

УДК 621.793

Д.А. Александров¹, Д.С. Горлов¹, С.А. Будиновский¹

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА И ФРЕТТИНГА

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-71-80

Описано применение технологий нанесения эрозионностойкого и фреттингостойкого ионно-плазменных покрытий для защиты лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) из сплава VT8M-1 от эрозионного износа и фреттинга. Приведены результаты испытаний лопаток компрессора на эрозионную стойкость и виброусталость, образцов из сплава VT8M-1 на фреттинг-износ, многоцикловую усталость и длительную прочность, а также результаты металлографических и металлофизических исследований. Установлено, что многослойные покрытия TiN/CrN и Ti+TiN повышают эрозионную стойкость пера и стойкость к фреттинг-износу замковой части титановых лопаток компрессора ГТД при сохранении их усталостной долговечности.

Ключевые слова: эрозионностойкое покрытие, антифреттинговое покрытие, ассистированное осаждение, нанослойное покрытие, лопатка компрессора.

D.A. Alexandrov¹, D.S. Gorlov¹, S.A. Budinovskii¹

APPLICATION OF A COMPLEX OF ION-PLASMA TECHNOLOGIES TO PROTECT THE COMPRESSOR BLADES OF A HELICOPTER GAS-TURBINE ENGINE FROM EROSION WEAR AND FRETTING

Describes the application of the technology of applying erosion-resistant and fretting-resistant ion-plasma coatings to protect compressor blades of VT8M-1 alloy from erosion wear and fretting, presents the results of tests of compressor blades for erosion resistance and vibration fatigue, samples of VT8M-1 alloy for fretting wear, multi-cycle fatigue and long-term strength, metallographic and metallophysical studies. It has been established that multilayer coatings TiN/CrN and Ti+TiN increase, respectively, the erosion resistance of the feather and the resistance to fretting wear of the locking part of titanium GTE compressor blades while maintaining their fatigue strength.

Keywords: erosion-resistant coating, anti-fretting coating, ion-plasma assisted deposition, nanolayer coating, compressor blade.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Одно из основных направлений современного авиационного двигателестроения – повышение ресурса и надежности ответственных деталей газотурбинного двигателя (ГТД). Особенно актуальной является защита от пылевой эрозии, или газообразивного износа [1]. Износ поверхности газообразивным потоком зависит как от физико-механических свойств материала подложки или композиции подложка–покрытие, температуры поверхности и ее напряженно-деформированного состояния, так и от

условий взаимодействия с пылевоздушным потоком [2]. Газоабразивный износ лопаток компрессора ГТД происходит преимущественно на земле или вблизи земли, главным образом при посадке и взлете вертолетов.

После установки лопатки компрессора в диск также можно столкнуться с процессом фреттинга в замковой части, что приводит к разрушению замка и облому лопатки компрессора. При производстве вертолетных двигателей типа ТВ3-117 и ВК-2500 раньше применяли эрозионностойкое многослойное покрытие ЕК-7 на основе нитридов титана и циркония, а также покрытие для защиты от фреттинга ВАП-2. Покрытие ЕК-7 не обеспечивает приемлемый уровень эрозионной стойкости на лобовых углах атаки, а покрытие ВАП-2 имеет предельную рабочую температуру 250 °С.

Увеличение технических характеристик перспективных вертолетных двигателей повышает требования как к лопаткам компрессора, изготавливаемым из титанового сплава [3, 4], так и к защитным и упрочняющим покрытиям. Перспективной идеей в области нанесения защитных покрытий является использование их многослойных систем с плавным переходом (градиентом), т. е. градиентно-слоистых покрытий. Данные покрытия начали широко применяться в области защиты и увеличения ресурса режущего инструмента (технологии и покрытия фирмы Platit AG, Швейцария). Далее эта концепция получила продолжение и в области защиты ответственных деталей ГТД (лопаток компрессора). Разработками покрытия на основе системы TiN/AlN занялась фирма MTU Aeroengine (Германия).

По данным отечественных и зарубежных источников, градиентно-слоистыми покрытиями можно считать покрытия, представляющие собой многослойные структуры. Технология нанесения таких слоев позволяет путем подбора температурного коэффициента линейного расширения каждого слоя или плавного увеличения расхода газа в процессе плазмохимического синтеза переходить от нижнего слоя к верхнему, создавая между основными слоями покрытия градиентные (переходные) слои. Это хорошо сказывается на адгезии покрытия в целом, а также слоев, входящих в него, и позволяет реализовать весь комплекс защитных свойств, который обеспечивается подслоями, входящими в покрытие. Градиентно-слоистое покрытие может включать подслои, обеспечивающие жаростойкость, а также коррозионную и эрозионную стойкость защищаемой основы [5].

В настоящее время наиболее перспективными и экономически выгодными являются системы градиентно-слоистых многослойных покрытий на основе нитрида титана, содержащих между слоями нитрида металлические или керметные слои, которые влияют на комплекс свойств всей конструкции покрытия. При использовании керметных слоев нитридов хрома и алюминия между слоями нитрида титана можно повысить жаростойкость и коррозионную стойкость при сохранении высокой эрозионной стойкости. Применение металлических слоев на основе титана уменьшает микротвердость покрытия за счет демпфирования [6] при сохранении высокой износостойкости, что позволяет применять подобные системы в условиях фреттинга, защищая основную поверхность и не повреждая контртело.

Использование нанослойного покрытия TiN/CrN в качестве эрозионностойкого является перспективным. Сочетание слоев нитридов титана и хрома обеспечивает повышение эрозионной стойкости за счет внутреннего демпфирования слоев. Исследование эрозионной стойкости, напряженного состояния и конструкции данного покрытия представлено в работе [5]. В качестве защиты от фреттинг-износа можно использовать многослойное покрытие Ti+TiN. Такие покрытия наносят на установке МАП-3, разработанной во ФГУП «ВИАМ». Преимуществом является нанесение как одного, так и другого покрытия на одном оборудовании, что позволяет нанести оба покрытия на мотороконтакт за одну смену.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [7].

Материалы и методы

Нанесение эрозионностойкого и фреттингостойкого покрытий осуществляли на автоматизированной установке МАП-3 с компьютерным управлением технологическим процессом при помощи составного катода на основе титана и хрома. Нанесение эрозионностойкого покрытия проводили с использованием ассистированного осаждения ионами аргона, которое, по сути, представляет собой процесс послойной имплантации [8–16] растущего конденсата, что улучшает эксплуатационные свойства покрытия.

Для оценки защитных свойств разрабатываемых покрытий проводили испытания образцов с покрытиями на эрозионную стойкость, фреттинг-износ, многоцикловую усталость, виброусталость и длительную прочность.

Оценку эрозионной стойкости ионно-плазменных покрытий осуществляли методом сравнительных испытаний на лабораторном стенде, согласно методике ММ 1.595-2-352–2008 «Определение относительной эрозионной стойкости композиции сплав–покрытие», разработанной во ФГУП «ВИАМ». В качестве эрозионной среды использовали речной кварцевый песок со средним (~(300–350) мкм) и максимальным (700 мкм) размером частиц.

Оценку фреттинг-износа проводили по ASTM G204-10: время испытаний 10^5 циклов (128 мин), температура 450 °С, контртело – цилиндр из сплава ВТ8, пластина – из сплава ВТ8М-1, нагрузка 10 Н, частота колебаний 13 Гц, амплитуда колебаний 100 мкм, покрытие нанесено на пластину.

Для определения физических свойств покрытий (толщина, уровень остаточных напряжений) выполняли их металлографические и металлофизические исследования. Металлографические исследования проводили с использованием оптического микроскопа с цифровой системой обработки изображения фирмы Olympus при увеличениях до $\times 1000$. Определение остаточных напряжений осуществляли на дифрактометре Дрон-3 с монохроматическим $\text{Cu } K_\alpha$ -излучением с помощью метода $\sin^2\psi$. Рабочий режим дифрактометра: напряжение 30 кВ, ток 30 мА, время экспозиции 5 с. Применен метод бокового наклона при 7 значениях угла ψ . Положение рентгеновских линий определяли по центру тяжести.

Испытания на виброусталость проводили в соответствии с ОСТ1 00870–77 «Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость» и ОСТ1 00303–79 «Лопатки газотурбинных двигателей. Периодические испытания на усталость» на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400 с использованием следующих приборов: генератор низкочастотных сигналов ГЗ-117, осциллограф С1-83, милливольтметр ВЗ-33, микроскоп МИР-2 (цена деления 0,05 мм).

Лопатки препарированы тензорезисторами типа КФ5П1-3-100-Б12 (база 3 мм).

Градуировку тензометрической аппаратуры (определение зависимости $mV=f(\sigma)$, где mV – показания милливольтметра ВЗ-33, подключенного к тензометрическому усилителю УТТ-4; σ – напряжения, МПа) проводили по методике, принятой для измерения переменных напряжений при тензометрировании лопаток. Исследования на многоцикловую усталость и длительную прочность образцов с покрытиями осуществляли соответственно по ГОСТ 1-90266–86 и ГОСТ 10145–81.

Заданный уровень напряжений выставлялся и контролировался оператором по размаху колебаний торца лопатки со стороны выходной кромки (с использованием

результата предварительно проведенной градуировки лопатки, т. е. зависимости $mV=f(2A)$, где $2A$ – амплитуда колебаний торца лопатки, мм).



Рис. 1. Внешний вид лопаток компрессора с многослойным эрозионностойким и фреттингостойким покрытиями (а), а также в оснастке для нанесения эрозионностойкого (б) и фреттингостойкого покрытий (в)

На ионно-плазменной установке МАП-3 проводили нанесение многослойного эрозионностойкого покрытия TiN/CrN на образцы и лопатки компрессора из сплава BT8M-1 и фреттингостойкого покрытия Ti+TiN на замки лопаток компрессора 1-й ступени из титанового сплава BT8M-1. На рис. 1 приведен внешний вид лопаток с покрытием, а также в технологической оснастке для нанесения покрытий.

Результаты и обсуждение

Проведены исследования зависимости эрозионной стойкости многослойного покрытия TiN/CrN от его толщины. В табл. 1 представлены результаты испытаний.

Таблица 1

Относительный эрозионный износ титанового сплава BT8M-1 с покрытием TiN/CrN при обработке поверхности образца виброполировкой

Условный номер образца	Толщина покрытия, мкм	Относительный эрозионный износ (усл. ед.) / эрозионная стойкость (раз), при угле атаки, градус	
		70	20
0	Без покрытия	1*	
1	21	0,008/125 (пройдено 3 цикла)	0,016/62,5 (пройдено 3 цикла)
2	20	0,024/42 (пройдено 3 цикла)	0,016/62,5 (пройдено 3 цикла)
3	18	0,029/34,4 (выдержано 3 цикла)	0,026/38 (выдержано 3 цикла)
4	14	0,09/11 (пройдено 3 цикла)	0,08/12,5 (пройдено 3 цикла)
5	13	0,11/9,1 (сдув на 3 цикле)	Испытания не проводились из-за неудачных результатов испытаний при лобовом угле атаки
6	12,5	0,41/2,4 (сдув на 3 цикле)	

*Относительный эрозионный износ основы без покрытия принимается за единицу.

Установлено, что оптимальная толщина эрозионностойкого покрытия составляет от 21 до 14 мкм. Высокий уровень эрозионной стойкости (до 125 раз) обусловлен нанослойной структурой покрытия TiN/CrN, имеющей толщину нанослоев от 40 до 70 нм, что и обуславливает высокие твердость и эрозионную стойкость покрытия [17].

Определены остаточные напряжения в покрытии TiN/CrN разной толщины. Результаты определения остаточных напряжений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения напряжений в покрытии TiN/CrN различной толщины

Толщина покрытия, мкм	Фаза	Плоскость <i>hkl</i>	Значения остаточного напряжения, МПа
20	TiN	422	-1550±135
	CrN		-680±220
18	TiN		-1440±140
	CrN		-660±220
14	TiN		-1580±150
	CrN		-655±150

Показано, что при изменении толщины покрытия в диапазоне от 14 до 20 мкм уровень остаточных напряжений при сжатии принципиально не изменяется (разница соответствует погрешности метода определения). В данном случае на величину остаточных напряжений влияет исключительно соотношение толщин нанослоев нитридов титана и хрома. Между тем уровень полученных остаточных напряжений при сжатии объясняет высокую эрозионную стойкость, в том числе за счет соотношения остаточных напряжений слоев нитридов титана и хрома, обеспечивая демпфирующий эффект при воздействии абразивных частиц [18].

Проведены испытания на эрозионную стойкость лопаток 1-й ступени компрессора ГТД с покрытием TiN/CrN, а также на фреттинг-износ образцов сплава BT8M-1 с многослойным покрытием Ti+TiN (табл. 3 и 4).

Таблица 3

Относительный эрозионный износ лопаток 1-ступени компрессора ГТД и образцов шифра Н03-212 из сплава BT8M-1 с покрытием TiN/CrN и без покрытия

Основа	Наличие покрытия	Толщина покрытия, мкм	Относительный эрозионный износ (усл. ед.) / эрозионная стойкость (раз), при угле атаки, градус	
			70	20
Лопатка 1-й ступени	Без покрытия	–	1*	
	С покрытием	18	0,029/34,4 (выдержано 3 цикла)	0,026/38 (выдержано 3 цикла)
Образец шифра Н03-212	Без покрытия	–	1	
	С покрытием	18	0,02/50 (выдержано 3 цикла)	0,04/25 (выдержано 3 цикла)

*Относительный эрозионный износ основы без покрытия принимается за единицу.

Таблица 4

Результаты испытаний на фреттинг-износ образцов из сплава BT8M-1 с различными покрытиями и без покрытия

Тип покрытия	Линейный износ, мм	Среднее значение износа, мм
Без покрытия	0,086	0,0605
	0,035	
Ti+TiN	0,017	0,024
	0,021	
	0,023	
	0,025	
	0,036	
	0,077	
ВАП-2	0,082	0,0795
	0,077	

Результаты испытаний на эрозионную стойкость покрытия TiN/CrN показали ее повышение в 34–50 раз при угле атаки 70 градусов и в 25–38 раз при угле атаки 20 градусов.

Результаты испытаний на фреттинг-износ покрытия Ti+TiN показали, что его фреттингостойкость в 3,31 раза выше по сравнению с аналогичным покрытием ВАП-2.

Проведены металлографические исследования покрытий на цифровом микроскопе Olympus GX51 при увеличении $\times 1000$. Микроструктура покрытий представлена на рис. 2.

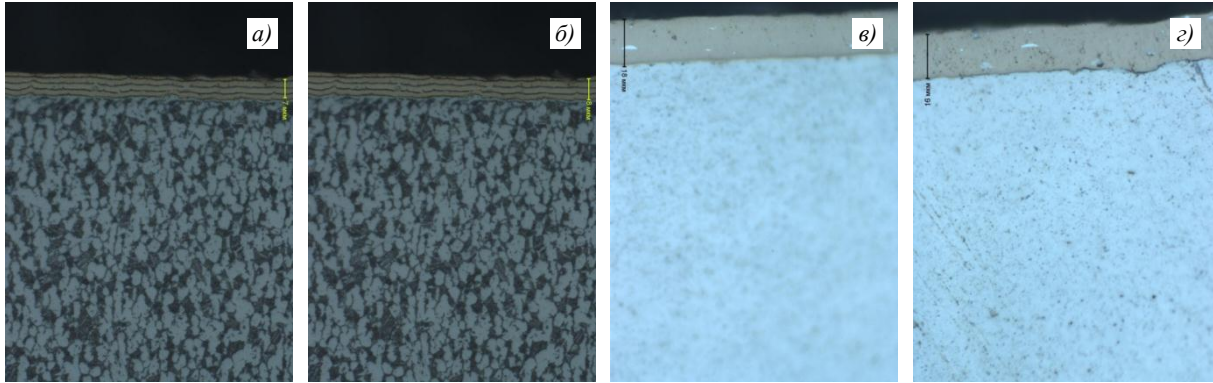


Рис. 2. Микроструктура покрытий ($\times 1000$) на лопатке компрессора из сплава ВТ8М-1 с покрытиями Ti+TiN (замок, боковая контактирующая плоскость (а, б), травленная поверхность) и TiN/CrN (перо, спинка (в) и корыто (г))

Толщина нанесенного эрозионностойкого покрытия на лопатке компрессора составила 16–18 мкм, а фреттингостойкого $\sim (7-8)$ мкм.

Проведены испытания образцов из сплава ВТ8М-1 с фреттингостойким покрытием на многоцикловую усталость и длительную прочность (по ГОСТ 1-90266–86 и ГОСТ 10145–81). Испытания на многоцикловую усталость осуществлялись на паспортном значении предела выносливости титанового сплава ВТ8М-1 (450 МПа при температуре 450 °С). Результаты исследований приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Результаты испытаний на многоцикловую усталость образцов из сплава ВТ8М-1 с фреттингостойким покрытием Ti+TiN и без покрытия

Условный номер образца	Наличие покрытия	Напряжение, МПа	Число циклов	Результат испытания
1	Без покрытия	450	26745000	Не разрушен
2			29520000	
3	29610000			
4	33135000			
5				

Испытания на длительную прочность проводили на базе 100 и 500 ч при температуре 450 °С. Результаты исследований представлены в табл. 6.

По результатам испытаний на многоцикловую усталость и длительную прочность установлено, что покрытие Ti+TiN не снижает механические свойства сплава ВТ8М-1.

Таблица 6

Результаты испытаний на длительную прочность образцов из сплава ВТ8М-1 с покрытием Ti+TiN и без покрытия при температуре 450 °С

Условный номер образца	Наличие покрытия	Напряжение, МПа	Продолжительность испытания, ч	Время до разрушения, ч	Примечание
1	Без покрытия	685	500	609	Снят до разрушения
2		735	100	140	Разрушился
3		685	500	654	Снят до разрушения
4	С покрытием	685	500	174	Разрушился
5		735	100	122	
6		685	500	670	Снят до разрушения
7		735	100	6	Разрушился
8		685	500	579	

Проведены испытания образцов из сплава ВТ8М-1 с эрозионностойким покрытием TiN/CrN. Результаты представлены на рис. 3. Установлено, что данное покрытие не снижает предел выносливости титанового сплава ВТ8М-1, что можно также объяснить применением ассистированного осаждения [19, 20].

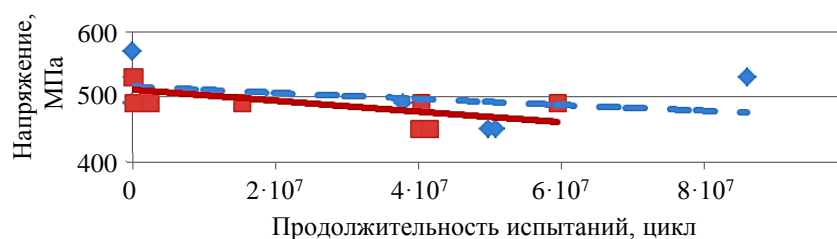


Рис. 3. Результаты испытаний на усталость образцов из сплава ВТ8М-1 с покрытием Ti+TiN/CrN (■) и без покрытия (◆) (—, — экспоненциальные кривые)

Для подтверждения механических свойств исследуемых эрозионностойкого и фреттингостойкого покрытий проведены испытания на виброусталость титановых лопаток 1-й ступени вертолетного двигателя из сплава ВТ8М-1 с эрозионностойким и фреттингостойким покрытиями (рис. 1). Испытания проводились при рабочем напряжении 450 МПа (что соответствует эксплуатационной нагрузке) на базе $2 \cdot 10^7$ циклов.

На рис. 4 приведены основные моменты виброусталостных испытаний, а в табл. 7 и 8 – их результаты.

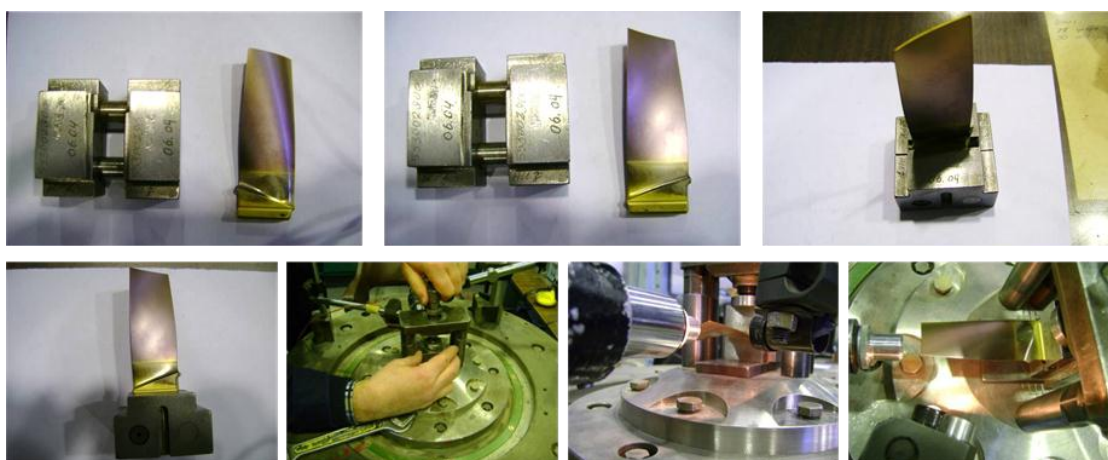


Рис. 4. Основные операции при проведении испытаний на виброусталость

Таблица 7

**Результаты испытаний лопаток 1-й ступени компрессора ГТД
из сплава VT8M-1 без покрытий**

Условный номер лопатки	Амплитуда колебаний 2А, мм	Напряжение, МПа	Продолжительность испытаний	Число циклов	Частота, Гц	Примечание
1	8,3	450	8 ч 50 мин	$2 \cdot 10^7$	626	Не сломалась
2			9 ч		617	
3	8 ч 50 мин		628			
4	8 ч 55 мин		624			
5	8,4		8 ч 50 мин		625	
6						

Таблица 8

**Результаты испытаний лопаток 1-й ступени компрессора ГТД
из сплава VT8M-1 с покрытиями**

Условный номер лопатки	Амплитуда колебаний 2А, мм	Напряжение, МПа	Продолжительность испытаний	Число циклов	Частота, Гц	Примечание
87-1	8,55	450	8 ч 45 мин	$2,00 \cdot 10^7$	630	Не сломалась
87-2	8,45				634	
87-3			8 ч 50 мин		626	
87-5					628	
87-6	8,6		629			
87-7	9,75	500	14 ч 20 мин	$3,25 \cdot 10^7$	632	Поломка на спинке
87-8	8,6	450	8 ч 40 мин	$2,00 \cdot 10^7$	642	Не сломалась
87-9	8,5		9 ч		619	
87-10			8 ч 50 мин		627	
87-11					626	
87-12	8,45		627			

По результатам виброусталостных испытаний установлено, что при напряжении 450 МПа на базе $2 \cdot 10^7$ циклов эрозионностойкое и фреттингостойкое покрытия не ухудшают усталостную долговечность титановых лопаток компрессора из сплава VT8M-1.

Заключения

Установлено, что покрытие TiN/CrN многократно (до 38 раз – на лопатке компрессора и до 125 раз – на образце) повышает эрозионную стойкость лопаток компрессора ГТД. Показано, что оптимальной для данного покрытия является толщина в диапазоне от 15 до 18 мкм, а уровень остаточных напряжений в покрытии TiN/CrN преимущественно определяется его конструкцией, а не толщиной (в диапазоне от 15 до 20 мкм).

Выявлено, что покрытие Ti+TiN повышает фреттингостойкость замковой части лопаток ГТД, а также имеет более высокую температуру эксплуатации и показатель фреттинг-износа (в 3 раза выше), чем у серийного покрытия ВАП-2. Конструкция покрытия TiN/CrN позволяет успешно применять его как на титановых сплавах, так и на сталях.

На основании результатов испытаний образцов из сплава VT8M-1 на многоцикловую усталость и длительную прочность, а лопаток 1-й ступени на виброусталость установлено, что ионно-плазменные эрозионностойкое (TiN/CrN)

и фреттингостойкое покрытия (Ti+TiN) не оказывают влияния на механические свойства лопаток компрессора из титанового сплава BT8M-1.

За счет нанесения обоих покрытий на установке МАП-3 и частичного применения одинаковых материалов для покрытий (катод из сплава BT1-0) происходит не только оптимизация технологического цикла, но и снижение его стоимости. Кроме того, автоматизация технологии позволяет использовать менее квалифицированный персонал.

Данные многослойные покрытия, полученные с применением комплексной ионно-плазменной технологии, могут быть использованы для серийных и перспективных вертолетных ГТД, эксплуатирующихся в том числе в условиях запыленного воздуха.

Библиографический список

1. Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия из нитридов и карбидов металлов и их плазмохимический синтез // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. №1. С. 103–109.
2. Фарафонов Д.П., Лещев Н.Е., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Артеменко Н.И. Абразивно-износостойкие материалы для уплотнений проточной части ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2019. №3 (56). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
3. Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Лукина Е.А., Новак А.В. Структура и свойства листовых полуфабрикатов из деформируемых интерметаллидных титановых сплавов разных классов // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 17–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25.
4. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Давыдова Е.А. Исследование структурно-фазовых превращений в псевдо-β-титановых сплавах и влияния скорости охлаждения с температуры гомогенизации на структуру и свойства сплава BT47. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2020. №8 (90). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-11-19.
5. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Ионно-плазменные нанослойные эрозионностойкие покрытия на основе карбидов и нитридов металлов // Металлы. 2010. №5. С. 39–51.
6. Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Щепилов А.А., Коннова В.И. Исследование демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S5. С. 67–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S5-67-72.
7. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
8. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Журавлева П.Л. Упрочнение поверхности титановых сплавов методом ионной имплантации и ионного модифицирования // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 33–39. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-33-39.
9. Смыслов А.М., Смылова М.К., Мухин В.С. Ионно-имплантационное и вакуумно-плазменное модифицирование поверхности лопаток компрессора ГТД // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. №1 (40). С. 133–138.
10. Смыслов А.М., Быбин А.А., Невьянцева Р.Р. Влияние ионной имплантации и плазменной поверхностной обработки на эксплуатационные характеристики жаропрочного никелевого сплава // Физика и химия обработки материалов. 2007. №3. С. 29–34.
11. Смыслов А.М., Смылова М.К., Дубин А.И. Исследование влияния комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки на сопротивление усталости лопаток ГТД с концентратором // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20. №3 (73). С. 38–43.
12. Погребняк А.Д., Якущенко И.В., Соболев О.В. и др. Влияние остаточного давления и ионной имплантации на структуру, элементный состав и свойства нитридов (TiZrAlYNb)N // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. №8. С. 72–79.

13. Карпов Д.А., Литуновский В.Н. Плазменно-иммерсионная ионная имплантация (ПИИИ): физические основы, использование в технологиях. СПб.: НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, 2009. 62 с.
14. Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С. и др. Иммерсионная ионная имплантация и азотирование в плазме тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №6. С. 43–48.
15. Сутьгина А.Н., Шулепов И.А. Плазменно-иммерсионная ионная имплантация алюминия в титан VT1-0 // Перспективы развития фундаментальных наук: сб. науч. тр. XII Междунар. конф. студентов и молодых ученых. Томск: Нац. иссл. Томский политех. ун-т, 2015. С. 248–250.
16. Воробьев В.Л., Быков П.В., Быстров С.Г. и др. Изменение состава поверхностных слоев титанового сплава VT6 после ионно-лучевого перемешивания алюминия и термообработки // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15. №4. С. 576–581.
17. Смыслов А.М., Мингажев А.Д., Смылова М.К., Селиванов К.С., Мингажева А.Д. Нанослойное покрытие для лопаток турбомашин из титановых сплавов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15. №1 (41). С. 109–112.
18. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 26–37.
19. Учеваткина Н.В., Овчинников В.В., Жданович О.А., Сбитнев А.Г. Остаточные напряжения в поверхностном слое титанового сплава VT6 после ионной имплантации с большой дозой // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. №6. С. 41–46.
20. Смыслов А.М., Смылова М.К., Дубин А.И., Сазанов В.П., Павлов В.Ф. Исследование влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости лопаток газотурбинного двигателя с учетом фрактографических признаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016. №1 (37). С. 121–130.