

Научная статья

УДК 669.058

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-90-100

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТИТАНОВЫХ МОНОКОЛЕС ВЕРТОЛЕТНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д.А. Александров¹, О.Н. Доронин¹, П.Л. Журавлева¹, А.С. Бенклян¹

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

Аннотация. Исследованы эрозионно-коррозионностойкие покрытия, применимые для защиты моноколес компрессора газотурбинных двигателей из титановых сплавов. Изучены свойства перспективных систем ионно-плазменных покрытий: TiN–CrN, TiN/Ti/TiN, (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN. Проведены испытания на эрозионную и коррозионную стойкость, исследования остаточных напряжений в покрытии, испытания на многоцикловую усталость и металлографические исследования. Установлено влияние толщины и конструкции покрытий на эрозионную и коррозионную стойкость титановых сплавов, предел выносливости.

Ключевые слова: эрозионная стойкость, остаточные напряжения, ионно-плазменные покрытия, нитрид титана, многослойные покрытия

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-90-100.

Scientific article

THE RESEARCH OF EROSION-CORROSION-RESISTANT COATINGS FOR PROTECTION OF TITANIUM IMPELLERS FOR HELICOPTER GAS-TURBINE ENGINE

D.A. Aleksandrov¹, O.N. Doronin¹, P.L. Zhuravleva¹, 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. The erosion-corrosion-resistant coatings applicable to protect impellers of a gas-turbine engine compressor made of titanium alloys are studied. The properties of promising systems of ion-plasma coatings are studied: (TiN–CrN), TiN/Ti/TiN, (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN. Erosion and corrosion resistance tests were carried out, residual stresses in the coating were investigated, high-cycle fatigue tests and metallographic studies were carried out. The influence of the thickness and design of coatings on the erosion and corrosion resistance of titanium alloys, the endurance limit has been established.

Keywords: erosion resistance, residual stresses, ion-plasma coatings, titanium nitride, multi-layer coatings

For citation: 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. 9 (127), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-90-100.

Введение

Эксплуатация воздушных судов в различных климатических условиях сопровождается рядом неблагоприятных факторов: пылевоздушной эрозией, воздействием коррозионной среды во влажном или морском климате. С точки зрения снижения массы газотурбинных двигателей (ГТД) перспективным направлением является широкое использование титановых сплавов для изготовления ответственных деталей горячего тракта – лопаток компрессора высокого давления. Для их защиты от неблагоприятных факторов, возникающих при эксплуатации, применяют универсальные эрозионно-коррозионностойкие (ЭК) ионно-плазменные покрытия [1, 2].

Основными разработчиками таких покрытий являются: MDS-Prad (Канада), General Electric Company (США), MTU Aeroengine (Германия), НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (Россия), АО «НПЦ Уралавиаиспехтехнология» (Россия). Работы в этой области также проводят в Китае и Японии.

По своей конструкции ЭК-покрытия могут быть различными: многослойные (в том числе с нанослоями), сочетающие эрозионностойкие и коррозионностойкие слои; монослойные гетероструктуры на основе нитридов титана; композиционные. Недостатком перечисленных технологий, несмотря на высокие показатели эрозионной и коррозионной стойкости, является невозможность осаждения покрытий на крупногабаритные детали ГТД (свыше 180 мм в высоту и 100 мм в ширину).

Немаловажным аспектом в области исследований является укрупнение узлов компрессора ГТД, т. е. переход от конструкции «диск + рабочие лопатки» к конструкции «моноколесо типа «блиск» (в том числе центробежный компрессор-импеллер)». Использование импеллера в малогабаритном вертолетном двигателе или двигателе беспилотного летательного аппарата имеет явные преимущества, поскольку позволяет добиться такой же компрессии воздуха, как и многоступенчатый компрессор той же мощности, при гораздо меньших габаритах. С учетом большого размера блисков или импеллеров (>280 мм), а также сложности конструкции (закрывающейся в наличии больших зон перекрытия для осаждаемых покрытий при использовании классических испарителей и приводов деталей) необходимо помимо оборудования с объемной рабочей камерой применять усовершенствованные приводы вращения деталей и источники с протяженной зоной испарения.

В России существует большой задел в области разработки технологий нанесения и материалов ЭК-покрытий для ответственных компонентов компрессора авиационных (вертолетных) ГТД и автоматизированного оборудования для их получения. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ накоплен значительный опыт в разработке защитных покрытий для деталей и узлов трения современных ГТД. Большинство технологий высокотемпературного осаждения ионно-вакуумных покрытий разработано для установок МАП, включая установку МАП-3 с возможностью подачи потока высокоэнергетических газовых ионов через имплантор (ускоритель) в процессе формирования покрытий (так называемое ассистированное осаждение). Например, ионно-вакуумное покрытие TiN–CrN, наносимое с использованием ассистирования ионами аргона на установке МАП-3, имеет высокую эрозионную и коррозионную стойкость на титановых сплавах и стали [3, 4]. Анализ научно-технических литературных источников [5–9] также подтвердил, что применение композиционных покрытий, сочетающих монослой нитридов, нанослой (до 100 мкм) и промежуточные микронные слои, улучшает адгезию покрытия к основе. С учетом высокой чувствительности титановых сплавов к образованию на поверхности трещин усталости важное значение при конструировании покрытия имеет подбор слоев, коэффициент линейного теплового расширения которых позволит сформировать на границе подложки с покрытием приемлемый уровень

остаточных напряжений – до 1,5 ГПа [10]. Конструкция покрытия с правильно подобранной толщиной обеспечит повышение эрозионной стойкости, сохранит механические характеристики титановой основы.

Существенным вопросом является обеспечение коррозионной стойкости титановых сплавов. Известно, что титан обладает высокой стойкостью к коррозии и при отсутствии нагревов (при естественной температуре окружающей среды) не разрушается под воздействием природных факторов. Между тем при эксплуатации ГТД в условиях приморского и морского климата на поверхности титановых лопаток образуются солевые отложения (корка). Во время работы двигателя титановая лопатка компрессора испытывает виброусталостные нагрузки при температуре порядка 350–500 °С (в зависимости от ступени компрессора и сплава). Солевая корка создает трещины усталости, образующиеся под действием растягивающих напряжений [11, 12]. Данный процесс характеризуется как горячая солевая коррозия титановых сплавов под напряжением. Для нивелирования процесса к ЭК-покрытиям следует предъявлять особые требования, заключающиеся в противодействии механизму трещинообразования на поверхности самого сплава.

Повышения стойкости к пылевоздушной эрозии и горячесолевой коррозии ЭК-покрытий на титановых сплавах можно добиться за счет применения покрытий гетерогенных структур на основе нитридов (сложных нитридов с добавлением Al, Cr, V); асстирования газовыми ионами, в частности Ag и N; использования наноструктурных систем с чередующимися твердым эрозионностойким и мягким коррозионностойким слоями, барьерных (промежуточных) слоев; комбинирования различных способов нанесения.

Материалы и методы

Эрозионно-коррозионностойкие покрытия для повышения функциональных свойств титановых моноколес компрессора вертолетных ГТД наносили на установке роторного типа МАП-5 (оборудование НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ).

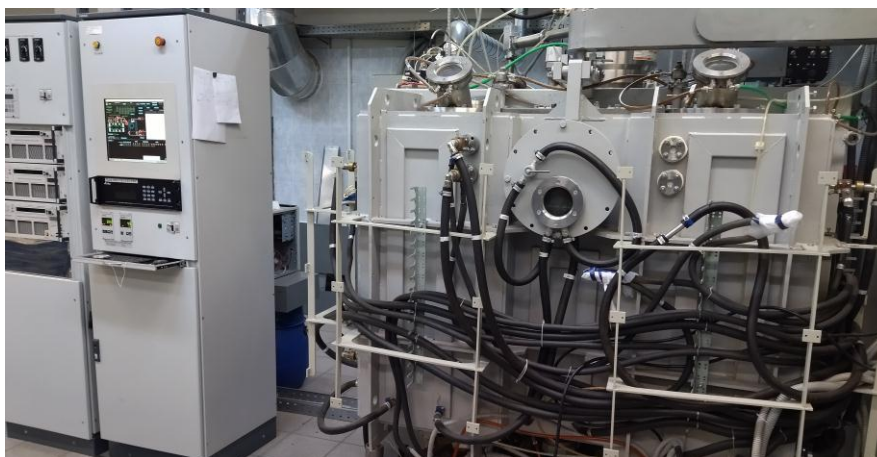


Рис. 1. Внешний вид установки МАП-5

Установка (рис. 1) имеет четыре испарителя, расположенных двумя парами oppositно друг другу для обеспечения более высокой скорости осаждения на крупногабаритные детали (блиски, моноколеса, блинги). Привод вращения детали расположен в центре и позволяет перемещать покрываемую деталь поочередно между двумя парами катодов. Составы катодов, использованных для нанесения покрытий на образцы из титановых сплавов, указаны в табл. 1.

Таблица 1

Катоды, используемые для нанесения покрытия

Сплав для покрытия	Химический состав
X99H4	99 % Cr
BT1-0	99 % Ti
Ti-Al-Cr	Более 65 % Ti, остальное Al и Cr

Для исследования ЭК-покрытий, обеспечивающих защиту моноколес из титановых сплавов, выбраны следующие составы: комбинированное покрытие на основе монокристалла титана с промежуточным металлическим слоем TiN/Ti/TiN; наноструктурные покрытия TiN-CrN и Ti-Al-Cr-N-TiN, состоящие из слоев нитридов толщиной <100 нм; комбинированное покрытие (Ti-Al-Cr-N-TiN)-TiN. В качестве основы использовали круглые образцы из сплавов на основе титана марок BT8M-1 и BT25Y.

Толщину исследуемых покрытий варьировали от 5 до 20 мкм. Необходимость такого подхода обусловлена чувствительностью титановых сплавов к состоянию поверхности при знакопеременных нагрузках – наличию концентраторов, упрочнения и т. д. При формировании покрытия изменяется структурно-фазовое состояние поверхности, поэтому толщина и состав покрытия влияют на предел выносливости. Испытания на стойкость к газоабразивному износу (пылевоздушной эрозии) проводили на эрозионном стенде по методике НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в течение трех циклов при давлении воздуха 3 ат (0,3 МПа). Использовали кварцевый песок средней фракции 300–350 мкм. Испытания проводили при двух углах атаки пылевоздушного потока на образец: 70 и 20 градусов, что имитирует прямой и касательный удар соответственно.

Сравнительные испытания на коррозионную стойкость образцов титановых сплавов с ЭК-покрытиями проводили по методике испытаний на горячесолевую коррозию. Методика заключается в нанесении на галтельные образцы, используемые для испытаний на длительную прочность, солевой корки NaCl толщиной 50 мкм. Образцы испытывали при нагружении, соответствующем пределу прочности титановых сплавов на базе 100 ч. Оценку проводили по числу пройденных часов до разрушения в сравнении с образцами без покрытия.

Микроструктуру исследовали методами оптической металлографии при увеличении до $\times 1000$ на оптическом микроскопе Olympus GX 51. Образцы для металлографических исследований вырезали в направлении, перпендикулярном поверхности. Исследования с применением метода рентгеновской дифракции проведены на дифрактометре Empyrean в монокроматическом Cu K-излучении при длине волны $\lambda = 1,5418 \cdot 10^{-10}$ м. Остаточные напряжения определены методом $\sin^2\psi$, выбраны рентгеновская линия (511) в диапазоне 138–145 градусов/ 2θ (при шаге 2θ , равном 0,016 градуса), продолжительность набора импульсов 40 с. Величина модуля упругости составляет 250 ГПа.

Испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) проводили по ГОСТ 25.502–79 при температуре 500 °С и нагружении 480 МПа на базе $2 \cdot 10^7$ циклов.

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

Результаты и обсуждение

Для оценки качества и определения толщины нанесенных на титановые сплавы покрытий выбранных составов исследована микроструктура поперечных шлифов. В качестве примера на рис. 2 приведена микроструктура двух покрытий: TiN/Ti/TiN и

(TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN. Покрытия имеют равномерную толщину, составляющую ~20 мкм. Наблюдается некоторое количество микрокапельной фракции. В покрытии TiN/Ti/TiN определен промежуточный титановый слой, в покрытии (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN – двухслойная структура с верхним слоем TiN и подслоем TiN–Ti–Al–Cr–N.

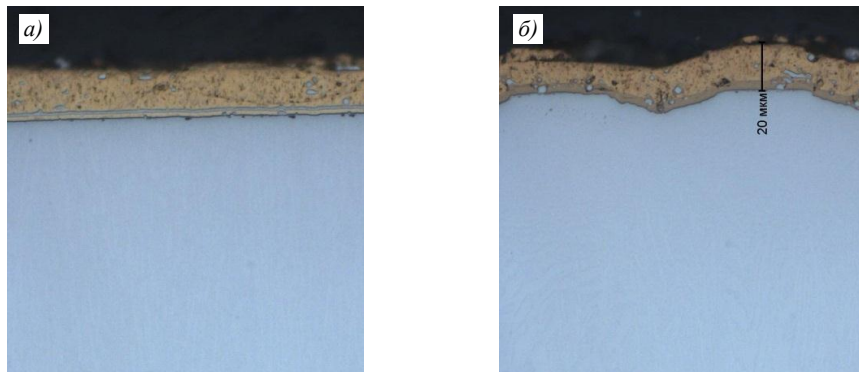


Рис. 2. Микроструктура покрытий TiN/Ti/TiN (а) и (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN (б) на титановом сплаве (×1000)

Проведены испытания на стойкость к газоабразивному износу образцов из сплавов BT8M-1 и BT25У с ЭК-покрытиями различной толщины (табл. 2). Высокой газоабразивной стойкостью обладают покрытия (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN и TiN/Ti/TiN: повышение эрозионной стойкости в 4–27 раз. Покрытие TiN–Ti–Al–Cr–N показало низкие значения эрозионной стойкости при лобовом и касательном воздействии пылевоздушного потока; покрытие TiN–CrN – низкие значения эрозионной стойкости при лобовом обтекании и удовлетворительные значения при касательном износе. В работе [13] показано, что наноструктурное покрытие типа TiN–CrN на сплаве BT8M-1 имеет гораздо более высокие показатели эрозионной стойкости (до 25 раз больше, чем у основы) за счет применения имплантора.

Таблица 2

Эрозионная стойкость титановых сплавов с эрозионно-коррозионностойкими покрытиями

Тип покрытия	Толщина покрытия, мкм	Относительный эрозионный износ/стойкость при угле атаки пылевоздушного потока на образец	
		70 градусов	20 градусов
Титановый сплав без покрытия	–	1/1*	1/1
TiN–Ti–Al–Cr–N	25	1,178/0,85	2,405/0,42
(TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN	20	0,041/25,08	0,139/7,45
	16	0,15/6,7	0,08/12,5
	12	0,25/4	0,25/4
	6	0,95/1,09	0,11/9,68
TiN/Ti/TiN	20	0,037/27,59	0,057/17
	16	0,21/4,76	0,1/6,06
TiN–CrN	20	2,71/0,40	0,12/9,46
	16	6,5/0,16	0,17/7,10

* Относительный эрозионный износ/стойкость основы без покрытия принимается за единицу.

Установлено, что эрозионная стойкость исследуемых покрытий снижается с уменьшением их толщины, что согласуется с данными работы [13]. Комбинированные покрытия, содержащие монослой достаточной толщины (не менее 10 мкм), имеют большую эрозионную стойкость на малых толщинах и не нуждаются в использовании газового имплантора.

Испытания на горячесолевуую коррозию образцов сплава ВТ25У с ЭК-покрытиями проведены при температуре 500 °С и приложенном напряжении 685 МПа (табл. 3).

Таблица 3

Горячесолевая коррозия образцов титанового сплава ВТ25У с эрозионно-коррозионностойкими покрытиями

Тип покрытия	Толщина покрытия, мкм	Время до разрушения образцов, ч
Без покрытия	–	2; 1; 1
TiN/Ti/TiN	20	6; 5; 6
(TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN	20	13; 19; 31
	12	6; 5; 17
	6	1; 4; 14
TiN–CrN	12	7; 41; 51

Наибольшее значение сопротивления горячесолевуой коррозии имеют образцы с покрытием TiN–CrN, на втором месте – образцы с покрытием (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN. Покрытие TiN/Ti/TiN имело низкие значения стойкости к горячесолевуой коррозии. Стойкость к горячесолевуой коррозии образцов с покрытием (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN снижалась с уменьшением толщины покрытия [14]. Применение слоистых покрытий типа TiN–CrN для защиты моноколес из титановых сплавов от эрозионного и коррозионного воздействия возможно в случае комплектации установок типа МАП-5 ускорителем газовых ионов, так как ассистированное осаждение многократно повышает эрозионную стойкость подобных систем покрытий [13].

Результаты испытания образцов из сплава ВТ25У с ЭК-покрытиями TiN/Ti/TiN и (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN на МНЦУ приведены в табл. 4. Покрытия TiN/Ti/TiN и (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN при толщине 16 и 20 мкм ухудшают выносливость сплава ВТ25У. При толщине покрытия (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN не более 12 мкм образцы титановых сплавов проходят базу испытаний.

Таблица 4

Многоцикловая усталость образцов из титанового сплава ВТ25У с эрозионно-коррозионностойкими покрытиями

Тип покрытия	Толщина покрытия, мкм	Состояние образца
Без покрытия	–	Прошли базу испытаний
TiN/Ti/TiN	20	Разрушились
(TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN	20	– « –
	16	– « –
	12	Прошли базу испытаний
	6	– « –

Определены остаточные напряжения покрытия (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN на образцах сплава ВТ25У при разных толщинах. Все измеренные остаточные напряжения являются сжимающими (табл. 5).

Таблица 5

Остаточные напряжения в покрытии (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN на образцах сплава ВТ25У

Толщина покрытия, мкм	Остаточные напряжения (в фазе TiN), МПа*
16	–1220
12	–1205
6	–800

* Знак минус перед значением напряжений означает, что они являются напряжениями сжатия.

С уменьшением толщины покрытия (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN величина остаточных напряжений снижается, что позитивно влияет на предел выносливости защищаемой титановой основы. Однако при этом снижаются эрозионная стойкость и стойкость к горячесолевым коррозии [15].

Исследовано влияние эрозионного воздействия кварцевых частиц на ЭК-покрытия TiN/Ti/TiN и (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN. Толщина покрытия в исходном состоянии составила 16 мкм. В табл. 6 приведены результаты измерения остаточных напряжений после эрозионных испытаний для ЭК-покрытий на образцах сплава BT25У. Установлено, что в результате эрозионных испытаний величина остаточных напряжений увеличивается. При угле воздействия 70 градусов прирост больше, чем при касательном угле. Рост значений остаточных напряжений после испытаний связан с механизмом нагартовки слоев покрытия бомбардируемыми частицами кварца. При касательном угле воздействия величина остаточных напряжений увеличивается незначительно, а значит, риск превысить значение когезионной и адгезионной прочности покрытия (и тем самым вызвать скалывание) к основе меньше. При угле воздействия 70 градусов прирост величины остаточных напряжений составляет 60–70 %. Это означает, что при касательном износе ЭК-покрытия будет действовать механизм постепенного выкрашивания, а при лобовых углах – возможно катастрофическое разрушение покрытия.

Таблица 6

Остаточные напряжения в ЭК-покрытиях на образцах сплава BT25У после испытаний на эрозионную стойкость

Состояние образца	Остаточные напряжения в покрытиях (в фазе TiN), МПа*	
	TiN/Ti/TiN	(TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN
Исходное	–840	–1220
После испытаний при угле атаки пылевоздушного потока на образец:		
70 градусов	–1450	–1820
20 градусов	–980	–1270

* Знак минус перед значением напряжений означает, что они являются напряжениями сжатия.

Именно сжимающие напряжения определенного диапазона значений улучшают адгезионную и когезионную прочность покрытий при воздействии газоабразивного потока, а также препятствуют образованию поверхностных трещин под влиянием солевой корки в условиях высокой температуры. Для покрытия (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN определена рабочая толщина (12–13 мкм), которая обеспечивает удовлетворительное повышение эрозионной и коррозионной стойкости и не влияет на выносливость (сопротивление знакопеременным нагрузкам) титановой основы. Благодаря подслою TiN–Ti–Al–Cr–N покрытие обладает высокой жаростойкостью при температуре 500 °C [16–18].

С целью отработки технологии для титановых моноколес вертолетных ГТД на установке МАП-5 наносили ЭК-покрытие (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN на конструктивно-подобный образец (КПО) центробежного компрессора высокого давления, изготовленного методом селективного лазерного сплавления [19].

Распределение толщин полученного покрытия по рабочим плоскостям КПО (рабочие и сплиттерные лопатки) определяли методом оптической металлографии в зонах, указанных на рис. 3.

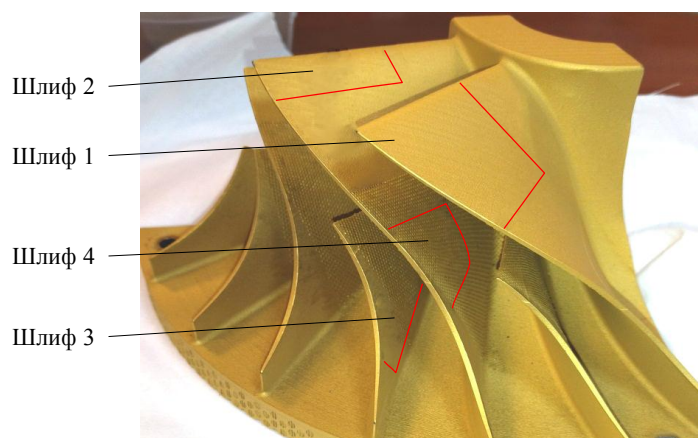


Рис. 3. Зоны исследований конструктивно-подобного образца моноколеса с покрытием (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN

Таблица 7

**Толщина эрозионно-коррозионностойких покрытий
(среднее значение по результатам пяти измерений)**

Фрагмент конструктивно-подобного образца	Зона исследований	Толщина покрытия, мкм
Шлиф 1	Верх рабочей лопатки: внешняя сторона	13,0
	внутренняя сторона	5,6
Шлиф 2	Середина рабочей лопатки: внешняя сторона	9,2
	внутренняя сторона	4,9
Шлиф 3	Низ сплиттерной лопатки: внешняя сторона	6,0
	внутренняя сторона	4,4
Шлиф 4	Низ рабочей лопатки: внешняя сторона	4,4
	внутренняя сторона	2,3

Средняя толщина покрытия (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN на КПО изменяется от 2,3 до 13 мкм (табл. 7). Максимальная толщина покрытия соответствует наиболее эрозионно-нагруженной зоне центробежного колеса. В целом, несмотря на сложный профиль КПО, не наблюдается непокрытых зон, что обеспечивается применением катодов с протяженной зоной испарения, а также специальным взаимным расположением привода детали и катодов.

Заключения

Исследованы ЭК-покрытия, применимые для защиты моноколес центробежного компрессора вертолетных ГТД. Установлено, что рабочая толщина для обеспечения эрозионной стойкости покрытий (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN и TiN–CrN составляет 12–13 мкм. При небольшой толщине ЭК-покрытия и без применения газового имплантора преимущество имеют монослойные покрытия либо составные покрытия с верхним монослоем нитрида металлов не менее 10 мкм. Защитный эффект при горячесолевой коррозии коррелирует с толщиной покрытия и уровнем сжимающих напряжений – чем больше значения остаточных напряжений, тем лучше защитный эффект. Для сохранения свойств сопротивления усталости титана рекомендуемая толщина композиционных

покрытий типа TiN/Ti/TiN и (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN должна составлять не более 12–13 мкм, а уровень сжимающих остаточных напряжений должен быть не более 1200 МПа. По комплексу исследованных свойств (эрозионная и коррозионная стойкость, предел выносливости) лучшим из рассмотренных покрытий, наносимых на установке МАП-5, является покрытие (TiN–Ti–Al–Cr–N)–TiN, средняя толщина которого на КПО изменяется от 2,3 до 13 мкм. Максимальная толщина покрытия соответствует наиболее эрозионно-нагруженной зоне центробежного колеса и является оптимальной по комплексу исследованных свойств для защиты титановых моноколес вертолетных ГТД.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо-альфа-титанового сплава ВТ41 // Титан. 2016. № 2 (52). С. 33–42.
2. 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.
3. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for gas turbine engine compressor blades // Russian metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017. No. 6. P. 494–504.
4. Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора ГТД // Металлы. 2009. № 3. С. 3–20.
5. Углов В.В., Приходько Ж.Л., Ходасевич В.В., Приходько И.И., Эйзнер А.Б. Влияние состава на механические свойства покрытий, сформированных методом конденсации с ионной бомбардировкой // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 5. С. 48–52.
6. Jianliang L., Xuhai Z., Fangfang G. et al. Thick CrN/AlN superlattice coatings deposited by hot filament assisted HiPIMS for solid particle erosion and high temperature wear resistance // Surface & Coatings Technology. 2019. No. 377. P. 124922–124933. URL: <http://www.elsevier.com/locate/surfcoat> (дата обращения: 22.05.2023). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.124922.
7. Имамудинов В.Э., Векслер Ю.В., Стяжкин В.А. Эрозионно-жаростойкое покрытие для защиты деталей ротора компрессора // Конструкции из композиционных материалов. 2006. № 4. С. 228–230.
8. Grzesik W., Malecka J., Kwasny W. Identification of oxidation process of TiAlN coatings versus heat resistant aerospace alloys based on diffusion couples and tool wear tests // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2020. No. 69. P. 41–44. DOI: 10.1016/j.cirp.2020.04.024.
9. Zhang M., Cheng Y., Xin L. et al. Cyclic oxidation behaviour of Ti/TiAlN composite multilayer coatings deposited on titanium alloy // Corrosion Science. 2020. No. 166. P. 108476–108486. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108476.
10. Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследования эрозионной стойкости и остаточных напряжений в слоистых ионно-плазменных покрытиях // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-87-95.
11. Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Герасимов М.В., Козлов И.А., Князев А.В. Особенности формирования электролитно-плазменных покрытий из никельсодержащих электролитов на титановых сплавах // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-86-94.
12. Заварзин С.В., Дуюнова В.А., Фомина М.А. Высокотемпературная коррозия титановых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-27-39.
13. 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: 22.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-71-80.

14. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N. Study of cracking mechanisms in multi-layered composite nanostructured coatings // *Wear*. 2017. No. 378–379. P. 43–57. DOI: 10.1016/j.wear.2017.01.101.
15. Tillmann W., Grisales D., Stangier D. et al. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS // *Surface & Coatings Technology*. 2021. No. 406. P. 126664–126675. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126664.
16. Xu Y.X., Riedl H., Holec D. et al. Thermal stability and oxidation resistance of sputtered Ti–Al–Cr–N hard coatings // *Surface & Coatings Technology*. 2017. No. 324. P. 48–56. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.053.
17. Asanuma H., Polcik P., Kolozsvari S. et al. Cerium doping of Ti–Al–N coatings for excellent thermal stability and oxidation resistance // *Surface & Coatings Technology*. 2017. No. 326. P. 165–172. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.037.
18. Sui X., Li G., Zhou H. et al. Evolution behavior of oxide scales of TiAlCrN coatings at high temperature // *Surface & Coatings Technology*. 2019. No. 360. P. 133–139. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.016.
19. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.

References

1. Kablov E.N., Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaya N.A. Development of a pilot industrial technology for the manufacture of semi-finished products from pseudo-alpha-titanium alloy VT41. *Titan*, 2016, no. 2 (52), pp. 33–42.
2. 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. *Авиационные материалы и технологии*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
3. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for gas turbine engine compressor blades. *Russian metallurgy (Metally)*, 2017, vol. 2017, no. 6, pp. 494–504.
4. Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for GTE compressor blades. *Metally*, 2009, no. 3, pp. 3–20.
5. Uglov V.V., Prikhodko Zh.L., Khodasevich V.V., Prikhodko I.I., Eizner A.B. Influence of the composition on the mechanical properties of coatings formed by the method of condensation with ion bombardment. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2003, no. 5, pp. 48–52.
6. Jianliang L., Xuhai Z., Fangfang G. et al. Thick CrN/AlN superlattice coatings deposited by hot filament assisted HiPIMS for solid particle erosion and high temperature wear resistance. *Surface & Coatings Technology*, 2019, no. 377, pp. 124922–124933. Available at: <http://www.elsevier.com/locate/surfcoat> (дата обращения: 22.05.2023). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.124922.
7. Imamutdinov V.E., Veksler Yu.V., Styazhkin V.A. Erosion-heat-resistant coating for protection of compressor rotor parts. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2006, no. 4, pp. 228–230.
8. Grzesik W., Malecka J., Kwasny W. Identification of oxidation process of TiAlN coatings versus heat resistant aerospace alloys based on diffusion couples and tool wear tests. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2020, no. 69, pp. 41–44. DOI: 10.1016/j.cirp.2020.04.024.
9. Zhang M., Cheng Y., Xin L. et al. Cyclic oxidation behaviour of Ti/TiAlN composite multilayer coatings deposited on titanium alloy. *Corrosion Science*, 2020, no. 166, pp. 108476–108486. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108476.
10. Alexandrov D.A., Gorlov D.S. The Research of erosion resistance and residual stresses in layered ion-plasma coatings. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 22, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-87-95.
11. Duyunova V.A., Oglodkov M.S., Gerasimov M.V., Kozlov I.A., Knyazev A.V. Features of formation of electrolyte-plasma coatings from nickel-containing electrolytes on titanium alloys. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 22, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-86-94.

12. Zavarzin S.V., Duyunova V.A., Fomina M.A. High-temperature corrosion of titanium alloys (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (122), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May, 22 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-27-39.
13. 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: May, 22 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-71-80.
14. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N. Study of cracking mechanisms in multi-layered composite nanostructured coatings. *Wear*, 2017, no. 378–379, pp. 43–57. DOI: 10.1016/j.wear.2017.01.101.
15. Tillmann W., Grisales D., Stangier D. et al. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS. *Surface & Coatings Technology*, 2021, no. 406, pp. 126664–126675. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126664.
16. Xu Y.X., Riedl H., Holec D. et al. Thermal stability and oxidation resistance of sputtered Ti–Al–Cr–N hard coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2017, no. 324, pp. 48–56. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.053.
17. Asanuma H., Polcik P., Kolozsvari S. et al. Cerium doping of Ti–Al–N coatings for excellent thermal stability and oxidation resistance. *Surface & Coatings Technology*, 2017, no. 326, pp. 165–172. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.037.
18. Sui X., Li G., Zhou H. et al. Evolution behavior of oxide scales of TiAlCrN coatings at high temperature. *Surface & Coatings Technology*, 2019, no. 360, pp. 133–139. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.016.
19. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.

Информация об авторах

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

Доронин Олег Николаевич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Журавлева Полина Леонидовна, 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, Lead Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oleg N. Doronin, Deputy Head of the Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Polina L. Zhuravleva, Lead Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 30.06.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.07.2023.
The article was submitted 30.06.2023; approved and accepted for publication after reviewing 12.07.2023.