

Научная статья

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-77-89

ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ЖАРОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ С ВЫСОКОЙ СТОЙКОСТЬЮ К СУЛЬФИДНО-ОКСИДНОЙ КОРРОЗИИ

С.А. Будиновский¹, А.С. Бенклян¹, Д.А. Мовенко¹, С.В. Татарников¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты испытания на жаростойкость при температуре 1150 °С на базе 400 ч и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С на базе 30 циклов образцов из сплава ЖС32 с серийными ионно-плазменными жаростойкими и коррозионностойким покрытиями. По результатам испытаний наиболее высокий комплекс защитных свойств имеют покрытия СДП-42 + ВСДП-16 и ВСДП-3 + ВСДП-16, в которых отсутствует диффузия серы и хлора с поверхности во внутренние слои жаропрочного сплава. Покрытия превосходят в условиях испытаний серийное коррозионностойкое покрытие СДП-1Т + ВСДП-13.

Ключевые слова: ионно-плазменная технология, жаропрочные никелевые сплавы, ионно-плазменные покрытия, изотермическая жаростойкость, сульфидно-оксидная коррозия

Для цитирования: Будиновский С.А., Бенклян А.С., Мовенко Д.А., Татарников С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с высокой стойкостью к сульфидно-оксидной коррозии // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-77-89.

Scientific article

ION-PLASMA HEAT-RESISTANT COATINGS WITH HIGH RESISTANCE TO SULFIDE-OXIDE CORROSION

S.A. Budinovskiy¹, A.S. Benklyan¹, D.A. Movenko¹, S.V. Tatarnikov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The paper presents the results of heat resistance testing of ZhS32 alloy samples with serial ion-plasma heat-resistant and corrosion-resistant coatings. The tests demonstrated heat resistance at 1150 °C for 400 h and resistance to sulfide-oxide corrosion at 750 and 850 °C for 30 cycles. According to the test results, the coatings SDP-42 + VSDP-16 and VSDP-3 + VSDP-16 exhibit the highest set of protective properties. These coatings prevent diffusion of sulfur and chlorine from the surface into the inner layers of the heat-resistant alloy. The above mentioned coatings out-perform the standard corrosion-resistant coating SDP-1T + VSDP-13 under test conditions.

Keywords: ion-plasma technology, heat-resistant nickel alloys, ion-plasma coatings, isothermal heat resistance, sulfide-oxide corrosion

For citation: Budinovskiy S.A., Benklyan A.S., Movenko D.A., Tatarnikov S.V. Ion-plasma heat-resistant coatings with high resistance to sulfide-oxide corrosion. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-77-89.

Введение

Опыт эксплуатации газотурбинных агрегатов показал, что ресурс работы турбины определяется не только характеристиками прочности используемых материалов сопловых и рабочих лопаток турбины, но и развитием на поверхности пера лопаток процессов коррозии различной природы, которые при контакте горячего газа турбины с поверхностью пера реализуются в виде высокотемпературного окисления или сульфидно-оксидной коррозии, приводящих в конечном итоге к разрушению лопатки. По мере роста рабочей температуры газа турбины для изготовления лопаток были разработаны сплавы на основе железа и никеля, обладающие необходимой жаропрочностью. Эти сплавы имели в своем составе хром в количестве, достаточном для образования на поверхности пера сплошной защитной пленки на основе оксида хрома, которая сохраняла свои защитные свойства вплоть до температур 850–900 °С. При разработке новых поколений литейных никелевых сплавов с рабочей температурой до 1150 °С основной задачей было достижение нового уровня жаропрочности, а разработка защитных покрытий для пера лопаток, позволяющих многократно повысить их долговечность, стала самостоятельной материаловедческой задачей.

Высокотемпературное окисление ограничивает срок службы лопаток турбин с относительно постоянной скоростью окисления поверхности пера. В отличие от этого разрушение лопаток турбин от сульфидно-оксидной коррозии может носить неконтролируемый характер, а в ряде случаев имеет катастрофические последствия. Причиной возникновения сульфидно-оксидной коррозии является попадание в турбину различных примесей из топлива или воздушной атмосферы. Отметим, что механизм развития сульфидно-оксидной коррозии, а также интенсивность ее протекания, существенно зависят от множества различных внешних факторов, в том числе от материала лопаток, качества топлива, региона эксплуатации, температурных режимов работы турбины и т. д. В зависимости от температуры обычно рассматривают два характерных типа сульфидно-оксидной коррозии. *Первый тип* реализуется в области относительно невысоких температур 600–700 °С и связан с попаданием на поверхность пера серы, приводящей к образованию эвтектических расплавов сульфитов никеля и кобальта на поверхности лопаток. *Второй тип* сульфидно-оксидной коррозии наблюдается в интервале температур 800–900 °С при взаимодействии поверхности пера из жаропрочного сплава и смеси отложений, содержащих сульфат и хлорид натрия из окружающей среды.

В настоящее время газовые турбины широко используются в разных отраслях промышленности, на транспорте, в энергетике, в том числе и в транспортируемых полевых электрогенераторах большой мощности [1–18]. Таким образом, во всех сферах стоит задача достижения максимального срока службы турбины с использованием различных защитных покрытий [19–29]. Выбор эффективного покрытия затруднен тем, что температурное поле на поверхности пера существенно неоднородно, в результате чего на поверхности пера лопаток одновременно присутствуют участки с температурой от 600 до 1150 °С и более, что приводит к появлению разных типов коррозионного повреждения на рабочей поверхности пера одной лопатки. В данной статье представлены результаты исследований серийных двухслойных конденсационно-диффузионных ионно-плазменных покрытий для защиты лопаток турбин от высокотемпературного окисления при температуре 1150 °С и сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С для выбора универсальной композиции защитного ионно-плазменного покрытия, способной обеспечить защиту лопаток газовых турбин, изготовленных из жаропрочного литейного сплава на основе никеля ЖС32, одновременно от высокотемпературного окисления и сульфидно-оксидной коррозии.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Исследована изотермическая жаростойкость при температуре 1150 °С и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С образцов в виде дисков диаметром 25 мм и толщиной 3 мм из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с ионно-плазменными покрытиями. Рассмотрено четыре варианта двухслойных конденсационно-диффузионных покрытий, в том числе три жаростойких покрытия систем: ВСДП-3 + ВСДП-16, СДП-42 + ВСДП-16, СДП-2 + ВСДП-16, и коррозионностойкого покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 с внутренними слоями на основе никелевых сплавов толщиной 40–80 мкм и внешним слоем на основе двух алюминиевых сплавов с удельным привесом 20–40 г/м². Нанесение покрытий проводили по серийной технологии НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на промышленной установке ионно-плазменного напыления типа МАП-2 [30–34] с использованием катодов из никелевых сплавов марок СДП-1Т (NiCoCrAlTiY), СДП-2 (NiCrAlY), ВСДП-3 (NiCrAlReHfY), СДП-42 (NiCrAlTaWНfY) и алюминиевых сплавов марок ВСДП-16 (AlNiY) и ВСДП-13 (AlNiSiB). Установки типа МАП широко используются в двигателестроительной отрасли, позволяют с высокой точностью воспроизводить процессы нанесения металлических и керамических покрытий вакуумно-дуговым методом, обеспечивая при этом высокое качество получаемых покрытий. После нанесения покрытий образцы отожжены в вакуумной печи.

Испытания покрытий на жаростойкость проводили по ГОСТ 6130–71 «Методы определения жаростойкости» при температуре 1150 °С на базе испытаний 400 ч. Через 10–20 ч образцы извлекали для взвешивания (по три образца каждой системы) с помощью аналитических весов (точность измерения составляла 0,0001 г), после чего определяли среднеарифметическую величину удельного изменения массы образцов с покрытиями (отношение изменения массы образца к площади поверхности образца в исходном состоянии).

Циклические испытания на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С проводили по методике НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Перед испытаниями образцы обезжиривали органическим растворителем и взвешивали на аналитических весах с точностью ±0,0002 г. Испытания проводили по циклическому режиму. Один цикл испытания включал: нанесение на подогретую поверхность образцов солевой корки путем напыления водного раствора смеси натриевой соли серной кислоты (Na₂SO₄) и хлорида натрия (NaCl) и выдержку образцов при заданной температуре (750 и 850 °С) в течение 1 ч в муфельной электропечи сопротивления с воздушной атмосферой. Охлаждение образцов осуществляли на воздухе. Общая продолжительность испытаний составляла 30 циклов. Стойкость образцов к сульфидно-оксидной коррозии оценивали по удельному изменению массы. Для определения кинетики процесса сульфидно-оксидной коррозии через каждые пять циклов испытаний образцы взвешивали для построения графиков изменения удельной массы.

Исследование структуры жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с покрытиями в исходном состоянии и после испытаний на жаростойкость и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии проводили на оптическом микроскопе с цифровой системой обработки изображения при увеличении до ×500.

Анализ локального элементного состава проведен в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015 на растровом электронном микроскопе, оснащенный энергодисперсионным спектрометром, при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе пучка 300 пА. Получены изображения микроструктуры образцов в режиме отраженных электронов.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные зависимости изменения удельной массы образцов в процессе испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150 °С на базе 400 ч

представлены на рис. 1. Видно, что по результатам испытаний лучшей жаростойкостью в данном эксперименте обладают покрытия систем СДП-42 + ВСДП-16 и СДП-1Т + ВСДП-13. Однако следует отметить, что покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13 относится к коррозионностойким и легировано кобальтом и хромом (суммарно – до 40 % (по массе)). При повышении температуры испытаний до 1200 °С его жаростойкость резко снижается. В то же время жаростойкие покрытия систем ВСДП-3 + ВСДП-16 и СДП-2 + ВСДП-16 обеспечивают длительную защиту жаропрочных никелевых сплавов от окисления при температурах 1200 °С и более.

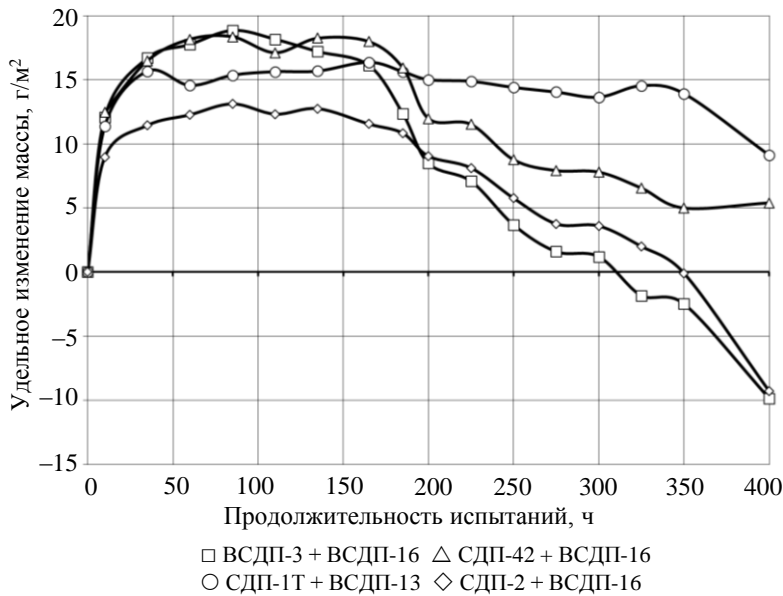


Рис. 1. Зависимости удельного изменения массы образцов с защитными покрытиями систем ВСДП-3 + ВСДП-16, СДП-42 + ВСДП-16, СДП-2 + ВСДП-16 и СДП-1Т + ВСДП-13 по результатам испытаний на жаростойкость при температуре 1150 °С в течение 400 ч

На рис. 2 представлены результаты металлографических исследований микроструктуры покрытий систем СДП-2 + ВСДП-16 (рис. 2, а) и СДП-1Т + ВСДП-13 (рис. 2, б) в исходном состоянии и после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С. Видно, что покрытия в исходном состоянии имеют многослойную структуру с внешним слоем на основе моноалюминид никеля. В процессе окисления кислородом и взаимодействия с сульфатом и хлоридом натрия внешний слой покрытий становится рыхлым. Покрытие системы СДП-2 + ВСДП-16 при температуре 750 °С утрачивает защитные свойства на половину толщины алюминидного слоя, а при 850 °С – полностью на всю толщину (рис. 2, а). В покрытии системы СДП-1Т + ВСДП-13 моноалюминид никеля во внешнем слое сохраняется, но из-за коррозионных повреждений покрытия его защитные свойства также теряются (рис. 2, б), так как на поле шлифа видны выходы пор на поверхность, заполненную продуктами коррозии.

На рис. 3 представлены результаты металлографических исследований микроструктуры покрытия системы ВСДП-3 + ВСДП-16 заявленной толщины (рис. 3, а) и в 2 раза меньше (рис. 3, б) в исходном состоянии и после испытания на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С. Видно, что независимо от толщины слоя покрытия обеспечили защиту образцов из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 от сульфидно-оксидной коррозии.

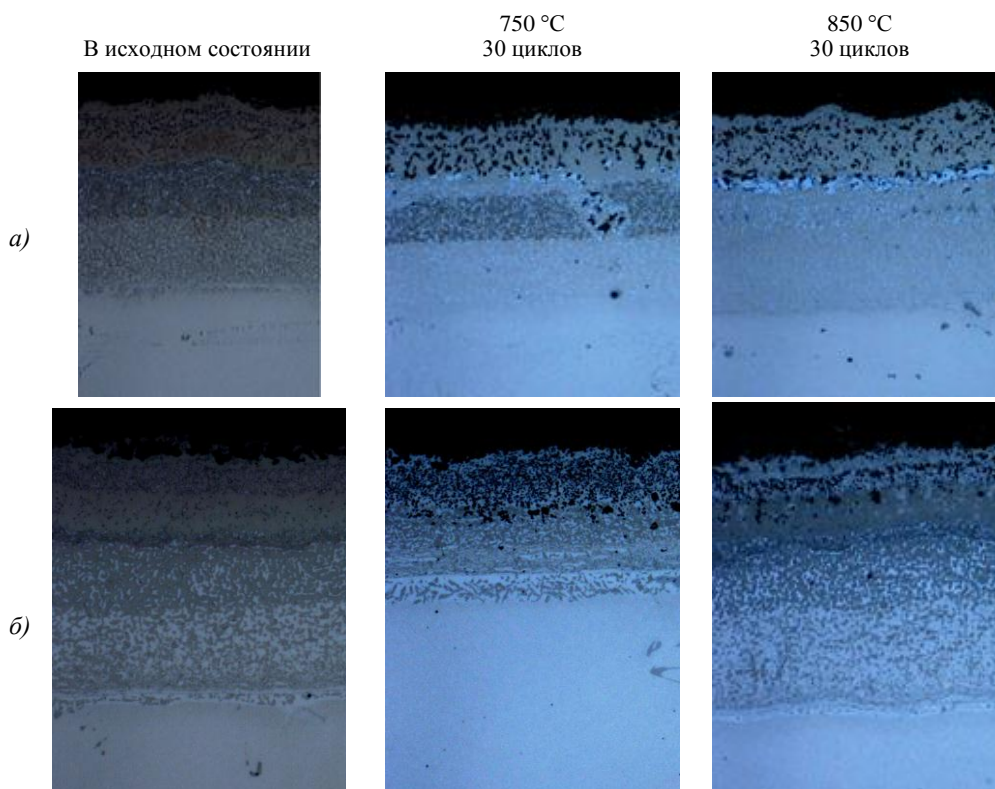


Рис. 2. Микроструктуры покрытий систем СДП-2 + ВСДП-16 (а) и СДП-1Т + ВСДП-13 (б) в исходном состоянии и после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С

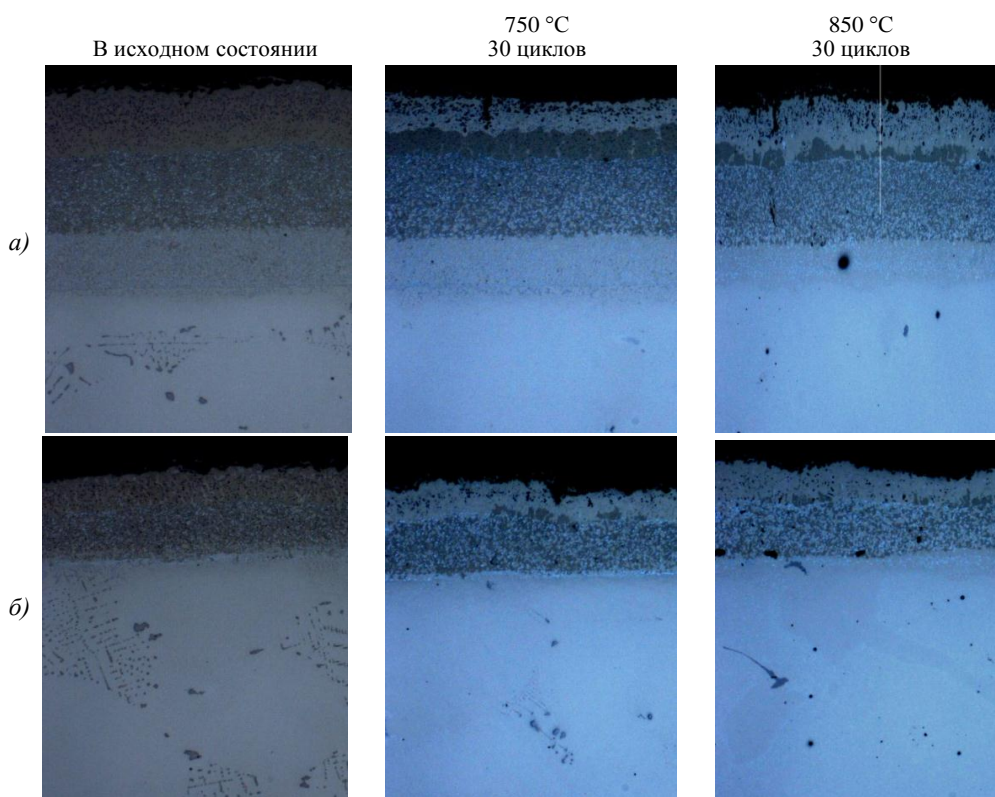


Рис. 3. Микроструктуры покрытий систем ВСДП-3 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) (а) и ВСДП-3 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м²) (б) в исходном состоянии и после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С

На рис. 4 представлены результаты металлографических исследований микроструктуры покрытий систем СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) (рис. 4, а) и СДП-42 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м²) (рис. 4, б) в исходном состоянии и после испытания на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С. Коррозионные повреждения видны в тонком поверхностном слое покрытий. Слой моноалюминида никеля локальных коррозионных повреждений не имеет. Высокие защитные свойства покрытия от коррозии, очевидно, связаны с высоким содержанием хрома (до 25 % (по массе)) в подслое из сплава СДП-42.

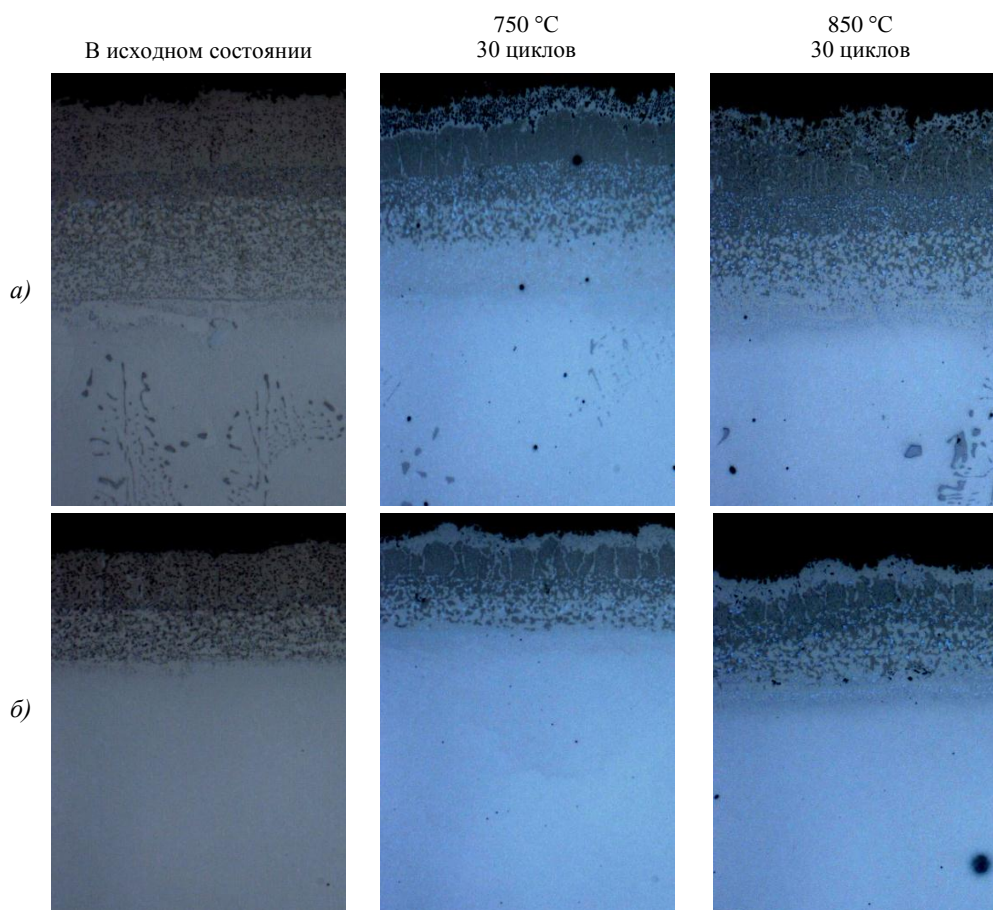


Рис. 4. Микроструктуры покрытий систем СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) (а) и СДП-42 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м²) (б) в исходном состоянии и после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С

При анализе микроструктур покрытий после испытаний (рис. 2–4) следует отметить, что повреждение поверхности покрытий систем СДП-2 + ВСДП-16 и СДП-1Т + + ВСДП-13 имеет локальный (питтинговый) характер, а у покрытий систем ВСДП-3 + + ВСДП-16 и СДП-42 + ВСДП-16 – фронтальный. Количественные характеристики коррозионного повреждения (удельное изменение массы образцов за 30 циклов испытаний) некоторых покрытий приведены в табл. 1.

Следует отметить, что представленные значения удельного изменения массы образцов с покрытиями являются результатом динамического равновесия между процессами формирования и накопления коррозионноустойчивых соединений на поверхности защищаемого жаропрочного сплава и продуктами коррозии, которые осыпаются с поверхности или накапливаются под покрытием и способствуют его разрушению. Этот

эффект хорошо виден на примере покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13. Покрытие толщиной 80 мкм по удельному изменению массы не уступает покрытиям систем ВСДП-3 + ВСДП-16 и СДП-42 + ВСДП-16 той же толщины. Но то же покрытие меньшей толщины (40 мкм) разрушается катастрофически, что свидетельствует о питтинговом механизме коррозии покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 (рис. 2, б).

Таблица 1

Результаты испытаний образцов на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 750 °С

Система покрытия	Удельное изменение массы (за 30 циклов испытаний), г/м ²
ВСДП-3 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м ²)	8,05–0,11
ВСДП-3 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м ²)	0,58–0,41
СДП-1Т (80 мкм) + ВСДП-13 (40 г/м ²)	17,5–24,98
СДП-1Т (40 мкм) + ВСДП-13 (20 г/м ²)	(–233)–(–106)
СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м ²)	5,42–5,92
СДП-42 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м ²)	0,49–2,14

На рис. 5 представлены зависимости удельного изменения массы образцов из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с покрытиями и без защитных ионно-плазменных покрытий от количества циклов испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С. Видно, что образцы с покрытиями систем ВСДП-3 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) и СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) полностью обеспечили защиту жаропрочного никелевого сплава ЖС32 от сульфидно-оксидной коррозии. Покрытия систем СДП-1Т + ВСДП-13 и СДП-2 + ВСДП-16 через 10–15 циклов испытаний теряют защитные свойства, о чем свидетельствует резкий прирост величины удельного изменения массы образцов с этими покрытиями.

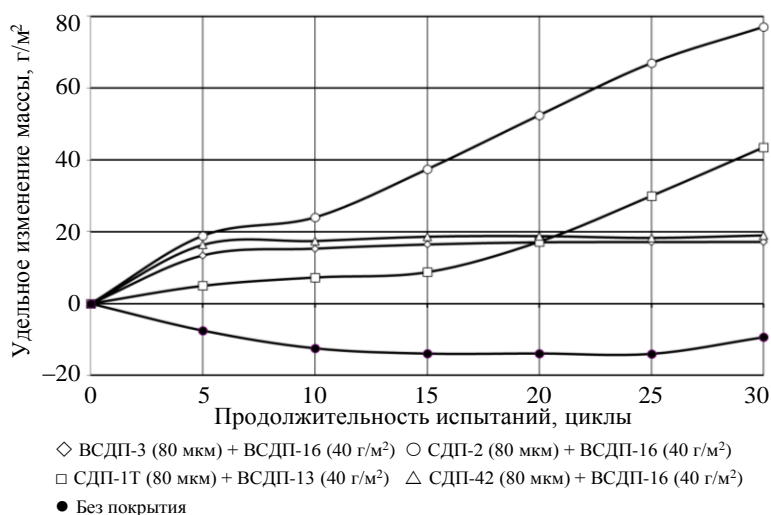


Рис. 5. Зависимости удельного изменения массы образцов из сплава ЖС32 с покрытиями систем ВСДП-3 + ВСДП-16, СДП-42 + ВСДП-16, СДП-2 + ВСДП-16, СДП-1Т + ВСДП-13 и без защитных покрытий от количества циклов испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С

На рис. 6 представлены микроструктуры покрытий систем ВСДП-3 + ВСДП-16, СДП-42 + ВСДП-16 и СДП-2 + ВСДП-16 с указанием мест, выбранных для исследования элементного состава по толщине, после проведения испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С.

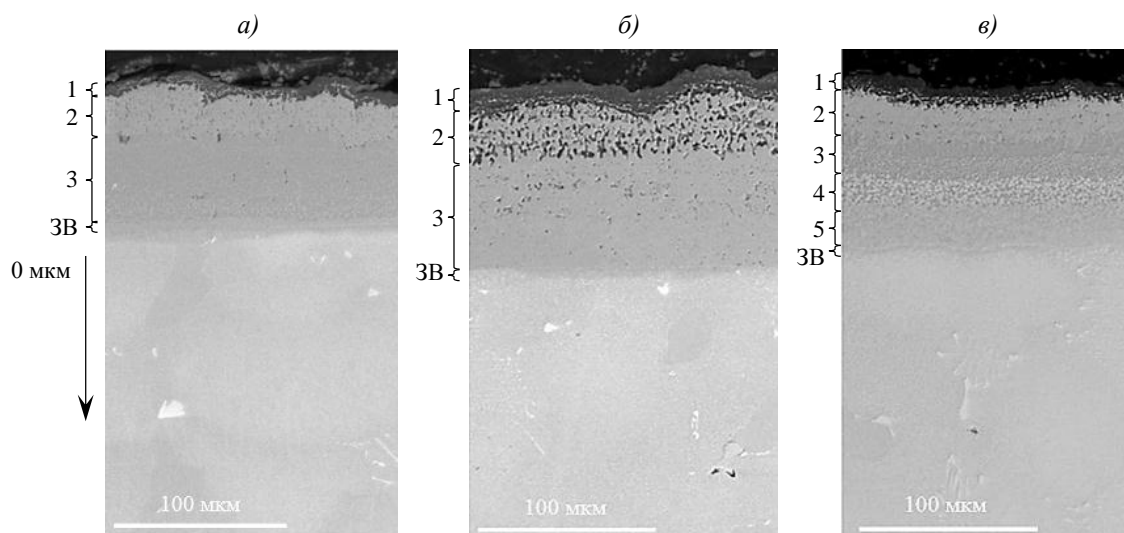


Рис. 6. Микроструктуры покрытий систем ВСП-3 + ВСП-16 (а), СДП-2 + ВСП-16 (б) и СДП-42 + ВСП-16 (в) с указанием мест анализа элементного состава после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С (ЗВ – зона диффузионного взаимодействия покрытия с основой)

Таблица 2

Локальный элементный состав образцов с покрытием после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С

Место измерения	Содержание элементов, % (по массе)								
	Al	Cr	Co	Nb	Mo	W	Ta	Re	Ni
Покрытие ВСП-3 + ВСП-16									
Спектр 1	49,3	2,2	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	2,9
Дополнительно содержит 1,9 % Y; 1,1 % Cl									
Спектр 2	11,4	11,3	0,5	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	76,5
Дополнительно содержит 0,2 % Cl									
Спектр 3	13,4	26,7	1,1	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	0,7	58,0
ЗВ	7,7	22,5	1,7	0,6	0,7	5,7	3,2	2,8	60,5
15 мкм	4,8	6,1	8,6	2,2	1,0	12,3	6,0	3,9	63,3
Покрытие СДП-2 + ВСП-16									
Спектр 1	50,1	5,5	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	1,4
Дополнительно содержит 1,6 % S; 0,9 % Y; 0,4 % Cl									
Спектр 2	16,8	15,2	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	56,6
Дополнительно содержит 2,7 % S									
Спектр 3	5,0	20,9	1,5	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	72,5
Дополнительно содержит 0,2 % S									
ЗВ	6,7	11,4	3,2	0,9	Н/о	6,8	4,2	2,5	64,3
15 мкм	5,6	5,2	9,6	1,6	1,0	9,0	5,0	3,2	59,8
Покрытие СДП-42 + ВСП-16									
Спектр 1	51,0	1,7	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	2,2
Дополнительно содержит 1,8 % Y; 0,4 S; 0,4 Cl									
Спектр 2	12,9	5,0	0,7	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	81,4
Спектр 3	16,8	8,3	0,7	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	74,3
Спектр 4	15,2	19,0	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	65,8
Спектр 5	11,9	11,6	1,4	Н/о	Н/о	2,6	4,8	Н/о	67,7
ЗВ	7,7	14,3	2,5	Н/о	0,7	5,1	3,9	1,6	65,0
15 мкм	5,8	5,4	9,5	1,2	1,0	9,5	4,6	3,6	59,6
Примечание. ЗВ – зона диффузионного взаимодействия покрытия с основой; Н/о – не определено.									

Как видно из данных табл. 2, внешняя поверхность всех образцов защищена оксидами алюминия, никеля и иттрия. В покрытии системы ВСДП-3 + ВСДП-16 на глубине 20–30 мкм присутствуют соединения хлора, концентрация которого снижается с 1,1 % (по массе) в первом слое до 0,2 % (по массе) во втором. В более глубоких слоях покрытий от зоны 3 до зоны диффузионного взаимодействия покрытия с основой (жаропрочного никелевого сплава ЖС32) наличие хлора или серы не установлено. Покрытие системы ВСДП-3 + ВСДП-16 сохранило защитные свойства к сульфидно-оксидной коррозии и высокотемпературному окислению.

Покрытие системы СДП-2 + ВСДП-16 также имеет на поверхности защитную оксидную пленку из оксидов алюминия, никеля и иттрия, но по всей толщине покрытия вплоть до зоны диффузионного взаимодействия с подложкой выявлено присутствие в слое серы до 2,7 % (по массе). Покрытие полностью утратило защитные свойства (рис. 5).

Покрытие системы СДП-42 + ВСДП-16 сохранило защитные свойства как к сульфидно-оксидной коррозии, так и к высокотемпературному окислению. Наличие по 0,4 % (по массе) хлора и серы установлено только в тонком поверхностном слое.

Заключения

Для выбора универсальной композиции системы защитного ионно-плазменного покрытия, сочетающей высокую жаростойкость и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии, проведены испытания на жаростойкость при температуре 1150 °С на базе 400 ч и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С на базе 30 циклов образцов из сплава ЖС32 с ионно-плазменными жаростойкими покрытиями систем ВСДП-3 (NiCrAlReHfY) + ВСДП-16 (AlNiY), СДП-42 (NiCrAlTaWНfY) + ВСДП-16, СДП-2 (NiCrAlY) + ВСДП-16 и коррозионностойким покрытием системы СДП-1Т (NiCoCrAlTiY) + ВСДП-13 (AlNiSiB).

По результатам испытаний наиболее высокий комплекс защитных свойств имеют покрытия систем СДП-42 (40–80 мкм) + ВСДП-16 (20–40 г/м²) и ВСДП-3 (40–80 мкм) + ВСДП-16 (20–40 г/м²). В покрытиях отсутствует проникновение серы и хлора с поверхности во внутренние слои жаропрочного сплава. Покрытия превосходят в условиях испытаний серийное коррозионностойкое покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-34.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // Электрометаллургия. 2016. № 10. С. 23–38.
3. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 149–163.
4. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем Gd₂O₃-ZrO₂-HfO₂ и Sm₂O₃-Y₂O₃-HfO₂ // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
5. Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики // Наука и жизнь. 2009. № 10. С. 6–10.
6. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия с керамическим слоем пониженной теплопроводности на основе оксида циркония для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники: сб. докл. науч.-техн. конф. М.: ВИАМ, 2015. С. 3.

7. Доронин О.Н., Горлов Д.С., Азаровский Е.Н., Кочетков А.С. Исследование структуры и свойств жаростойкого покрытия при высокотемпературной деформации образцов из интерметаллидного титанового сплава // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
8. Батраев И.С., Рыбин Д.К., Иванюк К.В. и др. Износостойкие детонационные покрытия на основе карбида вольфрама для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
9. Гончаров Б.Э., Сипатов А.М., Черкашнева Н.Н., Плескань А.Ю., Самохвалов Н.Ю., Ваганова М.Л., Сорокин О.Ю., Солнцев Ст.С., Евдокимов С.А. Исследование высокотемпературной термостойкости антиокислительного покрытия для керамического композиционного материала с многослойной структурой // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-51-58.
10. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Журавлева П.Л., Горлов Д.С. Исследование влияния подготовки поверхности и ассистированного осаждения на структуру и свойства эрозионностойкого ионно-плазменного покрытия // *Труды ВИАМ*. 2018. № 10 (70). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.
11. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности // *Труды ВИАМ*. 2013. № 1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025).
12. Мубояджян С.А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий // *Энциклопедия инженера-химика*. 2012. № 5. С. 34–41.
13. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Коррозионностойкое покрытие для защиты деталей ГТД из высокопрочных конструкционных мартенситостареющих сталей на рабочие температуры до 450 °С // *Труды ВИАМ*. 2014. № 6. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3.
14. Щепилов А.В., Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Коннова В.И. Исследование влияния ионно-плазменных покрытий на демпфирующую способность композиции «сплав–покрытие» при испытаниях на вибродинамическом стенде // *Труды ВИАМ*. 2015. № 4. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-8-8.
15. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Горлов Д.С. Повышение свойств упрочняющих ионно-плазменных покрытий при помощи ассистированного осаждения // *Труды ВИАМ*. 2015. № 7. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-7-7.
16. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 3. С. 3–8.
17. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Комплексные термодиффузионные жаростойкие покрытия для безуглеродистых жаропрочных сплавов на никелевой основе // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 3. С. 25–30.
18. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 71–81.
19. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 3. С. 20–25.
20. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Часть II // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 1. С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-3-11.
21. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Кашин Д.С. Термодиффузионные процессы насыщения тугоплавкими элементами и углеродом поверхности внутренней полости лопаток турбины высокого давления ГТД из перспективных никелевых жаропрочных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S5. С. 45–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-45-55.

22. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Горлов Д.С. Исследование жаростойкости и кинетики изменения элементного состава композиции из титанового сплава ВТ41 с жаростойкими покрытиями // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 55. С. 61–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-61-66.
23. Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Щепилов А.А., Коннова В.И. Исследование демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 55. С. 67–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-67-72.
24. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Кашин Д.С. Формирование термодиффузионных барьерных слоев на поверхности безуглеродистых жаропрочных рений- и рений-рутенийсодержащих сплавов методом газовой цементации // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 3 (36). С. 27–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-27-37.
25. Будиновский С.А., Петрушин Н.В., Бенклян А.С., Елютин Е.С. Защита жаропрочного никелевого рений-рутениевого сплава ВЖМ10 от окисления в области температур 1150–1300 °С // *Электрометаллургия*. 2024. № 3. С. 24–31. DOI: 10.31044/1684-5781-2024-0-3-24-31.
26. Будиновский С.А., Азаровский Е.Н., Бенклян А.С. Защита сплава ВЖМ4 от коррозии в области температур 850–1050 °С // *Электрометаллургия*. 2023. № 6. С. 15–24. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-6-15-24.
27. Косьмин А.А., Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Жаро- и коррозионностойкое покрытие для рабочих лопаток турбины из перспективного жаропрочного сплава ВЖЛ21 // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 17–24. DOI: 0.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24.
28. Смирнов А.А., Будиновский С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины ГТД из никелевых жаропрочных рений и рений-рутений содержащих сплавов // *Новые разработки в области защитных, теплозащитных и упрочняющих покрытий для деталей ГТД: сб. докл. науч.-техн. конф. М.: ВИАМ, 2016. С. 13.*
29. Мовенко Д.А., Заводов А.В., Лаптев А.Б., Лощина А.О. Изменение структуры сплава ВЖМ-4 в процессе высокотемпературной солевой коррозии при 750 °С // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2024. № 5 (827). С. 22–29.
30. Мубояджян С.А. Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2011. № 3. С. 26–30.
31. Способ защиты лопаток газовых турбин: пат. 2404286 Рос. Федерация; заявл. 22.10.09; опубл. 20.11.10.
32. Мубояджян С.А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий // *Энциклопедия инженера-химика*. 2012. № 5. С. 34–41.
33. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Часть III // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4 (37). С. 29–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-29-37.
34. Горлов Д.С., Мубояджян С.А., Щепилов А.А., Александров Д.А. Исследование эрозионной стойкости и теплостойкости ионно-плазменных демпфирующих покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 2 (41). С. 11–17. DOI: 0.18577/2071-9140-2016-0-2-11-17.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-34.
2. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for compressor blades of gas turbine engines. *Elektrometallurgiya*, 2016, no. 10, pp. 23–38.
3. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N., Ion etching and surface modification of critical machine parts in vacuum-arc plasma. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie*, 2011, no. SP2, pp. 149–163.
4. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system Gd₂O₃-ZrO₂-HfO₂ and Sm₂O₃-Y₂O₃-HfO₂. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
5. Kablov E.N. Science as a branch of the economy. *Science and Life*, 2009, no. 10, pp. 6–10.

6. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-protective coatings with a ceramic layer of low thermal conductivity based on zirconium oxide for high-pressure turbine blades of promising gas turbine engines. *Modern achievements in the field of creating promising non-metallic composite materials and coatings for aviation and space technology*: Reports of Sci. and Tech. Conf. Moscow: VIAM, 2015, p. 3.
7. Doronin O.N., Gorlov D.S., Azarovskiy E.N., Kochetkov A.S. Study of the structure and properties of a heat-resistant coating at high-temperature deformation of samples from titanium intermetallic alloy. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
8. Batraev I.S., Rybin D.K., Ivanyuk K.V., Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A. Wear resistant detonation coatings based on tungsten carbide for aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
9. Goncharov B.E., Sipatov A.M., Cherkashneva N.N., Pleskan A.Yu., Samokhvalov N.Yu., Vaganova M.L., Sorokin O.Yu., Solntsev St.S., Evdokimov S.A. Studies of thermal shock resistance of an anti-oxidation coating for a multi-layered ceramic composite. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-51-58.
10. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Zhuravleva P.L., Gorlov D.S. Investigation of the effect of surface preparation and ion-assisted deposition on the structure and properties of erosion-resistant ion-plasma coating. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.
11. Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Research of possibility of increase of office characteristics of compressor blades of GTE by method of ionic modifying of surface. *Trudy VIAM*, 2013, no. 1, paper no. 02. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025).
12. Muboyadzhyan S.A. Industrial ion-plasma equipment for applying protective coatings. *Entsiklopediya inzhenera-khimika*, 2012, no. 5, pp. 34–41.
13. Galoyan A.G., Muboyadzhyan S.A., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Corrosion-resistant coating for protection of GTE details made of high-strength maraging constructional steel with operating temperature up to 450°C. *Trudy VIAM*, 2014, no. 6, paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3.
14. Shchepilov A.V., Muboyadzhyan S.A., Gorlov D.S., Konnova V.I. Investigation of the ion-plasma coatings influence on damping capacity of «alloy-coating» composition during testing on vibrodynamic bench. *Trudy VIAM*, 2015, no. 4, paper no. 8. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-8-8.
15. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Gorlov D.S. reinforcing properties of ion-plasma coatings using plasma assisted deposition. *Trudy VIAM*, 2015, no. 7, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-7-7.
16. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Nanolayer strengthening coverings for protection of steel and titanic compressor blades of GTE. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 3, pp. 3–8.
17. Muboyadzhyan S.A., Galoyan A.G. Complex thermodiffusion heat resisting coatings for carbon-free hot strength alloys on nickel basis. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 3, pp. 25–30.
18. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Protective and strengthening ion-plasma coverings for blades and other responsible details of the GTE compressor. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 71–81.
19. Azarovskiy E.N., Muboyadzhyan S.A. Modifying of surface of details from constructional steels in vacuum and arc plasma of titanium. P. I. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 3, pp. 20–25.
20. Azarovskiy E.N., Muboyadzhyan S.A. Modifying of surface of details from constructional steels in vacuum and arc plasma of titanium. P. II. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-3-11.
21. Galoyan A.G., Muboyadzhyan S.A., Kashin D.S. Thermal diffusion processes for saturation of internal surface of GTE turbine blades made of advanced high temperature superalloys with refractory elements and carbon. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 45–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-45-55.

22. Alexandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Gayamov A.M., Gorlov D.S. Studies of heat resistance and kinetics of elemental composition of VT41 titanium alloy with heat-resistant coatings. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 61–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-61-66.
23. Muboyadzhyan S.A., Gorlov D.S., Shchepilov A.A., Konnova V.I. Study of damping capacity of ion-plasma coatings. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 67–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-67-72.
24. Galoyan A.G., Muboyadzhyan S.A., Kashin D.S. Termodiffusion barrier formation under vacuum cementation process on rhenium and rhenium-ruthenium comprising nickel based superalloys. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2015, no. 3 (36), pp. 27–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-27-37.
25. Budinovskiy S.A., Petrushin N.V., Benklyan A.S., Elyutin E.S. Protection of heat-resistant nickel-rhenium-ruthenium alloy VZhM10 from oxidation in the temperature range of 1150–1300 °C. *Electrometallurgiya*, 2024, no. 3, pp. 24–31. DOI: 10.31044/1684-5781-2024-0-3-24-31.
26. Budinovskiy S.A., Azarovskiy E.N., Benklyan A.S. Protection of VZhM4 alloy from corrosion in the temperature range of 850–1050 °C. *Electrometallurgiya*, 2023, no. 6, pp. 15–24. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-6-15-24.
27. Kosmin A.A., Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A. Heat and corrosion resistant coating for working turbine blades from promising high-temperature alloy VZhL21. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2017, no. 1 (46), pp. 17–24. DOI: 0.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24.
28. Smirnov A.A., Budinovskiy S.A. Heat-resistant and heat-protective coatings for gas turbine engine blades made of nickel-based heat-resistant rhenium and rhenium-ruthenium containing alloys. *New developments in the field of protective, heat-protective and hardening coatings for gas turbine engine parts*: Reports of Sci.-Tech. Conf. Moscow: VIAM, 2016, p. 13.
29. Movenko D.A., Zavadov A.V., Laptev A.B., Loshchinina A.O. Changes in the structure of VZhM-4 alloy during high-temperature salt corrosion at 750 °C. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2024, no. 5 (827), pp. 22–29.
30. Muboyadzhyan S.A. Protective coatings for hot gas turbine tract parts. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2011, no. 3, pp. 26–30.
31. *Method for protecting gas turbine blades*: pat. 2404286 Rus. Federation; appl. 22.10.09; publ. 20.11.10.
32. Muboyadzhyan S.A. Industrial ion-plasma equipment for applying protective coatings. *Entsiklopediya inzhenera-khimika*, 2012, no. 5, pp. 34–41.
33. Azarovskiy E.N., Muboyadzhyan S.A. Surface modification of parts from structural steel in vacuum-arc titanium plasma. P. III. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 29–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-29-37.
34. Gorlov D.S., Muboyadzhyan S.A., Shchepilov A.A., Aleksandrov D.A. The research of erosion resistance and heat resistance of the ion-plasma damping coatings. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2016, no. 2, pp. 11–17. DOI: 0.18577/2071-9140-2016-0-2-11-17.

Информация об авторах

Будиновский Сергей Александрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бенклян Артем Сергеевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мовенко Дмитрий Александрович, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Татарников Сергей Владимирович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey A. Budinovskiy, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem S. Benklyan, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dimitriy A. Movenko, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey V. Tatarnikov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.08.2025.
The article was submitted 06.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 08.08.2025.