

Научная статья

УДК 669.058

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-25-36

ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ И КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д.А. Александров¹, А.С. Бенклян¹

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

Аннотация. Приведена общая информация о наиболее часто используемых и перспективных эрозионностойких и коррозионностойких ионно-плазменных покрытиях для защиты деталей газотурбинных двигателей. Проанализированы основные методы нанесения защитных покрытий. Показаны преимущества и недостатки, а также некоторые свойства используемых покрытий, такие как эрозионная и коррозионная стойкость, рабочая температура. Рассмотрены основные тенденции в области эрозионно-коррозионностойких ионно-плазменных покрытий. Приведены особенности нанесения защитных покрытий на крупногабаритные детали компрессора газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, эрозионностойкие покрытия, эрозионно-коррозионностойкие покрытия, ионно-плазменные покрытия, лопатки газотурбинного двигателя, импеллер

Для цитирования: Александров Д.А., Бенклян А.С. Эрозионностойкие и коррозионностойкие покрытия для защиты деталей компрессора газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2024. № 5 (135). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-25-36.

Scientific article

EROSION-RESISTANT AND CORROSION-RESISTANT COATINGS TO PROTECT COMPRESSOR PARTS OF GAS TURBINE ENGINES

D.A. Aleksandrov¹, A.S. Benklyan¹

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

Abstract. General information is provided on the most commonly used and promising erosion-resistant and corrosion-resistant ion-plasma coatings for the protection of gas turbine engine parts. A brief analysis of the main methods of applying protective coatings to parts of the gas turbine engine compressor is carried out. The strengths and weaknesses of the coatings used are shown, as well as some properties such as erosion and corrosion resistance and operating temperature. The main development trends in the field of erosion-corrosion-resistant ion-plasma coatings are considered. The issues of the peculiarities of applying protective coatings to large-sized parts of the gas turbine engine compressor are discussed.

Keywords: gas turbine engine, erosion-resistant coatings, erosion-corrosion-resistant coatings, ion-plasma coatings, gas turbine engine blades, impeller

For citation: Aleksandrov D.A., Benklyan A.S. Erosion-resistant and corrosion-resistant coatings to protect compressor parts of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-25-36.

Введение

Высокий спрос на эффективную энергетику в разных отраслях промышленности вызван ростом мировой экономики и населения. Одной из важных областей является авиационное газотурбостроение, а именно современная и экономичная эксплуатация газотурбинных двигателей (ГТД) для самолетов и вертолетов [1, 2]. Увеличить ресурс ГТД можно за счет нескольких составляющих, в том числе повышения стойкости деталей горячего тракта, особенно компрессора, к действию факторов окружающей среды, таких как пылевоздушная и солевая коррозия. Рабочие лопатки компрессора обычно изготавливают из сталей и титановых сплавов. Результатом эрозионного воздействия пылевоздушного потока на лопатки компрессора является главным образом изнашивание кромок и верхней части пера со стороны корыта, что может привести к снижению производительности компрессора или поломке двигателя.

На стальные и титановые лопатки компрессора ГТД при эксплуатации в условиях морского, влажного и тропического климата коррозионное воздействие оказывают ионы хлора, которые содержатся во влажном воздухе и отложениях NaCl, образующихся при полетах или посадках летательного аппарата непосредственно вблизи морской поверхности (посадка на палубу авианосца, противолодочного корабля или приводные гидросамолета) [3]. Коррозионное повреждение сталей и титановых сплавов характеризуется образованием на поверхности лопаток компрессора оксидов, появлением питтингов и каверн, что может привести к возникновению усталостных трещин и даже разрушению лопаток.

Титановые сплавы, имеющие преимущество перед сталями по плотности, менее подвержены коррозии, что является причиной их активного использования [4]. Однако у данного материала есть и недостатки – ресурс лопаток из титановых сплавов значительно снижается из-за возникновения усталостных трещин в процессе эксплуатации. Вместе с тем стальные лопатки имеют большую плотность, менее чувствительны к усталостным трещинам и более устойчивы к воздействию пылевой эрозии, но нуждаются в защите от коррозии при повышенных температурах [5, 6].

Помимо рабочих лопаток применяются более крупные детали компрессора, а именно: рабочие моноколеса (блиск, импеллер), статорные кольца (или полукольца) – блинги. Для защиты лопаток и других деталей компрессора ГТД от воздействия негативных факторов применяют различные эрозионностойкие и коррозионностойкие защитные покрытия. Существуют разные методы нанесения защитных покрытий, применяемых для деталей компрессора, среди которых можно выделить детонационные [7], газопламенные [8], ионно-плазменные вакуумно-дуговые и магнетронные [9, 10]. К основным используемым системам покрытий относятся эрозионностойкие (ZrN, TiN, CrC), коррозионностойкие (на основе (Ti,Cr)N, MeCrAlY, где Me: Ni, Fe или Co) и эрозионно-коррозионностойкие (типа Ti/TiN, TiN/CrN, TiCrAlY + TiN).

Данная работа представляет собой обзор, посвященный основным видам покрытий для защиты деталей компрессора ГТД от эрозии и коррозии, особенностям используемого оборудования и составов покрытий, а также тенденциям и направлениям исследований в области их применения. Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Методы нанесения эрозионностойких и коррозионностойких защитных покрытий

В табл. 1 приведены преимущества и недостатки различных методов нанесения покрытий на детали горячего тракта ГТД, в том числе компрессора.

Таблица 1

Методы нанесения эрозионностойких и коррозионностойких защитных покрытий

Методы нанесения	Преимущества	Недостатки	Область применения	Источники литературы
Детонационное напыление (D-Gun)	Высокая скорость осаждения покрытий и адгезия. Широкая вариативность наносимых составов за счет использования порошков	Высокая шероховатость поверхности (необходима финишная обработка). Узкий диапазон регулирования толщины покрытия. Невозможность нанесения на детали сложной формы	Нанесение эрозионностойких и износостойких покрытий на детали компрессора газотурбинного двигателя, лопасти винтов	[7]
Газопламенное напыление (APS, HVOF, LPPS)		Высокая шероховатость поверхности (необходима финишная обработка). Узкий диапазон регулирования толщины покрытия		[8]
Химическое осаждение (CVD)	Низкая скорость осаждения. Возможность нанесения покрытия на детали сложной формы	Высокая температура процесса (~1000 °C)	Нанесение жаростойких и коррозионностойких покрытий на детали газотурбинного двигателя	[11]
Магнетронное распыление (MS)	Высокая адгезия. Низкая шероховатость поверхности. Широкий диапазон параметров процесса осаждения	Низкая скорость осаждения покрытий	Нанесение эрозионностойких, износостойких и коррозионностойких покрытий на детали компрессора газотурбинного двигателя	[9, 10, 12]
Ионно-плазменное вакуумно-дуговое осаждение (PVD)	Высокая скорость осаждения покрытий и адгезия. Низкая шероховатость поверхности. Возможность нанесения покрытия на детали сложной формы. Широкий диапазон параметров процесса осаждения	Наличие капельной фазы в структуре покрытия		[13]

D-Gun – detonation gun (осаждение детонацией); APS – atmosphere plasma deposition (атмосферное плазменное осаждение); HVOF – high velocity oxygen fuel (высокоскоростное распыление топливом с кислородом); LPPS – low pressure plasma spray (плазменное распыление при низком давлении); CVD – chemical vapor deposition; MS – magnetron sputtering (магнетронное распыление); PVD – physical vapor deposition (вакуумно-дуговое осаждение).

По совокупности особенностей технологического процесса, таких как высокая воспроизводимость, экологичность, широкий диапазон регулирования технологических параметров, включая скорость осаждения и температуру подложки, возможность нанесения на детали сложной формы, выделяют ионно-плазменное вакуумно-дуговое осаждение как наиболее часто используемый для деталей ГТД метод.

Эрозионностойкие покрытия

Для защиты от эрозионного воздействия применяются твердые покрытия на основе нитридов или карбидов металлов. В табл. 2 приведены часто используемые эрозионностойкие ионно-плазменные покрытия, характеристики которых обобщены на основе анализа данных из открытых источников.

Основные эрозионностойкие ионно-плазменные покрытия

Покрyтия	Преимущества	Недостатки	Источники литературы
CrC	Хорошая адгезионная прочность на сталях и никелевых сплавах. Рабочая температура до 650 °С. Высокая эрозионная стойкость во всем диапазоне углов атаки (от 20 до 90 градусов)	Низкая адгезионная прочность на титановых сплавах. Низкая коррозионная стойкость в условиях морского и приморского климата	[14]
ZrN	Хорошая адгезионная прочность на титановых сплавах. Рабочая температура до 450 °С. Высокая эрозионная стойкость во всем диапазоне углов атаки (от 20 до 90 градусов)	Низкая адгезионная прочность на сталях и никелевых сплавах. Низкая коррозионная стойкость в условиях морского и приморского климата	[14]
TiN	Хорошая адгезионная прочность на титановых сплавах и сталях. Рабочая температура до 500 °С. Высокая эрозионная стойкость во всем диапазоне углов атаки (от 20 до 90 градусов)	Низкая коррозионная стойкость в условиях морского и приморского климата	[14, 15]
TiN/Ti	Хорошая адгезионная прочность на титановых сплавах и сталях. Рабочая температура до 450 °С. Высокая эрозионная стойкость при использовании касательных углов атаки и фракций абразивных частиц размером до 100 мкм. Минимальное влияние на выносливость титановых сплавов	Низкая коррозионная стойкость в условиях морского и приморского климата. Низкая эрозионная стойкость в диапазоне углов атаки от 30 до 90 градусов при использовании смешанной фракции абразивных частиц размером от 100 до 700 мкм	[16, 17]
(TiAl)N/TiN	Хорошая адгезионная прочность на титановых сплавах и сталях. Рабочая температура до 650–700 °С. Высокая микротвердость (до 34 ГПа). Высокая эрозионная стойкость при использовании касательных углов атаки и фракций абразивных частиц размером до 100 мкм		[18]
V + (Ti–V)N + (Ti–V)/(Ti–V)N	Высокая эрозионная стойкость во всем диапазоне углов атаки (от 15 до 60 градусов)	Низкая коррозионная стойкость в условиях морского и приморского климата	[19]

Монослойные покрытия, такие как карбид хрома, нитрид титана и нитрид циркония, имеют высокую эрозионную стойкость (увеличивая стойкость защищаемого сплава в 5–10 раз) при эксплуатации в общеклиматических условиях. Особый интерес представляют покрытия типа TiN/Ti и (TiAl)N/TiN. За счет слоистой структуры, в том числе нанослойной, покрытия являются более универсальным при нанесении на различные подложки (никель, титан, сталь). На рис. 1 приведена стандартная структура биметаллического керметного многослойного покрытия типа (TiAl)N/TiN [18], на рис. 2 – микроструктура покрытия TiN/Ti (ER-7) (фирма MDS-Prad, Канада) [20].

За счет подбора толщины слоев покрытия можно уменьшить остаточные напряжения и улучшить выносливость системы «основа–покрытие».



Рис. 1. Стандартная структура биметаллического покрытия типа (TiAl)N/TiN

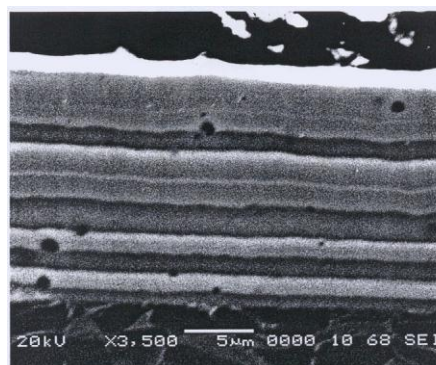


Рис. 2. Микроструктура покрытия ER-7, содержащего слои титана и нитрида титана

В работе [19] описано ионно-плазменное покрытие $V + (Ti-V)N + (Ti-V)/(Ti-V)N$ толщиной 15–16 мкм, наносимое на титановый сплав ВТЗ-1. Достигнуто повышение эрозионной стойкости в 3 раза по сравнению с основой без покрытия. Испытания на эрозионную стойкость проводили в диапазоне углов атаки пылевоздушного потока от 15 до 60 градусов с использованием фракций кварцевого песка размером от 180 до 400 мкм. Показано, что выбор эрозионностойких покрытий зависит от конкретных условий эксплуатации. Например, наличие пылезащитного устройства снижает требования к толщине и микротвердости покрытия.

Коррозионностойкие покрытия

Для повышения коррозионной стойкости материалов, в особенности сталей, применяются различные металлические покрытия. В табл. 3 приведены наиболее часто используемые коррозионностойкие ионно-плазменные покрытия.

Таблица 3

Основные коррозионностойкие ионно-плазменные покрытия

Покрытия	Преимущества	Недостатки	Источники литературы
(Ti-Cr)N	Удовлетворительная коррозионная стойкость. Рабочая температура до 550 °С. Хорошая адгезия	Необходимость использования двухкатодной схемы нанесения. Низкая коррозионная стойкость в условиях морского и приморского климата	[21]
MeCrAlY, где Me: Fe, Ni или Co	Рабочая температура до 650 °С. Удовлетворительная коррозионная стойкость в общеклиматических условиях. Высокая адгезионная прочность на сталях и никелевых сплавах	Недостаточная коррозионная стойкость в условиях морского и приморского климата	[22]
NiCoCrAlY + AlCoSiY	Высокая адгезионная прочность на никелевых сплавах и сталях. Рабочая температура до 700 °С. Высокая коррозионная стойкость во всеклиматических условиях эксплуатации. Защита от сульфидно-оксидной коррозии	Необходимость двухстадийного процесса нанесения покрытий (при использовании однокатодной установки)	[23]

В настоящее время в научно-технической литературе в качестве коррозионностойких ионно-плазменных покрытий представлены покрытия на основе нитридов

титана, легированных высоким содержанием хрома. Кроме того, исследована возможность использования для этих целей слоистого покрытия TiN/Ti [15]. Промышленное применение для защиты от коррозии лопаток компрессора ГТД и газотурбинных установок получили покрытия CoCrAlY и NiCoCrAlY + AlCoSiY, изготовленные одностадийным и двухстадийным методом ионно-плазменного осаждения соответственно.

Эрозионно-коррозионностойкие покрытия

При эксплуатации летательных аппаратов в различных климатических условиях для защиты стальных и титановых деталей компрессора ГТД применяют эрозионно-коррозионностойкие покрытия. В табл. 4 приведены некоторые варианты эрозионно-коррозионностойких ионно-плазменных покрытий.

Таблица 4

Варианты эрозионно-коррозионностойких ионно-плазменных покрытий

Покрытия	Преимущества	Недостатки	Источники литературы
Ni + TiN/Ti (ЭК-7)	Хорошая адгезионная прочность на титановых сплавах и сталях. Рабочая температура до 450 °С. Высокая эрозионная стойкость при использовании касательных углов атаки и фракций абразивных частиц размером до 100 мкм. Минимальное влияние на выносливость титановых сплавов. Удовлетворительная коррозионная стойкость в общеклиматических условиях	Низкая коррозионная стойкость в условиях морского и приморского климата. Низкая эрозионная стойкость в диапазоне углов атаки от 30 до 90 градусов при использовании смешанной фракции абразивных частиц размером от 100 до 700 мкм	[14]
TiN/CrN	Хорошая адгезионная прочность на титановых сплавах и сталях. Рабочая температура до 700 °С. Высокая эрозионная стойкость во всем диапазоне углов атаки (от 20 до 70 градусов). Высокая коррозионная стойкость во всеклиматических условиях эксплуатации	Нет	[24]
TiAlCrN/CrN	Высокая адгезионная прочность на титановых сплавах и сталях. Рабочая температура до 800 °С. Удовлетворительная эрозионная стойкость во всем диапазоне углов атаки (от 20 до 70 градусов)	Нет	[25]
TiAlCrN/CrN + TiN	Хорошая адгезионная прочность на титановых сплавах. Рабочая температура до 500 °С. Высокая эрозионная стойкость в широком диапазоне углов атаки (от 20 до 55 градусов). Удовлетворительная коррозионная стойкость в условиях горячесолевого коррозии	Низкая эрозионная стойкость при больших углах атаки (от 70 до 90 градусов)	[26]

В работах [14, 24] описано покрытие TiN/CrN, которое многократно (от 6 до 15 раз) повышает эрозионную стойкость сталей и титановых сплавов, а также коррозионную стойкость сталей при эксплуатации во всеклиматических условиях. Данное покрытие можно использовать для увеличения эрозионной и коррозионной стойкости лопаток компрессора ГТД при температуре эксплуатации до 650–700 °С.

В работе [17] приведено нанослойное покрытие системы TiAlCrN/CrN, отличающееся наличием сложного нитрида титана с высоким содержанием алюминия и хрома. За счет такого состава рабочая температура покрытия достигает 800 °С, при этом эрозионная стойкость сталей и сплавов увеличивается в 2 раза при угле атаки пылевоздушного потока 70 градусов. На рис. 3 приведены микроструктуры покрытий TiN/CrN и TiAlCrN/CrN.

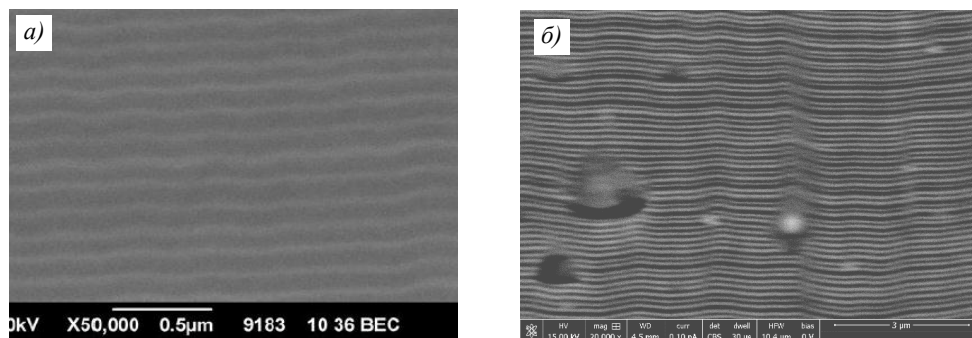


Рис. 3. Микроструктуры покрытий TiN/CrN (а) и TiAlCrN/CrN (б)

Разработано эрозионно-коррозионностойкое покрытие для защиты титановых сплавов [26]. Помимо многократного повышения эрозионной стойкости достигнуто повышение коррозионной стойкости в условиях горячесолевого коррозии при температуре до 500 °С. Покрытие наносится за один технологический цикл и может применяться для защиты деталей сложной формы типа «моноколесо импеллера» (центробежный компрессор).

Особенности нанесения эрозионностойких и коррозионностойких ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали компрессора газотурбинного двигателя

Для нанесения эрозионностойких и коррозионностойких покрытий используются многокатодные установки, которые за счет большого количества испарителей обеспечивают высокую скорость осаждения на крупногабаритную деталь в большом объеме камеры. На рис. 4 приведена принципиальная схема установки роторного типа для нанесения ионно-плазменных покрытий [27]. За счет использования большого количества протяженных испарителей достигается высокая производительность процесса и равномерное осаждение покрытия на крупногабаритную деталь.

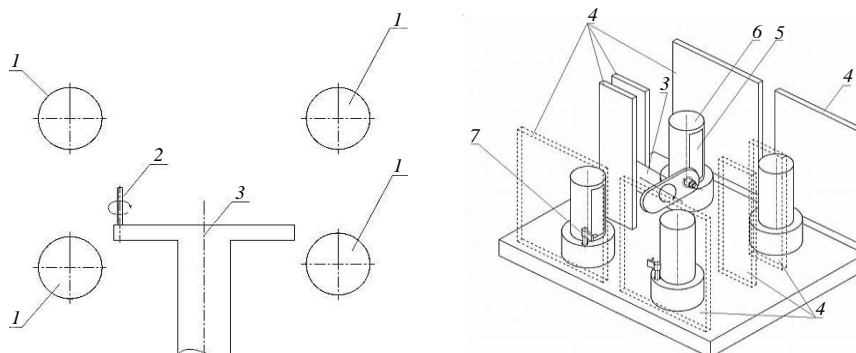


Рис. 4. Принципиальная схема установки роторного типа для нанесения ионно-плазменных покрытий: 1 – катодный испаритель; 2 – шток крепления деталей; 3 – ротор привода деталей; 4 – анод; 5 – катод; 6 – катодный экран; 7 – механизм поджига

Для деталей более сложной формы типа «импеллер» используется специальная оснастка с многовариантным вращением в разных плоскостях [28] либо механизм поворота испарителей [26]. На рис. 5 приведена схема оснастки с вращением детали в разных плоскостях.

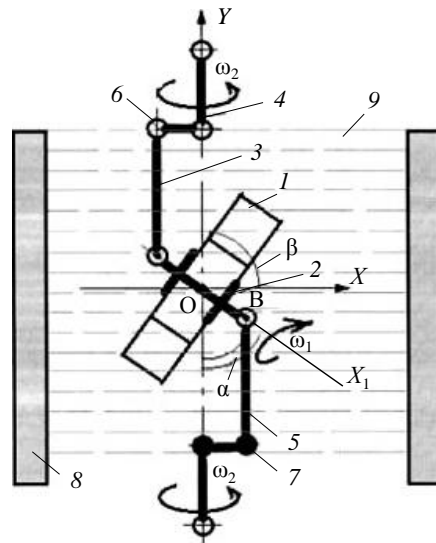


Рис. 5. Схема оснастки с вращением детали в разных плоскостях [28]: 1 – деталь; 2 – вращающаяся ось крепления детали; 3 – верхний шток крепления механизма наклона детали; 4 – вращающийся шток привода; 5 – нижний шток крепления механизма наклона детали; 6, 7 – верхний и нижний поворотный кулачок привода; 8 – катодный испаритель; 9 – поток плазмы

Существенными недостатками такой конструкции являются сложность и дороговизна ее изготовления, учитывая, что оснастка в ионно-плазменных установках является расходоуемой деталью.

Заключения

Установлено, что в качестве эрозионностойких, коррозионностойких и эрозионно-коррозионностойких высокотемпературных покрытий для деталей компрессора газотурбинных двигателей используются ионно-плазменные монослойные и многослойные системы на основе жаропрочных сплавов, нитридов и карбидов металлов, в том числе TiAlN, TiAlCrN, Ti/TiN и др.

Основными технологиями получения систем эрозионно-коррозионностойких, эрозионностойких и коррозионностойких покрытий для защиты деталей компрессора ГТД в зарубежной и отечественной промышленности являются PVD-процессы. В области развития данного направления выявлены следующие тенденции:

- совершенствование технологии нанесения покрытий применительно к крупногабаритным деталям ГТД (блиски, импеллеры, блинги) за счет усовершенствования планетарных приводов деталей и использования нескольких испарителей с разных сторон;
- повышение эрозионной и коррозионной стойкости покрытия за счет использования усовершенствованного состава (сложные нитриды с добавлением металлов (Al, Cr, V)), ассистированного осаждения (ионами аргона, азота) и слоистой конструкции с чередующимися твердым эрозионностойким и мягким коррозионностойким подслоями;
- улучшение адгезии покрытия и снижение уровня остаточных напряжений в покрытии за счет применения нанослоев с различной твердостью, а также сочетания внутри одного покрытия слоев как металлов и сплавов, так и их нитридов различной толщины.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. Закирова Л.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Мовенко Д.А., Лаптев А.Б. Особенности формирования диффузионного слоя Sn–Zn–Fe на границе гальванотермического покрытия системы цинк–олово и стали 30ХГСА с высокой защитной способностью // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-61-71.
4. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
5. Якушева Н.А. Высокопрочные конструкционные стали для деталей шасси перспективных изделий авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
6. Севальнев Г.С., Анцыферова М.В., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г., Власов И.И. Влияние концентрации азота на структуру и свойства экономнолегированной конструкционной стали // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
7. Батраев И.С., Рыбин Д.К., Иванюк К.В., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А. 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: 10.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
8. Drexler J.M., Shinoda K., Ortiz A.L. et al. Air-plasma-sprayed thermal barrier coatings that are resistant to high-temperature attack by glassy deposits // Acta Materialia. 2010. Vol. 58. P. 6835–6844.
9. Pessoa R.S., Fraga M.A., Santos L. et al. Plasma-assisted techniques for growing hard nanostructured coatings. An overview // Anti-Abrasive Nanocoatings / Ed. M. Aliofkhazraei. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. P. 455–479.
10. Kim K.H., Sung-Ryong C., Soon-Young Y. Superhard Ti–Si–N coatings by a hybrid system of arc ion plating and sputtering techniques // Surface and Coatings Technology. 2002. Vol. 161. P. 243–248.
11. Carlsson J.-O., Martin P.M., Martin P. Chemical Vapor Deposition // Handbook of deposition technologies for films and coatings. Science, Applications and Technology. Oxford: Elsevier Inc., 2010. P. 406.
12. Depla D., Mahieu S., Greene J. Sputter deposition processes // Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. Science application and technology. Oxford: Elsevier Inc., 2010. P. 253–296.
13. Mehran Q.M., Fazal M.A., Razak B.A., Rubaiee S.A. Critical Review on Physical Vapor Deposition Coatings Applied on Deferent Engine Components // Critical Reviews in Solid State and Material Sciences. 2018. Vol. 43. No. 2. P. 158–175.
14. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for gas turbine engine compressor blades // Russian metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017. P. 494–504.
15. Bonu V., Jeevitha M., Kumar V.P. et al. Solid particle erosion and corrosion resistance performance of nanolayered multilayered Ti/TiN and TiAl/TiAlN coatings deposited on Ti₆Al₄V substrates // Surface and Coating Technology. 2020. Vol. 387. P. 125531. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125531.
16. Sun Z., He G., Meng Q. et al. Corrosion mechanism investigation of TiN/Ti coating and TC4 alloy for aircraft compressor application // Chinese Journal of Aeronautics. 2019. Vol. 33 (6). P. 1–12.

17. Александров Д.А., Горлов Д.С., Будиновский С.А. Применение комплекса ионно-плазменных технологий для защиты лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя от эрозионного износа и фреттинга // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-71-80.
18. Sagalovych A., Popov V., Kononyhin A. et al. Vacuum plasma erosion resistant 2D nanocomposite coating Avinit for compressor blades of gas turbine engines of aircraft engines // Mechanical Advantage Technologies. 2023. Vol. 7. No. 1. P. 7–15. DOI: 10.20535/2521-1943.2023.7.1.264788.
19. Смыслов А.М., Дыбленко Ю.М., Прокопчук К.А. Оценка влияния угла атаки и фракционной зернистости песка на эрозионную стойкость поверхности титановых сплавов с ионно-плазменными защитными покрытиями // Вопросы науки и образования. 2012. № 18 (143). С. 4–10.
20. Di W., Zhen Y. Solid Particle Erosion // Advances in Turbomachinery. London: IntechOpen, 2023. P. 1–19. DOI: 10.5772/intechopen.109383.
21. Reedy M.W., Eden T.J., Potter J.K., Wolfe U.E. Erosion performance and characterization of nanolayer (Ti, Cr)N hard coatings for gas turbine engine compressor blade applications // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 206 (2). P. 464–472.
22. Balitskii A.I., Kvasnytska Y.H., Ivaskevych L.M. et al. Hydrogen and corrosion resistance of nickel superalloys for gas turbines, engines cooled blades // Energies. 2023. Vol. 16. P. 1154.
23. Плотников Н.В., Гонтюрев В.А., Селиванов К.С. и др. Особенности микроструктуры и свойств комбинированного покрытия СДП-1 + ВСДП-20, нанесенного в едином вакуумном объеме. URL: <http://www.nppuast.com> (дата обращения: 10.03.2024). DOI: 10/53454/9785986206257_167.
24. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Коннова В.И. Повышение эрозионной и коррозионной стойкости стальных лопаток компрессора ГТД с помощью нанослойного покрытия // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 4. С. 1–7.
25. Physical vapour deposition process for depositing erosion resistant coatings on a substrate: pat. CA2600097; appl. 31.08.07; publ. 28.02.09.
26. Александров Д.А., Доронин О.Н., Журавлева П.Л., Бенклян А.С. Исследование эрозионно-коррозионностойких покрытий для защиты титановых моноколес вертолетных газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-90-100.
27. Будиновский С.А., Ляпин А.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С., Татарников С.В. Нанесение многослойного антифреттингового покрытия на крупногабаритные изделия // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-98-107.
28. Способ нанесения защитного покрытия на лопатки блиска из титанового сплава: пат. 2692356 Рос. Федерация; заявл. 20.06.18; опубл. 24.06.19.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. Zakirova L.I., Afanasyev-Khodykin A.N., Movenko D.A., Laptev A.B. Features of the formation of the Sn–Zn–Fe diffusion layer at the boundary of galvanothermal coating of systems zinc–tin and 30HGSA steel with high protective capability. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-61-71.

4. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a $\alpha + \beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
5. Yakusheva N.A. High-strength constructional steels for landing gears of perspective products of aircraft equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
6. Sevalnev G.S., Antsyferova M.V., Dulnev K.V., Sevalneva T.G., Vlasov I.I. Influence of nitrogen concentration on the structure and properties of sparingly alloyed structural steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
7. 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 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
8. Drexler J.M., Shinoda K., Ortiz A.L. et al. Air-plasma-sprayed thermal barrier coatings that are resistant to high-temperature attack by glassy deposits. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, pp. 6835–6844.
9. Pessoa R.S., Fraga M.A., Santos L. et al. Plasma-assisted techniques for growing hard nanostructured coatings. An overview. *Anti-Abrasive Nanocoatings*. Ed. M. Aliofkhaezaei. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015, pp. 455–479.
10. Kim K.H., Sung-Ryong C., Soon-Young Y. Superhard Ti–Si–N coatings by a hybrid system of arc ion plating and sputtering techniques. *Surface and Coatings Technology*, 2002, vol. 161, pp. 243–248.
11. Carlsson J.-O., Martin P.M., Martin P. Chemical Vapor Deposition. *Handbook of deposition technologies for films and coatings. Science, Applications and Technology*. Oxford: Elsevier Inc., 2010, p. 406.
12. Depla D., Mahieu S., Greene J. Sputter deposition processes. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. Science application and technology*. Oxford: Elsevier Inc., 2010, pp. 253–296.
13. Mehran Q.M., Fazal M.A., Razak B.A., Rubaiee S.A. Critical Review on Physical Vapor Deposition Coatings Applied on Deferent Engine Components. *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, 2018, vol. 43, no. 2, pp. 158–175.
14. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for gas turbine engine compressor blades. *Russian metallurgy (Metally)*, 2017, vol. 2017, pp. 494–504.
15. Bonu V., Jeevitha M., Kumar V.P. et al. Solid particle erosion and corrosion resistance performance of nanolayered multilayered Ti/TiN and TiAl/TiAlN coatings deposited on Ti_6Al_4V substrates. *Surface and Coating Technology*, 2020, vol. 387, p. 125531. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125531.
16. Sun Z., He G., Meng Q. et al. Corrosion mechanism investigation of TiN/Ti coating and TC4 alloy for aircraft compressor application. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, vol. 33 (6), pp. 1–12.
17. Alexandrov D.A., Gorlov D.S., Budinovskii S.A. Application of a complex of ion-plasma technologies to protect the compressor blades of a helicopter gas-turbine engine from erosion wear and fretting. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-71-80.
18. Sagalovych A., Popov V., Kononyhin A. et al. Vacuum plasma erosion resistant 2D nanocomposite coating Avinit for compressor blades of gas turbine engines of aircraft engines. *Mechanical Advantage Technologies*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.20535/2521-1943.2023.7.1.264788.
19. Smyslov A.M., Dyblenko Yu.M., Prokopchuk K.A. Assessing the influence of the angle of attack and fractional grain size of sand on the erosion resistance of the surface of titanium alloys with ion-plasma protective coatings. *Voprosy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 18 (143), pp. 4–10.
20. Di W., Zhen Y. Solid Particle Erosion. *Advances in Turbomachinery*. London: IntechOpen, 2023, pp. 1–19. DOI: 10.5772/intechopen.109383.

21. Reedy M.W., Eden T.J., Potter J.K., Wolfe U.E. Erosion performance and characterization of nanolayer (Ti, Cr)N hard coatings for gas turbine engine compressor blade applications. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206 (2), pp. 464–472.
22. Balitskii A.I., Kvasnytska Y.H., Ivaskviych L.M. et al. Hydrogen and corrosion resistance of nickel superalloys for gas turbines, engines cooled blades. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 1154.
23. Plotnikov N.V., Gontyurev V.A., Selivanov K.S. et al. *Features of the microstructure and properties of the combined coating SDP-1 + VSDP-20 applied in a single vacuum volume*. Available at: <http://www.nppuast.com> (accessed: March 10, 2024). DOI: 10/53454/9785986206257_167.
24. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Konnova V.I. Increasing the erosion and corrosion resistance of steel blades of a gas turbine engine compressor using a nanolayer coating. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2013, no. 4, pp. 1–7.
25. *Physical vapour deposition process for depositing erosion resistant coatings on a substrate*: pat. CA2600097; appl. 31.08.07; publ. 28.02.09.
26. Aleksandrov D.A., Doronin O.N., Zhuravleva P.L., Benklyan A.S. The research of erosion-corrosion-resistant coatings for protection of titanium impellers for helicopter gas-turbine engine. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-90-100.
27. Budinovskiy S.A., Lyapin A.A., Gorlov D.S., Benklyan A.S., Tatarnikov S.V. Multilayer antifretting coating on large-sized manufactures. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-98-107.
28. *Method of applying a protective coating to blisk blades made of titanium alloy*: pat. 2692356 Rus Federation; appl. 20.06.18; publ. 24.06.19.

Информация об авторах

Александров Денис Александрович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Denis A. Aleksandrov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 27.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.04.2024.
The article was submitted 27.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 04.04.2024.