

УДК 620.193.2

*Д.С. Кашин¹, И.М. Иванов¹, О.Н. Доронин¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ
ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-67-74

Представлены результаты исследований стойкости к эрозионному воздействию паяных соединений с различными вариантами покрытий. Установлено, что покрытие на основе карбида вольфрама, нанесенное электроискровым методом, оказывает наибольшее положительное влияние на эрозионную стойкость припоя марки ВПр4, при этом предварительная механическая обработка поверхности припоя также повышает стойкость к воздействию эрозионного потока. Показана возможность применения такого покрытия в качестве эрозионностойкого подслоя для композиционных защитных покрытий, наносимых шликерным методом.

Ключевые слова: эрозионностойкое покрытие, паяные соединения, электроискровое легирование, припой, эрозионная стойкость.

*D.S. Kashin¹, I.M. Ivanov¹, O.N. Doronin¹***RESEARCH OF EROSION RESISTANCE OF SOLDERED
JOINTS WITH PROTECTIVE COATINGS**

Presents results of studies of the erosion resistance of soldered joints with various types of coatings. It was established that a coating based on tungsten carbide, applied by the electro-spark method, has the greatest positive influence on the erosion resistance of VPr4 solder. At the same time, preliminary machining of the solder surface also increases resistance to the effects of erosion flow. The possibility of using an electrospark coating as an erosion-resistant sublayer for composite protective coatings was shown.

Keywords: erosion-resistant coating, soldered joints, electrospark alloying, solder, erosion resistance.

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 развития современного авиационного двигателестроения – повышение долговечности и надежности деталей газотурбинных двигателей (ГТД) при непрерывном увеличении температуры газа в камере сгорания [1–3]. В таких условиях наиболее слабым элементом в системе «материал–рабочая среда», определяющим допустимые условия эксплуатации и срок службы всей системы, является поверхность материала. В связи с этим возникает необходимость защиты поверхности деталей от агрессивного воздействия внешней среды.

Зачастую детали ГТД представляют собой сложные объемные конструкции, которые невозможно получить без применения большого количества паяных соединений. При этом детали ГТД при эксплуатации подвержены как физическому, в частности эрозионному воздействию пылегазового потока, так и химическому воздействию: коррозии при высоких (детали турбины) и низких температурах (детали компрессора, обвязка двигателя). Защита поверхности ответственных деталей турбины и камеры

сгорания от высокотемпературной газовой коррозии осуществляется с помощью покрытий, наносимых ионно-плазменными и диффузионными методами [4, 5].

Деталям ГТД, работающим при низких температурах, зачастую необходима защита как от коррозии, так и от воздействия эрозионного потока [6]. Для защиты от эрозионного износа широко применяются покрытия на основе карбидов и нитридов, наносимые ионно-плазменными методами [7–9]. Однако такие методы нанесения покрытий имеют ряд требований к обрабатываемой детали: небольшие габариты (максимальные габариты деталей определяются геометрическими размерами применяемых установок для нанесения покрытий) и отсутствие затененных поверхностей [10]. Эти ограничения делают ионно-плазменный метод неприменимым для защиты крупногабаритных деталей и деталей сложной формы, обладающих большим количеством паяных соединений.

Помимо этого, технология изготовления детали зачастую накладывает ограничения на выбор методов нанесения защитных покрытий. Так, стальные детали ГТД не должны подвергаться нагреву выше температуры отпуска (650–680 °С) при технологических операциях нанесения покрытий [11], что не позволяет применять диффузионные методы нанесения покрытий, а также делает невозможным проведение отжига после нанесения покрытий ионно-плазменным методом.

При учете всех требований и ограничений, накладываемых конструкцией и технологией изготовления паяных деталей ГТД установлено, что наиболее оптимальным методом нанесения покрытия на поверхности является шликерный метод, к преимуществам которого можно отнести [12–14]:

- обеспечение катодного эффекта покрытия (сохранение защитных свойств при повреждении покрытия);
- возможность нанесения на детали сложной формы (в том числе на затененные поверхности);
- ремонтпригодность покрытия (возможность локального нанесения);
- относительная простота и доступность технологического оборудования.

Однако покрытия, нанесенные шликерным способом, не обладают высокими показателями стойкости к эрозионному воздействию пылегазового потока. Для повышения эрозионной стойкости шликерного покрытия может быть применен эрозионно-стойкий подслои. Нанесение подобного подслоя возможно с помощью метода электроискрового легирования. Данный метод обладает следующими преимуществами [15]:

- отсутствие перегрева обрабатываемой детали;
- высокая степень адгезии;
- возможность локального нанесения подслоя на поверхности, наиболее подверженные воздействию эрозионного потока (обрабатываемая область определяется геометрическими параметрами используемого электрода);
- возможность ремонта поврежденного покрытия.

Материалы и методы

Для определения относительной эрозионной стойкости изготовлены круглые образцы из сталей марок ЭИ961Ш и 12Х18Н10Т диаметром 25 мм и толщиной 2,5–3,0 мм. Поскольку образцы из стали ЭИ961Ш оказались более стойкими к эрозионному воздействию, именно они выбраны в качестве основы для нанесения на них с помощью электроискрового метода покрытий из следующих материалов [16]:

- алюминий – для обеспечения катодного эффекта электроискрового подслоя;
- медь и латунь – для исследования демпферных свойств покрытия (увеличение эрозионной стойкости благодаря гашению удара абразивных частиц);
- стеллит, сплав 9ХФ, молибден, карбид вольфрама (сплав ВК8) – для увеличения эрозионной стойкости благодаря твердости электроискрового подслоя;

– сплав ХН78 – для обеспечения эрозионной стойкости благодаря более высокой твердости подслоя по сравнению с припоем марки ВПр4.

Поскольку определить стойкость припоя в паяном соединении невозможно вследствие различия свойств материалов, входящих в соединение, а также сложностей при определении площади материалов, подвергающихся воздействию эрозионного потока, поверхность плоских образцов облужена припоями марок ВПр4 и ВПр50. Кроме того, поверхность припоя части образцов механически сглажена перед нанесением подслоя методом электроискрового легирования. Наконец, для определения эффективности всей конструкции покрытия на поверхность припоев нанесены эрозионностойкий подслои и композиционные покрытия, полученное с помощью шликерного метода.

Испытания по определению эрозионной стойкости проводили по методике, разработанной во ФГУП «ВИАМ». Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

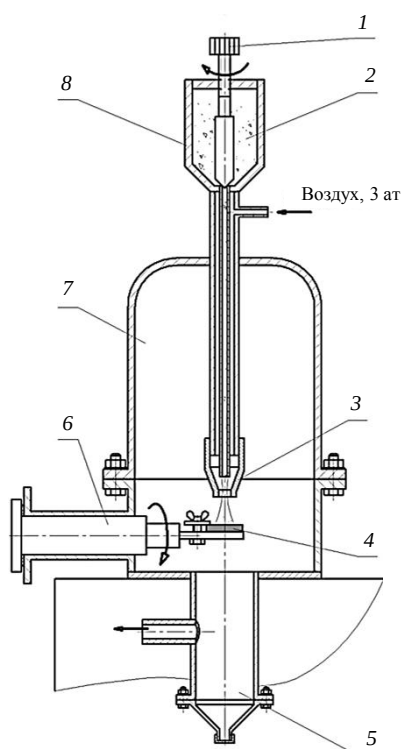


Рис. 1. Схема лабораторной установки для испытания композиции образцов на относительную эрозионную стойкость: 1 – винт для регулирования скорости подачи абразива; 2 – абразив; 3 – безрасходное сопло; 4 – испытываемый образец; 5 – циклон; 6 – держатель образца; 7 – камера; 8 – бункер для абразивных частиц

Испытания на эрозионную стойкость включают три цикла с использованием абразивного материала массой 400 ± 5 г и фракцией не более 700 мкм. Образцы подвергали воздействию пылегазового потока, направленного под углом 20 (касательное обтекание) и 70 градусов (лобовое столкновение).

Относительную эрозионную стойкость определяли весовым методом по разнице начальной и конечной массы образца до и после испытаний. Относительное изменение массы рассчитывали по формуле

$$\Delta m = m_1 - m_2,$$

где m_1 – масса образца до испытаний, мг; m_2 – масса образца после испытаний, мг.

Относительное среднее изменение массы (в мг/кг) за один цикл испытаний определяли в расчете на 1 кг абразивного материала по следующей формуле:

$$\Delta P/m_{\text{абр}} = n(\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3)/m_{\text{абр}},$$

где Δm_1 , Δm_2 , Δm_3 – разность масс после каждого цикла испытаний, мг; ΔP – относительное изменение массы образца, мг; $m_{\text{абр}}$ – масса абразивного материала за один цикл испытаний, кг; n – количество циклов.

Коэффициент объемной эрозии (в мм³/кг) определяли по формуле

$$\varepsilon_o = \Delta P/(\rho \cdot m_{\text{абр}} \cdot n),$$

где ρ – плотность материала основы для образца без покрытия или плотность покрытия, г/см³.

Относительный эрозионный износ рассчитывали по формуле

$$\zeta = \varepsilon_{o,п}/\varepsilon_{o,о},$$

где $\varepsilon_{o,п}$ и $\varepsilon_{o,о}$ – коэффициенты объемной эрозии покрытия и материала основы соответственно.

При определении относительной эрозионной стойкости износ материала основы без покрытия принимали за единицу. В качестве материала основы выбран припой марки ВПр4.

Результаты и обсуждение

Результаты эрозионных испытаний при угле воздействия пылегазового потока 20 градусов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из различных материалов на относительную эрозионную стойкость (ζ) при угле воздействия пылегазового потока 20 градусов

Вид покрытия/материал	Материал электрода	Δm , мг	$\Delta P/m_{\text{абр}}$, мг/кг	ε_o , мм ³ /кг	ζ , усл. ед.
ЭИ961	–	0,0045	3,66	0,47	0,44
12Х18Н10Т	–	0,0046	3,74	0,47	0,45
ВПр4	–	0,0104	8,45	1,05	1
ВПр50	–	0,0024	1,95	0,23	0,22
Электроискровое покрытие	Медь	0,0066	5,37	0,60	0,57
	Латунь	0,0079	6,42	0,73	0,70
	Стеллит	0,0053	4,31	0,51	0,48
	ХН78	0,0062	5,04	0,60	0,57
	Хром–ванадий (9ХФ)	0,0060	4,88	0,62	0,59
	Молибден	0,0072	5,85	0,57	0,54
	ВК8	0,0059	4,80	0,31	0,29
Электроискровое покрытие/ ВПр4	ВПр4 + ВК8	0,0101	8,21	0,52	0,50
	ВПр4 (сглаженный) + ВК8	0,0093	7,56	0,48	0,46
ВПр4 + композиционное покрытие	–	0,0200	16,26	6,02	5,72
	ВК8	0,0162	13,17	4,88	4,63

При эрозионных испытаниях с углом атаки 20 градусов все покрытия выдержали по три цикла испытаний.

Припой марки ВПр50 при этих условиях обладает самым высоким показателем эрозионной стойкости среди всех испытанных материалов. Припой марки ВПр4 серийно применяется на предприятиях двигателестроительной отрасли и имеет минимальную стойкость к эрозионному воздействию (среди материалов, входящих в конструкцию паяного соединения), в связи с чем и выбран в качестве основного материала при определении относительной эрозионной стойкости.

Для защиты припоя марки ВПр4 наиболее целесообразно применять эрозионно-стойкое покрытие на основе карбида вольфрама, нанесенное методом электроискрового

легирования. Припой марки ВПр4 с нанесенным эрозионностойким покрытием сопоставим со сталями марок 12Х18Н10Т и ЭИ961Ш по стойкости к воздействию эрозионного потока. Механическая обработка поверхности припоя перед нанесением покрытия незначительно повышает стойкость припоя с покрытием к воздействию эрозионного потока.

Композиционное покрытие выдержало три цикла испытаний. Нанесение эрозионностойкого подслоя на основе карбида вольфрама повышает стойкость данного покрытия (наблюдается снижение относительного эрозионного износа до 20 %).

Покрытия на основе меди и латуни, несмотря на достаточно высокий показатель эрозионной стойкости, не могут применяться в составе паяного соединения сталей 12Х18Н10Т и ЭИ961Ш из-за возникновения разности электрохимических потенциалов, что приведет к усиленной коррозии стали ЭИ961Ш.

Покрытия, нанесенные с помощью электродов, изготовленных из стеллита, сплавов ХН78Ю и 9ХФ, а также из молибдена, уступают по своим защитным свойствам покрытию на основе карбида вольфрама.

Графическое изображение показателей относительной эрозионной стойкости при угле атаки 20 градусов представлено на рис. 2 и 3.

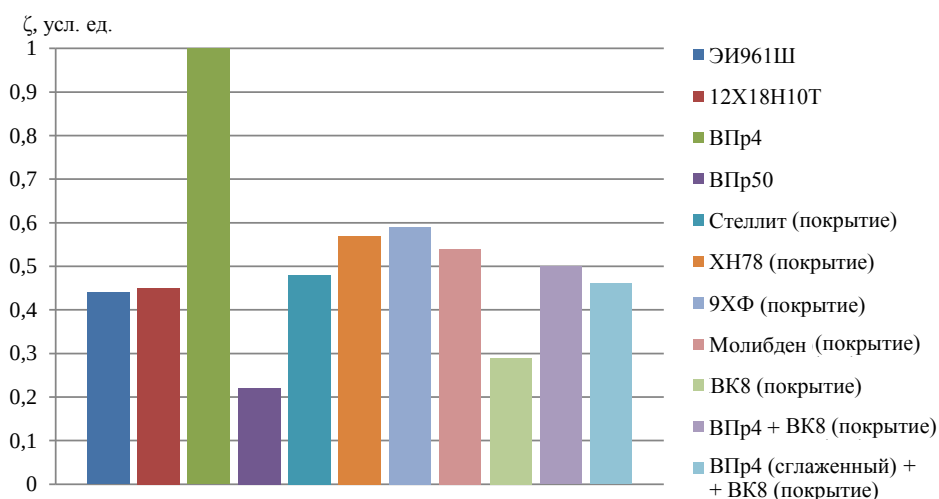


Рис. 2. Относительный эрозионный износ различных вариантов покрытий при угле воздействия эрозионного потока 20 градусов

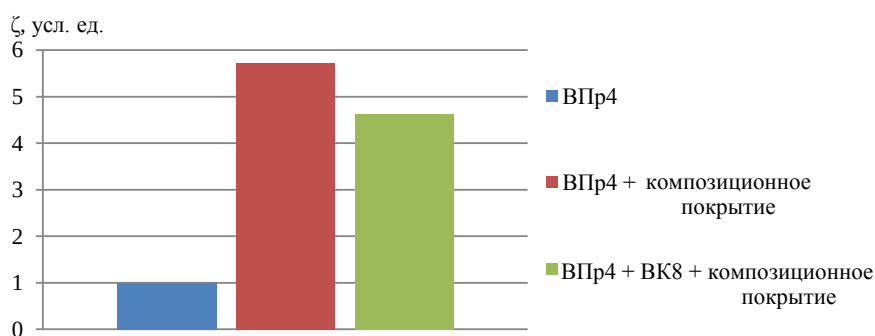


Рис. 3. Относительный эрозионный износ композиционного покрытия с эрозионностойким подслоем и без него при угле воздействия эрозионного потока 20 градусов

При увеличении угла атаки существенно повышается эрозионное воздействие пылегазового потока. Однако следует учесть, что угол атаки 70 градусов более характерен для лопаток компрессора, чем для условий работы паяных деталей камеры сгорания.

Результаты эрозионных испытаний образцов при угле атаки, равном 70 градусам, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов из различных материалов на относительную эрозионную стойкость (ξ) при угле воздействия пылегазового потока 70 градусов

Вид покрытия/ материал	Материал электрода	Δm , мг	$\Delta P/m_{абр}$, мг/кг	ε_0 , мм ³ /кг	ξ , усл. ед.	Состояние материала/покрытия
ЭИ961	—	0,0108	8,78	1,13	0,52	Разрушения не произошло
12X18H10T	—	0,0121	9,84	1,24	0,58	
ВПр4	—	0,0213	17,32	2,16	1,00	
ВПр50	—	0,008	6,50	0,78	0,36	
Композиционное покрытие	—	0,0257	62,68	23,23	10,77	Разрушение покрытия после первого цикла
Электроискровое покрытие	Алюминий	0,0310	75,61	28,01	12,99	Разрушение покрытия после второго цикла
	Медь	0,0048	11,71	1,31	0,61	Разрушения не произошло
	Латунь	0,0069	16,83	1,93	0,89	
	Стеллит	0,0165	13,41	1,59	0,74	
	ХН78	0,0133	10,81	1,29	0,60	
	9ХФ	0,0189	15,37	1,97	0,91	
	Молибден	0,0186	15,12	1,48	0,69	
	ВК8	0,0157	12,76	0,82	0,38	
Электроискровое покрытие/ВПр4	ВПр4 + ВК8	0,0245	19,92	1,27	0,59	
	ВПр4 (сгла- женный) + + ВК8	0,0216	17,56	1,12	0,52	
ВПр4 + компози- ционное покрытие	—	0,0283	69,02	8,52	11,86*	Разрушение покрытия после первого цикла
	ВК8	0,0560	45,53	16,87	7,82*	Разрушение покрытия после второго цикла

* Приведены оценочные значения по результатам пройденных циклов испытания.

Как и при испытаниях с углом атаки 20 градусов, наибольшей эрозионной стойкостью среди испытанных материалов обладает припой марки ВПр50, наименьшей – припой марки ВПр4.

Самый высокий показатель эрозионной стойкости – у покрытия на основе карбида вольфрама, полученного методом электроискрового легирования. Нанесение эрозионностойкого покрытия на основе карбида вольфрама на поверхность припоя марки ВПр4 увеличивает его стойкость к эрозионному воздействию до уровня стали. Механическая обработка поверхности припоя перед нанесением покрытия также повышает стойкость припоя с покрытием к воздействию эрозионного потока.

Покрытие на основе алюминия разрушилось после второго цикла испытаний. Покрытия на основе меди и латуни сохраняют свои защитные свойства для припоя ВПр4, как и при испытаниях с углом атаки 20 градусов.

Композиционное покрытие разрушается после первого цикла испытаний при угле воздействия пылегазового потока 70 градусов. Композиционное покрытие с эрозионностойким подслоем на основе карбида вольфрама также разрушается после первого цикла испытаний. Тем не менее внешний слой покрытия (композиционное покрытие) должен сохранять защитные свойства даже при нарушении его целостности [13, 14]. В связи с тем, что невозможно определить точный вклад каждого из компонентов в изменение массы образца при испытаниях, для этих вариантов приведены оценочные значения. При этом показатель относительного эрозионного износа композиционного

покрытия с эрозионностойким подслоем оказался ниже данного показателя покрытия без подслоя.

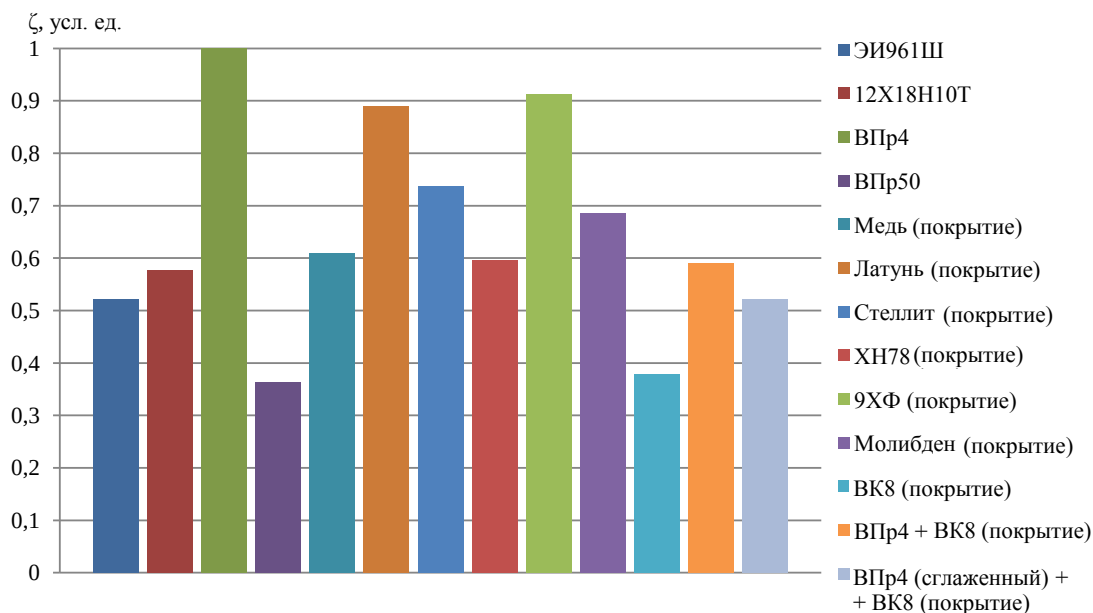


Рис. 4. Относительный эрозионный износ различных вариантов покрытий при угле воздействия эрозионного потока 70 градусов

Графическое изображение показателей относительной эрозионной стойкости при угле атаки 70 градусов представлено на рис. 4. Данные для композиционного покрытия с эрозионностойким подслоем отсутствуют, поскольку не представляется возможным определить вклад каждого из слоев в общее изменение массы образца при испытаниях из-за разрушения внешнего слоя покрытия.

Заключения

Для защиты паяных соединений деталей ГТД от коррозионного и эрозионного воздействий невозможно применение таких методов нанесения покрытий, как ионно-плазменный и диффузионный, из-за ряда конструкционных и технологических ограничений. В данном случае альтернативным покрытием может стать сочетание эрозионностойкого подслоя, нанесенного методом электроискрового легирования, с композиционным покрытием, выполненным с помощьюшликерного метода.

Метод электроискрового легирования позволяет выполнять локальное нанесение эрозионностойкого покрытия на крупногабаритные детали и детали сложной формы. При этом нанесение покрытия электроискровым способом не приводит к существенному нагреву детали и не требует последующей термической обработки. Кроме того, возможно восстановление (ремонт) поврежденного эрозионностойкого покрытия.

На основании проведенных исследований установлено, что покрытия, наносимые методом электроискрового легирования, обладают высокой стойкостью к эрозионному воздействию газового потока. Так, применение покрытия на основе карбида вольфрама значительно повышает (до 2 раз) эрозионную стойкость припоя марки ВПр4. Предварительная механическая обработка (сглаживание) припоя увеличивает эрозионную стойкость припоя с покрытием до 20 %. Композиционное покрытие выдерживает три цикла испытаний на эрозионную стойкость при угле атаки 20 градусов и разрушается после первого цикла при угле атаки 70 градусов. Однако такое

покрытие должно сохранять свои защитные свойства даже при нарушении целостности благодаря катодному эффекту. Установлено также, что подслои на основе карбида вольфрама снижает относительный эрозионный износ композиционного покрытия до 20 %. Таким образом, показана перспективность применения эрозионностойкого покрытия в качестве подслоя для композиционных защитных покрытий, наносимых шликерным методом.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Петрова А.П. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 75 лет поиска, творчества, открытий. М.: Наука, 2007. 343 с.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Конверсия в машиностроении. 1999. № 2. С. 42–47.
5. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
6. Карпинос Б.С., Коровин А.В., Лобунько А.П., Ведищева М.Ю. Эксплуатационные повреждения турбореактивных двигателей с форсажной камерой сгорания // Вестник двигателестроения. 2014. № 1. С. 18–24.
7. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // Электрометаллургия. 2016. № 10. С. 23–38.
8. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С., Журавлева П.Л. Исследование свойств нанослойных эрозионностойких покрытий на основе карбидов и нитридов металлов // Металлы. 2011. № 4. С. 3–20.
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. 3–20.
10. Виноградов А.С. Конструкция ТРДДФ РД-33. Самара: Самарск. гос. аэрокосмич. ун-т им. С.П. Королева, 2013. 99 с.
11. Зрелов В.А. Отечественные ГТД. Основные параметры и конструктивные схемы (Часть 2): учеб. пособие. Самара: Самарск. гос. аэрокосмич. ун-т, 2002. 250 с.
12. Кашин Д.С., Дергачева П.Е., Стехов П.А. Жаростойкие покрытия, наносимые шликерным методом (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-64-75.
13. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 242–263. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-242-263.
14. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А. Пути решения проблемы замены кадмиевого покрытия // Гальванотехника и обработка поверхности. 2018. Т. 26. № 2. С. 13–25.
15. Маликов А.А., Маркова Е.В., Чечуга О.В. Применение электроискровых методов упрочнения поверхности для повышения эксплуатационной стойкости инструментов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 19–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-19-25.
16. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Журавлева П.Л., Горлов Д.С. Исследование влияния подготовки поверхности и асистируемого осаждения на структуру и свойства эрозионностойкого ионно-плазменного покрытия // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.01.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.