

УДК 621.793

С.А. Мубояджян¹, С.А. Будиновский¹

ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПОКРЫТИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54

Рассмотрены направления развития авиационного двигателестроения и показано, что создание перспективных ГТД возможно при использовании конструкционных материалов, защитных и упрочняющих покрытий с повышенными характеристиками и новых прогрессивных ионно-плазменных технологий, а также оборудования для их получения. Приведены некоторые характеристики вновь созданных защитных, теплозащитных, упрочняющих, износостойких и демпфирующих покрытий для деталей авиационных ГТД.

Ключевые слова: жаропрочные рений- и рений-рутениеисодержащие сплавы, теплозащитное покрытие, эрозионностойкое покрытие, покрытие для защиты от фреттинг-износа, износостойкое покрытие, демпфирующее покрытие.

S.A. Muboyadzhyan, S.A. Budinovskiy

Ion-plasma technology: prospective processes, coatings, equipment

The directions for the development of aviation engines were considered and it was shown that the production of advanced gas turbine engine is possible by using new structural materials, protective and strengthening coatings with high performance and new advanced ion-plasma technologies and units for their production. Some characteristics of newly developed protection, thermal protection, reinforcement, wear-resistant and damping coatings for aviation GTE parts were shown.

Keywords: heat-resistant rhenium- and rhenium-ruthenium-containing alloys, thermal barrier coating, erosion-resistant coating, fretting-wear resistant coating, wear-resistant coating, a damping coating.

Введение

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие коррозионные и коррозионностойкие, из-

¹ Федеральное 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

носостойкие, 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») [1].

Развитие авиационного двигателестроения направлено на рост температуры термодинамического цикла двигателя, что обеспечивает повышение всех его удельных характеристик. Для двигателей гражданской авиации одним из главных параметров является топливная экономичность, а для двигателей военной авиации — удельная мощность или тяга (параметры, отнесенные к массе двигателя) при сохранении максимально возможной топливной экономичности и высокой приемистости.

Создание ГТД с повышенными удельными характеристиками для перспективных вертолетов, гражданских и военных самолетов возможно только при использовании новых материалов с более высокой рабочей температурой и удельной прочностью, в том числе жаропрочных сплавов для монокристаллических лопаток турбины, дисков турбины и компрессора, материалов для камеры сгорания, титановых сплавов на интерметаллидной основе, высокопрочных сталей для валов двигателя и компрессорных сталей для всеклиматического применения, а также нового поколения защитных и упрочняющих покрытий, обеспечивающих работу деталей двигателя, подверженных пылевой эрозии, солевой и высокотемпературной газовой коррозии, фреттинг-износу и коррозии, высокотемпературному износу [2–3].

В настоящее время для монокристаллических лопаток турбины рассматриваются безуглеродистые рений- и рений-рутенийсодержащие жаропрочные сплавы с рабочей температурой до 1150°C. Отсутствие карбидов в этих сплавах не позволяет формировать на поверхности лопаток турбины диффузионные покрытия, так как алюминий при рабочих температурах активно диффундирует в сплав, что приводит к потере покрытием защитных свойств. Одновременно с этим под покрытием состав сплава изменяется, и в этой зоне формируются топологически плотноупакованные (ТПУ) фазы, разупрочняющие сплав. Поэтому для нанесения защитных покрытий на внутреннюю полость и внешнюю поверхность пера монокристаллических лопаток турбины требуется создание барьерных слоев, ограничивающих диффузию алюминия и хрома из покрытия в поверхностный слой сплава лопатки [4–6].

Для деталей горячего тракта перспективных двигателей, в том числе для монокристаллических лопаток турбины, предполагается использование теплозащитных покрытий (ТЗП), содержащих жаростойкий связующий слой и внешний керамический слой с низким коэффициентом теплопроводности. При тепловых потоках, протекающих через стенку лопатки работающего ГТД, в керамическом слое толщиной 100 мкм имеет место тепловой перепад на уровне 80–100°C, что позволяет снизить на эту величину температуру на поверхности монокристаллической лопатки. Для

ГТД гражданского назначения такой перепад позволяет более чем в 2 раза повысить ресурс лопаток турбины, а для ГТД военного назначения — повысить на эту величину температуру газового потока на выходе из камеры сгорания двигателя и соответствующее этому повышению его удельных параметров. Развитие ТЗП направлено на снижение коэффициента теплопроводности керамического слоя покрытия, что обеспечивает при одинаковой толщине такого слоя максимальный теплозащитный эффект [7, 8].

Для нанесения керамического слоя теплозащитных покрытий используются различные технологии. Так, для лопаток турбины двигателя используются технологии электронно-лучевого напыления и среднечастотного магнетронного плазмохимического распыления (разработка ФГУП «ВИАМ»), а для нанесения ТЗП на крупногабаритные детали горячего тракта двигателя (камеру сгорания, жаровые трубы, детали выходного сопла) — технологии атмосферного или высокоскоростного порошкового плазменного напыления.

Обеспечение назначенного ресурса и надежности перспективных двигателей невозможно без применения защитных и упрочняющих покрытий для лопаток и деталей компрессора, обеспечивающих работу этих деталей в условиях запыленности, солевой коррозии, фреттинга и износа при повышенных температурах [9–15].

Во ФГУП «ВИАМ» проводится комплекс исследований в области теплозащитных и жаростойких покрытий для жаропрочных материалов лопаток турбины; эрозионно- и коррозионностойких покрытий для лопаток компрессора; покрытий для защиты деталей малоподвижных соединений и замков лопаток компрессора от фреттинга; демпфирующих покрытий, снижающих напряжения в опасных сечениях деталей при резонансных частотах; износостойких покрытий для деталей компрессора ГТД; коррозионностойких покрытий для стальных деталей, валов и др. Одновременно проектируется и создается новое перспективное опытно-промышленное оборудование для нанесения защитных покрытий на детали сложной геометрической формы (конструкции типа «блиск» и «блинк», сопловые блоки), а также керамических слоев ТЗП методом среднечастотного магнетронного плазмохимического осаждения.

Жаростойкие и теплозащитные покрытия для рабочих лопаток турбин

Для защиты от высокотемпературной газовой коррозии монокристаллических лопаток ТВД из рений- и рений-рутениейсодержащих безуглеродистых жаропрочных сплавов (БЖС) разработаны многослойные жаростойкие покрытия с барьерными металлокерамическими слоями на основе карбидов или нитридов металлов. Технология ионно-плазменного нанесения покрытия на внешнюю трактовую поверхность включает

формирование плазмохимическим методом барьерного слоя толщиной несколько микрометров путем осаждения конденсированного жаростойкого покрытия в среде ацетилена или азота на начальной стадии процесса с последующим переходом к нанесению чистого многокомпонентного конденсированного слоя в высоком вакууме [6]. Барьерный слой на поверхности лопатки из БЖС препятствует образованию ТПУ фаз под защитными покрытиями во внутренней полости и на внешней трактовой поверхности лопаток [5].

Исследование жаростойких серийных высокотемпературных конденсационно-диффузионных (КД) покрытий СДП-2+ВСДП-16 и ВСДП-9+ВСДП-18 на образцах из БЖС с барьерным слоем показало, что ресурс этих покрытий составляет ~500 ч при 1100°C. Поэтому были разработаны новые составы жаростойких сплавов для конденсированных слоев КД покрытий, также как для жаростойких покрытий. За основу взяли систему Ni–Cr–Al–Y, которую дополнительно легировали тугоплавкими элементами Hf, Re–Hf, Re–Ta–Hf и др., а также снижали содержание хрома в сплаве для нанесения покрытия с целью уменьшения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) конденсированного слоя покрытия для того, чтобы повысить термостойкость покрытия в условиях интенсивных теплосмен и большей совместимости КД покрытия с керамическим слоем ТЗП [16–18]. Для защиты рабочих лопаток ТВД из сплавов ЖС32, ВЖМ4 и ВЖМ5У при температуре 1150°C и забросах до 1200°C разработано покрытие

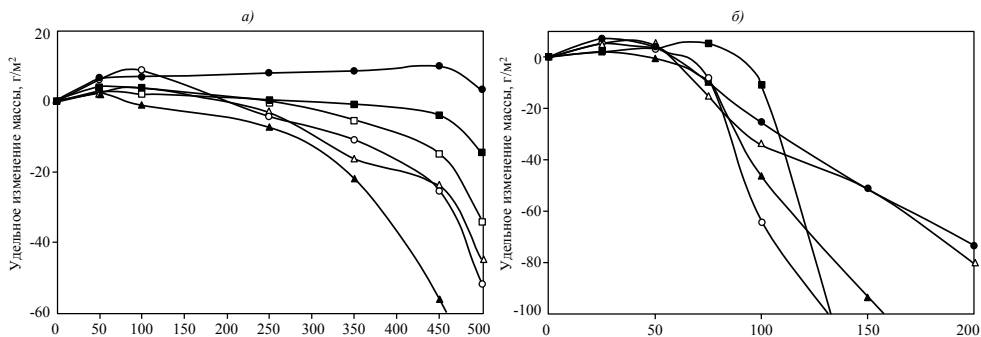


Рис. 1. Удельное изменение массы образцов из сплава ЖС32 с жаростойкими покрытиями ВСДП-9+ВСДП-16 (□), [(ВСДП-9+N)+ВСДП-9]+ВСДП-16 (▲), СДП-41+ВСДП-16 (△), [(СДП-41+C₂H₂)+СДП-41]+ВСДП-16 (○), [(ВСДП-9+C₂H₂)+ВСДП-9]+ВСДП-16 (■) и [(СДП-41+N)+СДП-41]+ВСДП-16 (●) после изотермической выдержки при температурах 1150°C на базе 500 ч (а) и 1200°C на базе 100 ч (б)

MeN+СДП-41 (Ni–Cr–Al–Ta–Re–Hf–Y)+ВСДП-16 (Al–Ni–Y). На рис. 1 представлены результаты испытаний на жаростойкость нового покрытия в сравнении с серийными на образцах из сплава ЖС32.

По результатам испытаний наименьшим удельным изменением массы характеризуется покрытие с нитридным барьером – MeN+СДП-41+ВСДП-16. Покрытие не оказывает отрицательного влияния на характеристики длительной и усталостной прочности сплава ЖС32 (рис. 2).

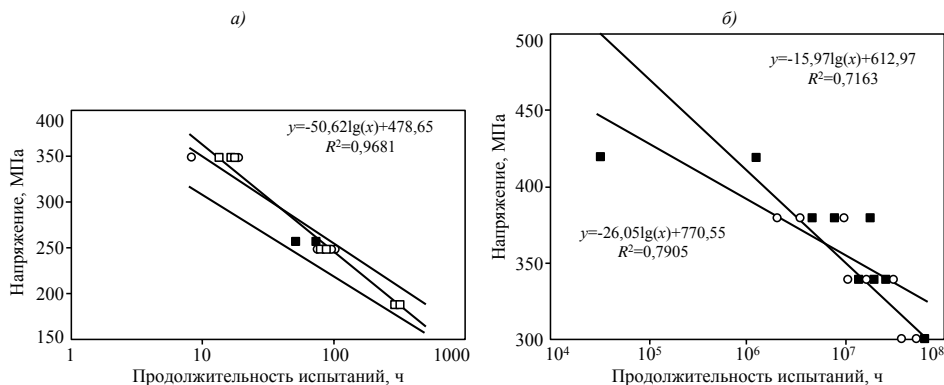


Рис. 2. Результаты испытаний образцов из сплава ЖС32 на длительную прочность (а) и многоцикловую усталость (б) без покрытия (■) и с покрытиями MeN+СДП-41+ВСДП-16 (○) и СДП-41+ВСДП-16 (□)

Для рабочих лопаток ТВД из сплавов ВЖМ4 и ВЖМ5У разработано ионно-плазменное теплозащитное покрытие с внутренним жаростойким слоем СДП-41+ВСДП-16 и внешним керамическим слоем на основе системы Zr–Y–Gd–O с коэффициентом теплопроводности, равным 1,2–1,4 Вт/(м·К) [19–22]. Типичная структура ионно-плазменного ТЗП в исходном состоянии после нанесения и вакуумной термообработки представлена на рис. 3.

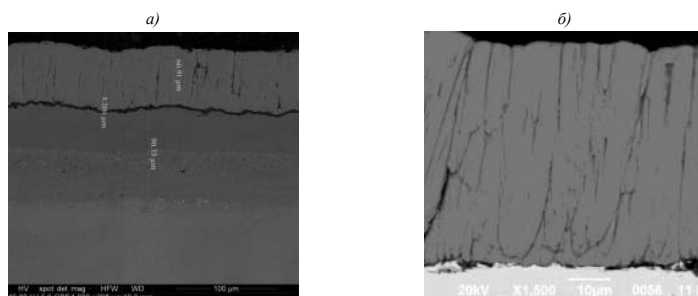


Рис. 3. Микроструктура ионно-плазменного теплозащитного покрытия СДП-41+ВСДП-16+(Zr–Y–Gd–O) (а) и керамического слоя покрытия (б) в исходном состоянии

Внешний вид образцов из сплава ВЖМ4 с ионно-плазменным ТЗП после испытаний на жаростойкость представлен на рис. 4.

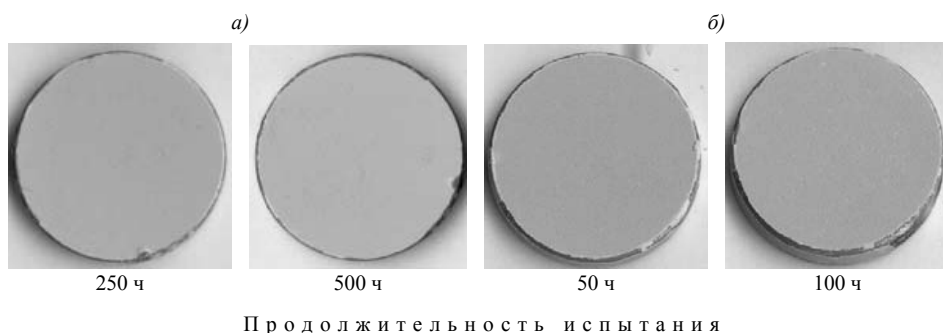


Рис. 4. Изменение внешнего вида образцов из сплава ВЖМ4 с теплозащитным покрытием при испытаниях на изотермическую жаростойкость при температурах 1150 (а) и 1200°С (б)

Теплозащитное покрытие СДП-41+ВСДП-16+ВСДП-16+(Zr–Gd–Y–O) не оказывает отрицательного влияния на длительную прочность сплавов ВЖМ4 и ВЖМ5У при температуре 1000°С на базах испытаний до 500 ч и на предел выносливости при температуре 900°С на базе $2 \cdot 10^7$ циклов.

Одним из возможных направлений повышения служебных характеристик ГТД, в том числе снижения массы и повышения рабочих температур, является применение в турбине лопаток из интерметаллидных никелевых сплавов. Во ФГУП «ВИАМ» разработаны интерметаллидные сплавы для сопловых лопаток турбин марок ВКНА-1В, ВКНА-4У, ВКНА-25, ВИНЗ и др., которые в сравнении с жаропрочными никелевыми сплавами с интерметаллидным упрочнением имеют меньшую плотность (~ 8 г/см³), более высокую рабочую температуру (до 1200°С) и обладают необходимым комплексом механических и технологических свойств. Применение для защиты пера лопаток из интерметаллидных сплавов современного ТЗП позволяет прогнозировать увеличение температуры поверхности пера еще на 50–100°С. В связи с этим проведены работы по созданию защитных покрытий для лопаток турбин из сплавов типа ВКНА. Для защиты лопаток турбин из сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 разработано жаростойкое покрытие ВСДП-4 (Ni–Al–Cr–Hf)+ВСДП-16 [23, 24]. На рис. 5 представлены результаты исследования жаростойкости образцов из сплава ВКНА-1В с покрытиями при температурах 1200 и 1250°С. Видно, что экспериментальные покрытия превосходят наиболее жаростойкое в настоящее время серийное покрытие СДП-2+ВСДП-16.

Проведенный комплекс исследований жаростойких покрытий для интерметаллидных сплавов позволил разработать ионно-плазменное ТЗП

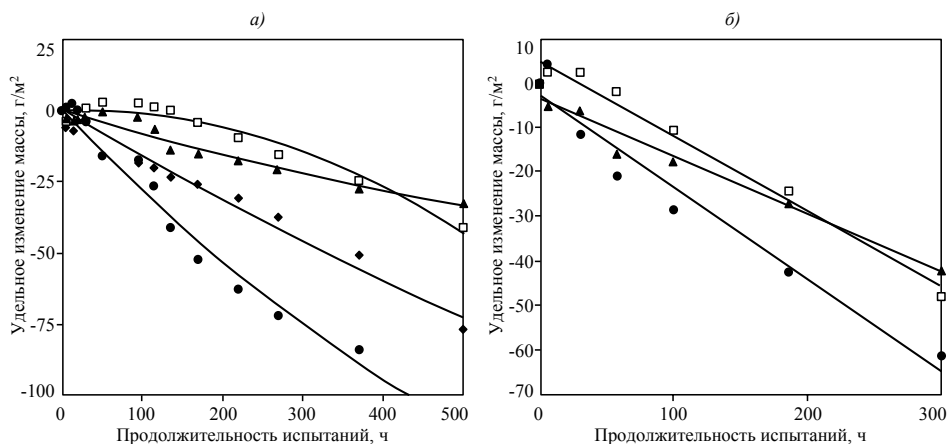


Рис. 5. Зависимости удельного изменения массы образцов из сплава ВКНА-1В без покрытия (●) и с покрытиями СДП-2+ВСДП-16 (◆), СДП-41+ВСДП-16 (□) и ВСДП-4+ВСДП-16 (▲) от продолжительности испытаний на жаростойкость при температурах 1200 (а) и 1250°С (б)

типа ВСДП-4 (Ni–Al–Cr–Hf)+ВСДП-23(Al–Ni–Hf)+ВЦС6(Zr–Y–Gd–O) для сопловых лопаток турбины из сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 на рабочие температуры до 1250°С.

На рис. 6 приведены результаты исследований величины теплозащитного эффекта, выполненных по методике ФГУП «ЦИАМ» на установке Т14-226, по разности измеренных температур наружной поверхности половинок с керамическим слоем и без него разъемного трубчатого образца в условиях газопламенного нагрева на воздухе факелом с температурой 1800 ± 50 К внутренней поверхности образца. Измеренный теплозащитный эффект при толщине керамического слоя 60–65 мкм и нагреве горелкой до 900°С составил 70 ± 5 °С.

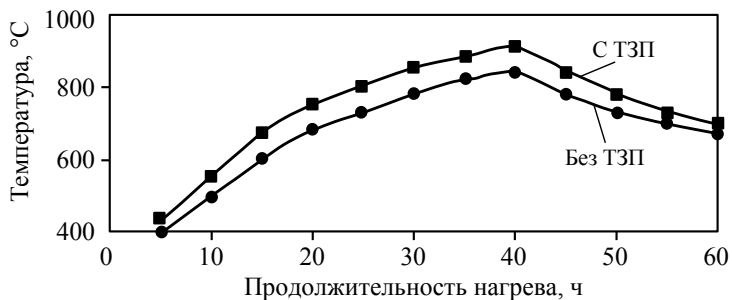


Рис. 6. Зависимость величины теплозащитного эффекта керамического слоя системы Zr–Y–Gd–O от продолжительности нагрева

Изучено также влияние ионно-плазменного ТЗП состава ВСП-4+ВСП-23+(Zr-Y-Gd-O) на характеристики длительной прочности сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 при температуре 1200°C и предел выносливости при температуре 900°C на базе $2 \cdot 10^7$ циклов на гладких образцах (σ_{-1}). Результаты испытаний представлены в таблице.

Расчетные значения* жаропрочности и предела выносливости образцов из сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 с теплозащитным покрытием

Свойства	Значения свойств для сплава марки			
	ВКНА-1В		ВКНА-25	
	по паспорту	с покрытием	по паспорту	с покрытием
Жаропрочность, МПа, на базе испытаний, ч:				
10	90/70	90/75	70/57	75/65
100	50/37	60/45	48/40	50/40
500	30/23	40/30	38/32	—
Предел выносливости, МПа	340	340	370	340

* В числителе – средние значения с вероятностью неразрушения 0,5 при доверительной вероятности 0,9; в знаменателе – гарантированные значения с вероятностью неразрушения 0,8 при доверительной вероятности 0,9.

По результатам работ в области ТЗП для рабочих лопаток ТВД двигателя ПД-14 во ФГУП «ВИАМ» разработано комплексное ТЗП типа С (цементация)+ГЦА (газоциркуляционное алитирование поверхности внутренней полости и внешней трактовой поверхности лопатки)+ВСП-3 (конденсированный слой из сплава системы Ni-Cr-Al-Re-Hf-Y)+ВСП-16 (Al-Ni-Y)+YSZ (электронно-лучевой керамический слой ТЗП состава $ZrO_2-Y_2O_3$). Разработанное покрытие испытано на статическую жаростойкость при 1100°C в течение 500 ч, при 1150°C в течение 300 ч и на термостойкость по режиму: 1135°C, выдержка 50 мин, охлаждение на воздухе 10 мин. После испытаний покрытие сохранило работоспособность и сплошность керамического слоя ТЗП. Рабочие лопатки ТВД прошли испытания на термостойкость на стенде ОАО «ПМЗ» при 1135°C на базе 500 циклов [8].

Покрывтия для защиты от эрозии и износа

Разработано новое эрозионно-коррозионностойкое нанослойное покрытие TiN/CrN с толщиной нанослоев 50–80 нм для защиты лопаток компрессора из титановых сплавов типа ВТ8-1 от эрозионного износа во всеклиматических условиях. Покрытие наносили на установке МАП-3 при ассистированном осаждении и по сравнению с ранее разработанным покрытием из нитрида циркония для лопаток компрессора

из титановых сплавов, полученным также при ассистированном осаждении, оно позволяет повысить относительную эрозионную стойкость при касательном обтекании пылевоздушного потока с 18,4 до 68 раз (эрозионная стойкость сплава ВТ8-1 принята за 1) [25]. Следует отметить, что эрозионная стойкость нанослойного покрытия TiN/CrN, полученного без ассистированного осаждения, ниже эрозионной стойкости титанового сплава ВТ8-1. Нанесение нанослойного покрытия производили из составного катода (1/2 катода по высоте Ti, 1/2 – хром) плазмохимическим методом. Покрытие опробовано на ОАО «Мотор Сич» и среди испытанных 18 вариантов эрозионностойких покрытий показало минимальное уменьшение хорды лопаток [9].

Разработаны износостойкие высокотемпературные покрытия для защиты деталей трения перспективных ГТД, в том числе покрытие из TiN для деталей из титанового сплава ВТ8 и покрытие Ti^+ (ионное модифицирование)+TiN для деталей двигателя из сплава ЭП742 на рабочую температуру 450°C, а также комплексное покрытие ВСДП-2 (никелевый сплав)+ (ВЦС-8+O₂) (керамический слой из сплава системы Zr–Y–Gd–Al)+MoS₂ для защиты стальных деталей компрессора с рабочей температурой 600°C [15, 25], обеспечивающие повышение износостойкости с 9 до 12 раз по сравнению с основой. Для определения характеристик покрытий использовали трибометр УМТ-3МТ фирмы SETR (США). Испытания проводили согласно СТО 1-595-2-476–2015 при расчетной нагрузке $\sigma < \sigma_{\text{в}}$ основы, скорости перемещения образца относительно контртела 1 м/с, пути трения 500 м при рабочей температуре покрытия. Область применения покрытий: детали ГТД, работающие в условиях сухого трения – втулки, валы, оси вращения, фланцы, газодинамические подшипники.

Разработаны покрытия для защиты деталей перспективных ГТД от фреттинг-износа и коррозии: антифреттинговое шликерное покрытие ВАФП-2 для защиты замков лопаток компрессора и вентилятора перспективных ГТД от фреттинга при температуре до 550°C [15], ионно-плазменное комбинированное покрытие марки ВАФП-3 для защиты болтовых соединений из стали ЭП866 при температурах до 650°C и антифреттинговое покрытие ВАФП-4 для защиты осей поворотных лопаток направляющего аппарата компрессора из сплава ВТ8М-1 при рабочих температурах до 400°C. Процесс фреттинг-износа и коррозии развивается в малоподвижных соединениях деталей (относительное перемещение сопряженных деталей ≤100–200 мкм). Продукты износа при фреттинге обычно не удаляются из зоны контакта, что инициирует процессы коррозии в зоне фреттинга. В процессе разработки покрытий испытания на фреттинг-износ проводили на трибометре УМТ-3МТ при амплитуде взаимного перемещения образца с покрытием и контртела 100 мкм

согласно СТО 1-595-2-507–2016 «Методы механических испытаний. Метод испытаний образцов на фреттинг-износ и фреттинг-коррозию».

Шликерное покрытие ВАФП-2 на основе алюмохромофосфатной связки (АХФС) с наполнителем MoSi_2 и внешней силикофосфатной пленки толщиной до 40 мкм для защиты деталей из стали ЭП866Ш и сплава ВТ8М-1 обеспечивает: стойкость к ускоренным циклическим климатическим испытаниям (УЦКИ) – до 10 циклов, стойкость к воздействию условий камер солевого тумана (КСТ) и тропического климата (КТК), а также промышленной зоны умеренного климата (г. Москва). Покрытие не снижает прочностные характеристики материалов основы, защищая сталь ЭП866Ш и титановый сплав ВТ8М-1 от износа. Покрытие без силикофосфатной пленки используется в серийном производстве лопаток компрессора ГТД РД-33МК и прошло первый этап испытаний на лопатках вентилятора ГТД ПД-14 из сплава ВТ6, показав заметно более высокую стойкость к фреттинг-износу по сравнению с серийным покрытием на основе гальванического серебра [15].

Ионно-плазменное комбинированное покрытие ВАФП-3 (ВЖЛ-2+Al+MoS₂) толщиной до 10 мкм из износостойкого сплава ВЖЛ-2 с внешним модифицированием поверхности ионами алюминия и поверхностным слоем из дисилицида молибдена (нанесение методом катафореза) обеспечивает снижение износа на 75% при температурах до 650°C, повышение сопротивления стали ЭП866 коррозионному растрескиванию при напряжении 580 МПа и не снижает прочностные характеристики стали при 20 и 650°C.

Микрослойное ионно-плазменное покрытие ВАФП-4, состоящее из нанослоев (Ti/Cr+TiN/CrN)+MoS₂ толщиной 6–8 мкм, обеспечивает снижение износа на 80% при температурах до 400°C и не снижает многоцикловую выносливость сплава ВТ8М-1 при 20 и 400°C.

В перспективных ГТД для снижения массы двигателя предусматривается широкое использование конструкций типа «блинк» и «блиск» (диски турбины и компрессора, выполненные как единое целое с лопатками компрессора или турбины). При этом отсутствие демпфирующих устройств на лопатках турбины и компрессора может привести к усталостным поломкам лопаток при резонансных частотах. Для снижения опасных напряжений в прикомлевой части лопаток при резонансных частотах предусматривается использование демпфирующих покрытий [26–29]. Во ФГУП «ВИАМ» разработаны демпфирующие покрытия из сплава системы Al–Ni–Y для лопаток компрессора перспективных ГТД из сплава типа ВТ6. Демпфирующее покрытие системы Al–Ni–Y снижает на ~50% напряжения в опасном сечении лопаток и образцов из титанового сплава ВТ6 по сравнению с лопатками и образцами-свидетелями без покрытия при резонансной частоте по первой изгибной форме.

Свойства демпфирующего покрытия системы Al–Ni–Y:

- толщина покрытия 50–60 мкм;
- жаростойкость при 400°С на базе 500 ч: 0,343 г/м² – без покрытия и 0,206 г/м² – с покрытием;
- шероховатость 1,3 мкм;
- покрытие не снижает длительную прочность титанового сплава ВТ6 при испытаниях на базе 100 и 500 ч и выносливость при 400°С;
- покрытие повышает эрозионную стойкость образца-свидетеля из сплава ВТ6 относительно образца-свидетеля без покрытия в 20 раз при угле атаки абразивного потока 70 град и в 8,3 раза – при 20 град (касательное обтекание).

Испытания демпфирующих покрытий проводили на вибростенде ETS Solution MPA 403-M124M при температурах 20 и 400°С, напряжении в опасном сечении 30–70 МПа, при моменте затяжки оснастки 180 Н·м и толщине образцов 1–3 мм.

Оборудование для нанесения ионно-плазменных защитных покрытий

Во ФГУП «ВИАМ» разработана альтернативная технология нанесения керамического слоя ТЗП методом среднечастотного плазмохимического магнетронного распыления (СПМР) мишеней из циркониевых сплавов системы Zr–Y–РЗМ (РЗМ – один или несколько редкоземельных металлов). Для нанесения керамического слоя ТЗП создана опытно-промышленная проходная установка УОКС-3 [8]. Внешний вид установки и схема рабочей камеры (расположение дуальных магнетронов) представлены на рис. 7.

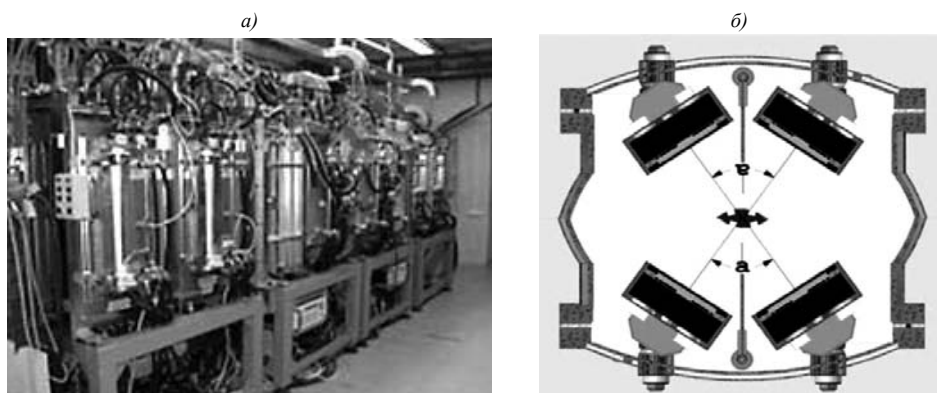


Рис. 7. Внешний вид установки среднечастотного магнетронного осаждения керамических слоев ТЗП (а) и схема расположения дуальных магнетронов в камере напыления (б)

В настоящее время проводятся исследования по разработке технологии нанесения керамического слоя ТЗП на установке УОКС-3 при скорости нанесения 10–15 мкм/ч. Установка содержит загрузочную камеру, где размещаются две загрузочные технологические тележки с установленными лопатками. В загрузочной камере производится ионная очистка поверхности лопаток потоками ионов Ag и термический нагрев лопаток радиационным методом. Затем тележки с лопатками поступают в камеру напыления с двумя позициями напыления, каждая из которых состоит из 4 магнетронных распылителей, направленных на зону обработки лопаток. Осаждение керамического слоя ТЗП производится плазмохимическим среднечастотным магнетронным распылением мишеней на основе циркония с РЗМ в среде аргоно-кислородной плазмы. Затем технологические тележки с напыленными лопатками перемещаются в камеру выгрузки, где лопатки охлаждаются, после чего тележки с лопатками выгружаются. При этом в установке происходит нанесение керамического слоя ТЗП на другую партию лопаток и производится размещение новых лопаток в камере загрузки установки. Производительность установки составляет 24–48 лопаток в смену в зависимости от габаритов обрабатываемых лопаток. Потребляемая мощность установки составляет 80 кВт·А. Преимущество установки – возможность нанесения керамического слоя ТЗП с коэффициентом теплопроводности ~ 1 Вт/(м·К) и сравнительно низкие энергозатраты при нанесении керамического слоя ТЗП на одну лопатку.

Для нанесения защитных и упрочняющих покрытий на конструкции типа «блиск» и «блинк», сопловые блоки ТВД и ТНД создана опытно-промышленная установка МАП-5 роторного типа для нанесения покрытий во встречных плазменных потоках металлической плазмы вакуумного дугового разряда (рис. 8).



Рис. 8. Внешний вид (а) и рабочая камера (б) установки МАП-5 для нанесения ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали, конструкции типа «блиск» и «блинк», сопловые лопатки и другие детали ГТД сложной геометрической формы

Установка имеет две пары вакуумно-дуговых испарителей с цилиндрическим вращающимся катодом и замкнутой эллиптической зоной испарения на боковой поверхности катода вдоль образующей цилиндра. Испарители каждой пары расположены напротив друг друга, между ними располагается технологический ротор с закрепленными на нем сопловыми блоками, крупногабаритными рабочими лопатками ТВД или конструкцией типа «блиск» («блинк»). Ось вращения обрабатываемых деталей имеет возможность перемещения в пространстве, что позволяет обрабатывать технологические роторы, конструкции типа «блинк» и «блиск» различного диаметра — до 1000 мм. Потoki вакуумно-дуговой плазмы материала покрытия от испарителей встречаются и изменяют свое осевое направление на радиальное, что и позволяет наносить покрытия на лопатки на технологическом роторе, конструкции типа «блинк» или «блиск» с высокой степенью равномерности по толщине. Производительность установки составляет 1–2 ротора в смену в зависимости от габаритов ротора при потребляемой мощности 70 кВт·А.

Выводы

Рассмотрены разработки ФГУП «ВИАМ» в области ионно-плазменных защитных и упрочняющих покрытий, применительно к созданию перспективных ГТД для вертолетов и самолетов гражданского и военного назначения.

В области жаростойких и теплозащитных покрытий созданы высокотемпературные конденсационно-диффузионные покрытия из новых жаростойких сплавов для монокристаллических лопаток турбины высокого давления из рений- и рений-рутениеисодержащих жаропрочных сплавов, разработаны новые составы металлических мишеней для нанесения магнетронным способом керамических слоев теплозащитных покрытий для рабочих температур до 1200–1250°С.

Созданы новые комплексные ионно-плазменные и шликерные покрытия для защиты стальных и титановых деталей ГТД от высокотемпературного износа и от фреттинг-износа, а также демпфирующие покрытия для снижения в 2 раза напряжений в опасном сечении лопаток и других деталей компрессора при резонансных частотах по первой гармонике.

Разработано новое опытно-промышленное оборудование для нанесения ионно-плазменных покрытий на детали серийных и перспективных авиационных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Металлы. 2007. №5. С. 23–34.
3. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19–36.
4. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Диффузионные алюминидные покрытия для защиты поверхности внутренней полости монокристаллических лопаток турбин из рений- и рений-рутениейсодержащих жаропрочных сплавов. Часть I // Металлы. 2012. №5. С. 1–9.
5. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Диффузионные алюминидные покрытия для защиты поверхности внутренней полости монокристаллических лопаток турбин из рений и рений-рутениейсодержащих жаропрочных сплавов. Часть II // Металлы. 2013. №2. С. 46–54.
6. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36-ВИ // МиТОМ. 2011. №1. С. 34–40.
7. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М. Современное состояние и основные тенденции развития высокотемпературных теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД // Авиационная промышленность. 2008. №4. С. 33–38.
8. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Металлы. 2012. №1. С. 5–13.
9. 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.
10. Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия из нитридов и карбидов металлов и их плазмохимический синтез // РХЖ. 2010. Т. 54. №1. С. 103–110.
11. Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора ГТД // Металлы. 2009. №3. С. 3–20.
12. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Луценко А.Н. Наноструктурные ионно-плазменные защитные и упрочняющие покрытия для лопаток

- газотурбинных двигателей // Вопросы материаловедения. 2008. №2. С. 175–186.
13. Мубояджян С.А., Коннова В.И., Горлов Д.С., Александров Д.А. Исследование фреттингостойкости стали ЭП866Ш // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-1-1.
 14. Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Коррозионностойкое антифреттинговое покрытие для защиты замков лопаток компрессора и вентилятора ГТД // Металлы. 2014. №5. С. 52–60.
 15. Артеменко Н.И., Мубояджян С.А., Симонов В.Н., Александров Д.А. Оценка относительной износостойкости ионно-плазменных конденсированных покрытий на сплавах ВТ8 и ЭП742 // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №3 (15). Ст. 09. URL: materialsnews.ru (дата обращения: 23.09.2016).
 16. Будиновский С.А., Матвеев П.В., Смирнов А.А. Исследование жаростойкости литейных жаропрочных никелевых сплавов в области температур 1000–1200°C // Авиационная промышленность. 2014. №2. С. 48–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-48-52.
 17. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 17–20.
 18. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Разработка ионно-плазменных жаростойких металлических слоев теплозащитных покрытий для охлаждаемых рабочих лопаток турбин // МиТОМ. 2013. №11. С. 16–21.
 19. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 43–46.
 20. Матвеев П.В., Будиновский С.А. Исследование свойств защитных жаростойких покрытий для интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА для рабочих температур до 1300°C // Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 22–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-22-26.
 21. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 12–15.
 22. Будиновский С.А., Смирнов А.А., Матвеев П.В., Чубаров Д.А. Разработка теплозащитных покрытий для рабочих и сопловых лопаток турбины из жаропрочных и интерметаллидных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 05.

- URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-5-5.
23. Смирнов А.А., Будиновский С.А., Матвеев П.В., Чубаров Д.А. Разработка теплозащитных покрытий для лопаток ТВД из никелевых монокристаллических сплавов ВЖМ4, ВЖМ5У // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №1. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-3-3.
 24. Чубаров Д.А., Будиновский С.А. Выбор керамического материала для теплозащитных покрытий лопаток авиационных турбин на рабочие температуры до 1400°C // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-7-7.
 25. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Коннова В.И. Методика испытаний на относительную эрозионную стойкость твердых покрытий ответственных деталей компрессора ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. №4. С. 7–18.
 26. Шорр Б.Ф., Серебряков Н.Н. Расчетно-экспериментальный анализ амплитудно-зависимых характеристик демпфирования в деталях и материалах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. №3. С. 91–99.
 27. Муравченко Ф.М., Шереметьев А.В. Актуальные проблемы динамики, прочности и надежности современных авиадвигателей // Вибрации в технике и технологиях. 2001. №4 (20). С. 2–5.
 28. Ивченко Д.В., Штанько П.К., Исаев Н.В., Павлов И.Ю. Эрозионная прочность деталей газоздушного тракта вертолетных газотурбинных двигателей при эксплуатации в условиях запыленности воздуха. Современное состояние проблемы и возможный путь ее решения // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. №7 (15). С. 135–139.
 29. Щепилов А.В., Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Коннова В.И. Исследование влияния ионно-плазменных покрытий на демпфирующую способность композиции «сплав–покрытие» при испытаниях на вибродинамическом стенде // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-8-8.