2858-2704

Sergej V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities, Siberian State Industrial University; Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Yurij F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958.

SPIN-код: 7576-4810

Irina A. Panchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Quality Management and Innovation, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 06.05.2024

После доработки 10.06.2024

Принята к публикации 14.06.2020

Received 06.05.2024

Revised 10.06.2024

Accepted 14.06.2020