

УДК 621.78

*Д.П. Фарафонов¹, Н.Е. Лецев¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹, Н.И. Артеменко¹***АБРАЗИВНО-ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ УПЛОТНЕНИЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД**

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74

Представлены основные результаты выполненных во ФГУП «ВИАМ» работ, посвященных повышению износостойкости деталей уплотнений проточной части ГТД – торцов рабочих лопаток и роторных колец компрессора. Исследованы триботехнические свойства износостойких и композиционных абразивных материалов и покрытий, полученных различными методами: детонационного напыления, электроосаждения, вакуумной пайки. Разработано несколько абразивно-износостойких материалов, основа которых представляет собой металлическую матрицу с диспергированными в нее частицами твердых тугоплавких соединений.

Ключевые слова: абразивно-износостойкий материал, торцы рабочих лопаток, абразивные покрытия, уплотнительные материалы, ресурс, газотурбинный двигатель.

*D.P. Farafonov¹, N.E. Leshchev¹, A.N. Afanasiev-Khodykin¹, N.I. Artemenko¹***ABRASIVE WEAR-RESISTANT SEAL MATERIALS
OF THE GAS TURBINE ENGINE FLOW SECTION**

The paper provides the main results of the works performed by VIAM Federal State Unitary Enterprise devoted to the improvement of wear resistance of seals in gas turbine engines. There are examined the tribotechnical characteristics of wear-resistant and composite abrasive materials and coatings obtained by different methods, such as: detonation spraying, electrosedimentation, vacuum soldering. Some abrasive and wear-resistant materials the basis of which represents a metal matrix with the particles of hard high-melting compounds dispersed in it are developed.

Keywords: abrasive wear-resistant material, blades tips, abrasive coatings, sealing materials, durability, gas-turbine engine.

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

Известно, что одним из путей повышения КПД двигателей является создание эффективной системы уплотнения проточного тракта компрессора и турбины. Это может быть достигнуто путем создания минимального, близкого к нулю, радиального зазора между торцами лопаток и корпусом двигателя и сохранения его на заданном уровне в течение всего ресурса работы двигателя. Однако в процессе эксплуатации в результате действия высоких температур газового потока, деформации корпуса и лопаток нередко возникает контакт торцевой части лопаток с корпусом двигателя. В результате чего происходит значительный износ лопаток, так как жаропрочные материалы, из которых они изготавливаются, не являются износостойкими. Следствием этого является увеличение радиального зазора проточного тракта в процессе эксплуатации двигателя, что ведет к снижению КПД и сокращению ресурса работы лопаток [1–3].

Одним из путей уменьшения износа рабочих лопаток, который достаточно часто используется на практике, является заранее планируемое создание начального радиального зазора, что позволяет в процессе работы избежать касания торцов лопаток и корпуса турбины. Другим применяемым направлением является установка на корпусе двигателя так называемых уплотнительных элементов, одним из обязательных свойств которых является их достаточная истираемость торцевой частью лопатки, не приводящая к ее износу. При этом в качестве одного из основных параметров истираемого материала принято соотношение износов уплотнительного покрытия и лопатки. Оценка применяемых уплотнительных материалов по этому параметру показала, что эффективная работа уплотнений обеспечивается при относительном износе не менее 5:1 [3].

Каждый из указанных путей имеет как свои определенные преимущества, так и достаточно серьезные недостатки. Однако общим является то,

что ни один из них не может обеспечить создание эффективной системы уплотнения. При этом весьма значительные температуры газового потока в турбине (~1500°C), характерные для современных ГТД, в еще большей степени осложняют решение данной проблемы. Так, при отсутствии уплотнительных истираемых элементов на корпусе двигателя, тем не менее, касания лопаток избежать не удастся. Кроме того, в результате происходит еще и значительный местный разогрев лопаток и, как следствие, неизбежный их износ, «намазывание» и перенос материала на корпусные вставки. Создание достаточно эффективного, технологичного, хорошо истираемого уплотнительного материала, работоспособного при столь высоких температурах, – весьма сложная задача. В связи с этим, как показывают результаты теоретических расчетов, опыт работы зарубежных фирм, а также нашедшая в настоящее время распространение концепция конструирования современных ГТД с точки зрения получения наиболее эффективной системы уплотнения, единственно правильным и приемлемым для успешного решения указанной проблемы является создание специального блока в системе уплотнения. Он включает в себя своеобразную пару трения: торец лопатки с нанесенным на него высокотемпературным абразивно-износостойким покрытием и элемент уплотнения, обладающий достаточно хорошей истираемостью в условиях врезания [4–10].

В данной статье представлены результаты исследований износостойких и абразивно-износостойких материалов различного состава, полученных различными методами, которые проводились во ФГУП «ВИАМ» в рамках научно-исследовательских работ, посвященных поиску материалов для использования в качестве упрочнителей торцов лопаток и гребешков бандажных колец, работающих по уплотнительным материалам, в том числе в рамках комплексной научной проблемы 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [11–13].

Материалы и методы

При проведении исследований по разработке абразивно-износостойких покрытий и оценки их эффективности основными являлись сравнительные испытания опытных композиций на врезание, позволяющие оценить уровень устойчивости покрытия к износу, а также степень их абразивности по отношению к уплотнительному материалу. Помимо этого, данные исследования косвенно указывают на ту или иную степень возникающего при врезании термического напряжения, испытываемого материалом лопатки с различными нане-

сенными опытными композициями покрытий. Испытания на врезание проводили на смонтированной на базе испытательной машины ИМ-58 лабораторной высокоскоростной установке при торцевом трении подвижного (материал рабочих лопаток или роторных колец) и неподвижного (уплотнительный материал или материал направляющих лопаток) образцов.

Метод испытания на врезание основан на измерении осевой реакции (P_{oc}) и момента трения ($M_{тр}$) при контактном взаимодействии исследуемой пары. За результаты испытаний на врезание также принимаются:

– линейный износ (I) гребешков контртела и максимальная глубина канавки в уплотнительном материале с точностью до 0,01 мм;

– работа сил трения за процесс врезания, определяемая по формуле

$$A_{тр} = M_{тр,ср} \cdot \omega \cdot \tau,$$

где $M_{тр,ср}$ – средний момент трения за процесс врезания, кгс·см; ω – угловая скорость вращения образца, об/мин; τ – длительность врезания, мин;

– состояние поверхности трения и характер износа, определяемые визуально.

Для проведения указанных испытаний использовали высокотемпературные уплотнительные материалы, наносимые на детали двигателей газопламенным и плазменным напылением: КНА – системы Ni–Si–Al–BN–C; УП-34 – системы Ni–Cr–Al с частицами нитрида бора, плакированными никелем; материал из сплава ЭП648.

В качестве подложек для нанесения износостойких покрытий использовали образцы из сплавов ВТ25У, ЭИ698, ВТ8М, ЖС6У и ЖС32, серийно применяемых для изготовления лопаток компрессора и турбины газотурбинных двигателей.

Для определения работоспособности абразивно-износостойких материалов в условиях работы реальных ГТД проведены испытания некоторых опытных покрытий, нанесенных на рабочие лопатки, в продувочных каналах и в составе экспериментального высокотемпературного газогенератора. Испытания упрочненных по торцу лопаток проводили при температуре рабочего газа 700–1100°C и давлении газа 3–7 кН/м².

Результаты и обсуждение

На первых этапах поисковых исследовательских работ исследована возможность применения жаропрочных износостойких сплавов для упрочнения торцов рабочих лопаток ГТД. Исследовали высокотемпературные износостойкие литые сплавы на основе никеля – ВЖЛ2, ВЖЛ2М, ВЖЛ15 и сплав на основе кобальта Х25Н10В8, а также сплавы опытных составов систем Ni–Cr–W–Al–Si, Co–Cr–W–Mo, Co–Cr–W–B, Co–Cr–W–Al–Y и Co–Cr–W–Si. Это многокомпонентные сплавы, характеризующиеся высокой износостойкостью

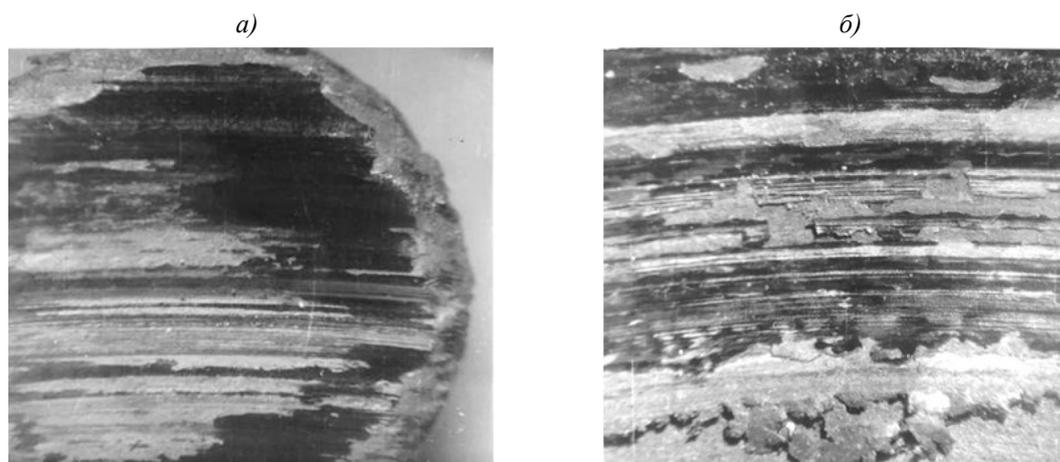


Рис. 1. Поверхности трения при врезании образцов износостойкого сплава системы Co–Cr–W–B (а) и высоко-температурного истираемого материала КНА (б)

при повышенных температурах, высокой прочностью и стабильностью структуры. Высокая износостойкость этих сплавов достигается введением в их состав легирующих элементов, способствующих образованию карбидов различного стехиометрического состава, и износостойких составляющих в виде боридов и интерметаллидных фаз Лавеса [14].

Упрочнение торцов лопаток осуществляли методами, позволяющими получить высокую прочность сцепления покрытия с материалом лопатки, – аргоно-дуговой сварки и пайки в вакууме.

Результаты испытаний на врезание износостойких сплавов (как в виде наплавки, так и в виде паяных пластинок) в паре с серийными уплотнительными покрытиями марок КНА и 20Б показали, что применение сплавов большинства составов для упрочнения торцов лопаток не приводит к значительному эффекту – снижению износа торца при контактном взаимодействии. При контакте пары трения происходит сильный разогрев, сопровождающийся разупрочнением износостойких материалов. На поверхности образца с уплотнительным покрытием наблюдается «намазывание» износостойкого сплава (рис. 1).

Средний износ образцов с износостойкими покрытиями мало отличается от износа лопаточных сплавов без покрытий.

Наилучшие результаты среди серии выполненных испытаний получены при упрочнении рабочей поверхности сплава ЖС6У износостойкими сплавами систем Ni–Cr–W–Al–Si и Co–Cr–W–B в виде наплавки.

В табл. 1 представлены результаты испытаний на врезание некоторых износостойких сплавов в виде наплавки на сплав ЖС6У. Испытания проводили в паре с уплотнительным материалом КНА.

С учетом полученных результатов опробования износостойких жаропрочных сплавов дальнейшие работы по изысканию материалов для прирабатываемой пары уплотнения были направлены на создание композиционных износостойких материалов с абразивными свойствами, которые могли бы прирабатывать материал на статоре, не вызывая резкого повышения температуры, и обеспечить получение оптимального отношения износа неподвижной детали уплотнения к подвижной.

При разработке композиционных износостойких покрытий соблюдалось правило Шарпи, согласно которому материал для работы в условиях

Таблица 1

Результаты испытаний износостойких жаропрочных сплавов с серийным уплотнительным материалом КНА на врезание

Материал торца лопатки	Максимальная глубина врезания в образец истираемого материала, мм	Средний износ контртела, мм	Соотношение износов (истираемый материал/контртело)
ЖС6У (без упрочнения)	0,27	0,42	1:(1÷2)
ВЖЛ2	0,20	0,59	1:(2÷3)
X25H10B8	0,40	0,40	1:1
Ni–Cr–W–Al–Si (XH60BЮС)	0,30	0,27	(1÷2):1
Co–Cr–W–B	0,66	0,23	(2÷3):1

Результаты испытаний на врезание износостойких композиционных покрытий на основе припоя ВПр27 с уплотнительным материалом КНА

Материал торца лопатки	$P_{oc\ max}$, кг	$M_{тр\ max}$, кгс·см	$A_{тр}$, кгс·см	I_n , мм*	$I_{y.m}$, мм**
ЖС6У (без покрытия)	25	20	1200	0,42	0,27
ЖС6У+NiAl	37	18	1705	0,47	0,39
ЖС6У+Ni ₃ Al	38	16	1315	0,41	0,45
ЖС6У+NbAl ₃	40	14	1258	0,19	0,86

* I_n – износ покрытия.
 ** $I_{y.m}$ – износ уплотнительного материала.

трения должен состоять из твердых зерен, распределенных в пластинчатой массе. При таком строении давление передается на твердые зерна, имеющие невысокий коэффициент трения и не подверженные задиру.

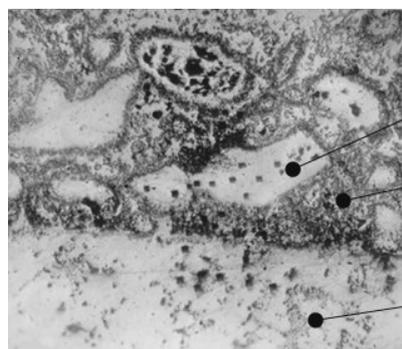
Обеспечить высокую абразивность материала возможно главным образом за счет твердых высокотемпературных достаточно крупных (не менее 60 мкм) соединений неправильной формы, имеющих режущие кромки. Частицы твердых соединений в достаточном количестве должны быть равномерно распределены по объему материала и хорошо удерживаться в нем без растрескивания и выкрашивания.

Одним из перспективных способов создания композиционных износостойких материалов может быть способ пайки в вакууме, дающий широкие возможности по созданию высокотемпературных износостойких жаростойких покрытий с режущими свойствами [15–17].

К преимуществам данного метода можно отнести:

- высокую прочность сцепления входящих в состав компонентов между собой и с основным материалом благодаря образованию прочной металлической связи в результате взаимодействия с припоем;
- возможность получения покрытий большой толщины (до нескольких миллиметров);
- сохранение исходной формы абразивных частиц с острыми режущими гранями.

Во ФГУП «ВИАМ» проведены исследования нескольких экспериментальных материалов на основе высокотемпературных никелевых припоев с диспергированными твердыми частицами. В



Интерметаллидные частицы NbAl₃
 Матрица на основе припоя ВПр27
 Подложка из сплава ЖС6У

Рис. 2. Микроструктура (×200) износостойкого композиционного покрытия ВПр27+NbAl₃

качестве матрицы опробованы припои ВПр24 и ВПр27, в которую, методом механического смешивания порошков вводили частицы карбидов (SiC, Cr₃C₇), нитридов (Si₃N₄, TiN), силицидов (MoSi₂, WSi₂), оксидов (Al₂O₃, HfO₂) и интерметаллидов (NiAl, Ni₃Al, NbAl₃).

Результаты проведенных опытов показали, что все опробованные соединения в виде карбидов, нитридов и силицидов активно взаимодействуют с расплавленными припоями, растворяясь в них.

Исследования композиционных покрытий с оксидами в качестве упрочнителей также не дали положительных результатов – отсутствовало смачивание оксидов припоями, что не позволяет получать прочное соединение.

Лучшие результаты получены при использовании композиций, состоящих из порошкообразных припоев ВПр24 и ВПр27 и частиц упрочнителей из интерметаллидных соединений NiAl, Ni₃Al, NbAl₃, обладающих высокими твердостью, жаростойкостью и температурой плавления, а также частиц карбида кремния, плакированных никелем. По результатам лабораторных исследований рабочие температуры таких покрытий могут достигать 950°С.

В табл. 2 приведены характеристики композиционных покрытий, полученные при испытаниях на врезание в уплотнительный материал марки КНА.

Из представленных в табл. 2 данных видно, что наибольшей износостойкостью обладает композиционное покрытие с матрицей на основе высокотемпературного припоя ВПр27, упрочненное частицами интерметаллидного соединения NbAl₃. Износ образцов из сплава ЖС6У, упрочненных покрытием ВПр27+NbAl₃, в 2 раза меньше, чем у образцов с другими покрытиями и сплава ЖС6У, при остальных показателях истираемости на одном уровне. Необходимо отметить, что данное износостойкое покрытие обеспечивает износ уплотнительного материала КНА почти в 2 раза больше.

Высокую износостойкость и режущие свойства композиционному покрытию придают частицы NbAl₃, прочно зафиксированные в матрице, имеющие высокую микротвердость ($H_n=1227-1681$ кгс/мм²) и острые кромки (рис. 2).

Еще одним перспективным способом получения абразивно-износостойких покрытий, позволяющим получать покрытия без изменения первоначальной геометрической формы абразивных частиц с острыми режущими гранями, является метод электроосаждения.

Метод электроосаждения позволяет наносить на поверхность деталей покрытия толщиной 100 мкм и более с равномерно распределенными абразивными частицами. Электроосаждаемые покрытия получают из суспензий, представляющих собой электролит с добавкой определенного количества дисперсного порошка (наполнителя). Основные преимущества этого способа заключаются в следующем:

- покрытия получают непосредственно на поверхности изделия и имеют заданную толщину;
- отпадает необходимость в последующей механической обработке;
- абразивные частицы не подвергаются температурному влиянию и полностью сохраняют свою исходную форму, которая получена при дроблении, – с острыми гранями, обладающими режущими свойствами;
- процесс электроосаждения не оказывает влияния на структуру материала детали.

По результатам проведенных экспериментальных исследований разработаны технологии нанесения композиционных абразивосодержащих покрытий для приработки торцов направляющих лопаток ГТД, работающих при температурах до 600°C. Опытные абразивные покрытия для роторных колец из коррозионностойких сталей и титановых сплавов представляют собой композиционные электролитические покрытия (КЭП) на основе никеля, содержащие карбид кремния или оксид алюминия с дисперсностью частиц до 120 мкм (рис. 3).

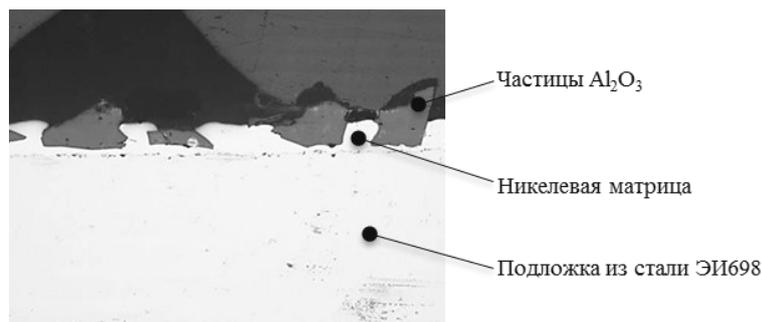


Рис. 3. Микроструктура ($\times 200$) композиционного электролитического покрытия

Абразивосодержащие композиционные покрытия, полученные методом электроосаждения на сплавах ЭИ698 и ВТ25У, испытаны на врезании с контртелом из сплавов ЭП718 и ВТ20, имитирующим лопатку направляющего аппарата компрессора ГТД. Результаты представлены в табл. 3.

Испытания показали, что меньше изнашивается покрытие Ni–Al₂O₃, содержащее дисперсные частицы размером 100–120 мкм. Уменьшение размера частиц Al₂O₃ приводит к увеличению износа КЭП в 5 раз. В случае КЭП системы Ni–SiC износ покрытия возрастает в 18 раз.

При испытании композиционных абразивных покрытий на врезании наблюдалось искрение и схватывание с контртелом. В связи с этим на поверхность КЭП наносили катодное фосфатное покрытие на основе марганца с включением графита, применение которого позволило значительно уменьшить искрение и предотвратить схватывание.

К перспективным методам получения абразивно-износостойких покрытий несомненно относятся и методы газотермического напыления [18–20].

По результатам проведенных исследований наибольший эффект, с точки зрения обеспечения необходимого комплекса свойств, а также технологических аспектов формирования защитного слоя на торцевом участке лопаток, достигается при использовании специальных детонационных покрытий. Необходимый для нормальной эксплуатации в условиях высоких рабочих температур комплекс свойств может быть обеспечен при подборе соответствующих компонентов покрытия – наполнителя и связующего.

В качестве матрицы детонационного абразивно-износостойкого покрытия исследованы высокотемпературные многокомпонентные сплавы систем легирования Ni–Cr–Al–Y, Fe–Cr–Al–Y, Co–Cr–Al–Y, Ni–Cr–Al (хромаль) и Ni–Al.

Проведенные исследования комплекса свойств выбранных связующих (металлографические исследования структуры, испытания на жаростойкость, коррозионную стойкость и исследование триботехнических характеристик) позволили отобрать материалы, наиболее перспективные для использования в качестве основного компонента детонационных абразивных покрытий с рабочими

Таблица 3

Результаты испытаний на врезание образцов с абразивными покрытиями по контртелу

Материалы пары		Износ, мм	
КЭП	контртело	КЭП	контртело
Ni–SiC+фосфат Mn+C (дисперсный SiC, 100–120 мкм), $h=250$ мкм	ВТ20	0,37	0,55
Ni–Al ₂ O ₃ +фосфат Mn+C (дисперсный Al ₂ O ₃ , 80–100 мкм), $h=250$ мкм	ЭП718	0,11	0,98
Ni–Al ₂ O ₃ +фосфат Mn+C (дисперсный Al ₂ O ₃ , 100–120 мкм), $h=250$ мкм	ЭП718	0,02	1,13

Таблица 4

Триботехнические характеристики опытных детонационных покрытий на основе системы Ni–Cr–Al с различными наполнителями

Материал покрытия	$M_{тр. ср}$, кгс·см	$A_{тр}$, кгс·см	$A_{тр, уд}$, кгс/см ²	Износ покрытия $I_{п}$, мм	Износ уплотнительного материала $I_{у.м}$, мм
TiC	15,2	1519	7110	0,46	0,57
ZrC	16	1556	2422	0,26	0,40
NbC	16,4	1684	3253	0,30	0,38
SiC	13,7	1856	2746	0,41	0,42
SiC/Ni	14	1497	1600	0,32	0,58
Al ₂ O ₃	17,9	1668	3345	0,53	0,46
ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	16,8	1676	3502	0,29	0,35
HfO ₂	12,7	1446	3352	0,14	0,55
HfO ₂ -Y ₂ O ₃	10,0	1069	2354	0,12	0,50

температурами >1000°C, – это сплавы систем Ni–Cr–Al–Y, Fe–Cr–Al–Y и Ni–Cr–Al.

В качестве твердых наполнителей разрабатываемых детонационных покрытий исследованы соединения: TiC, NbC, ZrC, SiC, SiC/Ni (карбид кремния, плакированный никелем), Al₂O₃, ZrO₂-Y₂O₃, HfO₂, HfO₂-Y₂O₃.

В табл. 4 представлены результаты исследования уровня триботехнических свойств опытных композиций покрытий при врезании (на основе системы Ni–Cr–Al). В качестве уплотнительного материала использован применяемый серийно порошковый сплав марки ЭП648.

Как показали результаты сравнительных исследований, в наибольшей степени требованиям к износостойкости детонационных защитных покрытий отвечают композиции, содержащие тугоплавкие оксиды гафния. При этом соотношения износов лопаточного и уплотнительного материала и термомеханические показатели трения также подтверждают преимущества данных композиций перед другими.

Проведенные исследования и испытания позволили разработать несколько детонационных покрытий на основе сплавов систем Ni–Cr–Al–Y, Fe–Cr–Al–Y и Ni–Cr–Al с абразивными частицами HfO₂ и ZrO₂, основные свойства которых представлены в табл. 5.

Прочность сцепления детонационных покрытий с основой, определяемая по штифтовой методике, составляет 40–60 МПа, что позволяет им работать в паре с уплотнительными материалами, характеризующимися низкой истираемостью.

Одно из преимуществ детонационных абразивно-износостойких покрытий – отсутствие механической обработки покрытия из-за необходимости сохранения шероховатости поверхности и тем самым исключение возможности снижения сопротивления усталости лопаточного материала при механической обработке.

Недостатком таких покрытий является то, что оптимальная их толщина не может превышать 300 мкм. Однако повышение общего и межремонтного ресурса часто приводит к необходимости создания толстомерных покрытий толщиной 1 мм и более. Эффективным способом создания таких материалов с необходимым комплексом свойств являются методы горячего изостатического прессования (ГИП) или горячего прессования в пресс-формах с последующим использованием технологии пайки для крепления материала (пластины) к торцу лопатки. Технологии ГИП и горячего прессования обеспечивают получение беспористого материала с максимальными прочностью и износостойкостью.

Таблица 5

Основные характеристики износостойких детонационных покрытий

Материал лопатки и покрытие	Состав покрытия	Максимальная рабочая температура, °C	Глубина врезания в уплотнительный материал, мм	Износ торца лопатки, мм	Уплотнительный материал при испытании на врезание
ЖС32 (без покрытия)	–	–	0,30	0,72	УП-34
ЖС6У (без покрытия)	–	–	0,27	0,42	КНА
ЖС6У+НХАИГ	Ni–Cr–Al–Y+HfO ₂	1100	0,45	0,19	КНА
ЖС6+ВТИМ-1	Fe–Cr–Al–Y+HfO ₂	1200	0,39	0,25	КНА
ЖС32+ВТИМ-3	Ni–Cr–Al+HfO ₂	1250	0,55	0,12	УП-34
ЖС32+ВТИМ-4	Ni–Cr–Al+ZrO ₂	1150	0,24	0,03	УП-34

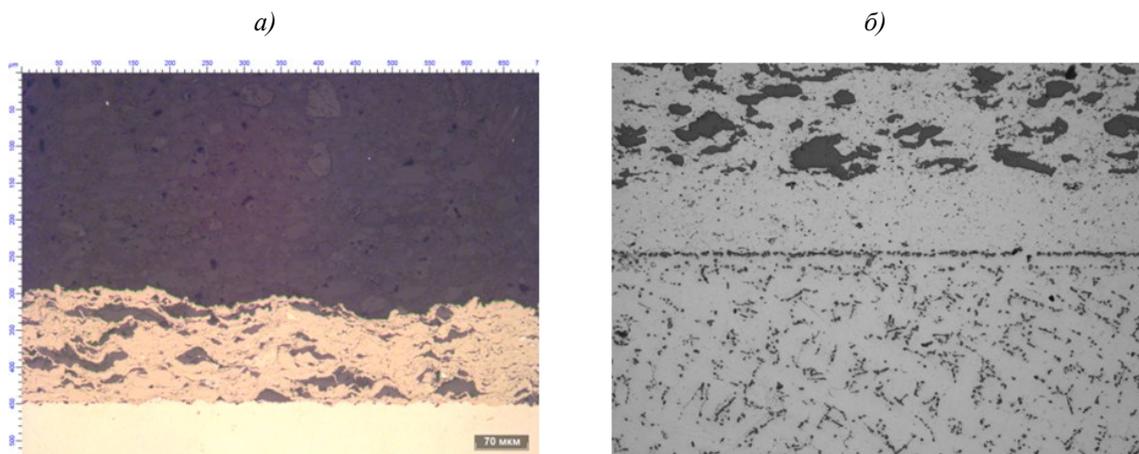


Рис. 4. Микроструктура ($\times 200$) высокотемпературных абразивно-износостойких материалов: *а* – детонационное покрытие марки НХАИГ; *б* – материал, полученный горячим прессованием

Преимуществом этого направления также является возможность равномерного распределения твердых составляющих в матрице материала с сохранением формы и размера частиц.

С использованием разработанных для детонационных покрытий составов во ФГУП «ВИАМ» разработаны технологии получения заготовок композиционного абразивно-износостойкого материала методом горячего прессования и технология его пайки с жаропрочными никелевыми сплавами, обеспечивающая надежное соединение упрочняющей пластины с торцами рабочих лопаток.

На рис. 4 представлены микроструктуры детонационного покрытия марки НХАИГ и абразивно-износостойкого материала, полученного методом горячего прессования.

Упрочнение торцов лопаток данным материалом производили методом пайки готовых пластин абразивно-износостойкого материала высокотемпературным жаропрочным припоем ВПр24, обеспечивающим прочность паяных соединений на уровне материала лопатки. Припой формирует надежное соединение композиционного износостойкого материала с прочностью более 450 МПа.

Заключения

При выполнении работ по созданию материалов для упрочнения торцов лопаток и гребешков бандажных колец, работающих по уплотнительным материалам, проведены исследования комплекса свойств целого ряда разных классов материалов и опробованы различные методы их нанесения на изнашиваемые поверхности, что позволило установить основные требования к материалам и определить оптимальные технологии получения абразивно-износостойких покрытий.

Установлено, что перспективными для упрочнения торцов и гребешков бандажных колец рабо-

чих лопаток могут быть композиционные покрытия на основе интерметаллидных соединений $NbAl_3$ и высокотемпературных припоев.

Разработано композиционное электролитическое абразивосодержащее покрытие на основе никеля с включением карбида кремния или оксида алюминия (с дисперсностью абразивных частиц 100–120 мкм). Композиционное покрытие состоит из слоя никеля толщиной 30–40 мкм и никелевого покрытия, включающего оксид алюминия или карбид кремния ($Ni-Al_2O_3$ или $Ni-SiC$) толщиной 210–220 мкм. На композиционное покрытие наносится катодное покрытие с графитом для предотвращения схватывания и уменьшения искрения.

Для работы при наиболее высоких температурах (до $1100^\circ C$ и более) разработан целый ряд детонационных абразивно-износостойких покрытий (НХАИГ, ВТИМ-1 и др.) на основе жаропрочных сплавов систем $Ni-Cr-Al-Y$, $Fe-Cr-Al-Y$ и $Ni-Cr-Al$ с абразивными частицами оксидов циркония и гафния определенного размера. Установлено, что повышение эксплуатационных характеристик данного типа покрытий возможно за счет их дополнительной лазерной обработки, а также применения технологий горячего прессования или ГИП, позволяющих получать заготовки абразивно-износостойкого материала для нанесения на торцы рабочих лопаток турбины в виде пластин толщиной до нескольких миллиметров.

Стандовые испытания упрочненных по торцу лопаток в продувочных каналах и в составе экспериментального высокотемпературного газогенератора позволили установить, что разработанные опытные абразивно-износостойкие материалы обладают высокой эрозионной стойкостью в условиях реальных ГТД и жаростойкостью в пределах допустимой для лопаточных материалов нормы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. С. 278–280.
2. Greshtha V., Tkach D., Sotnikov Ye. et al. Studing and designing improved coatings for labyrinth seals of gas-turbine engine turbines // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4/12 (94). P. 56–63.
3. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Сараев А.А., Лещев Н.Е. Истираемость и эрозионная стойкость уплотнительных материалов проточной части ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №8 (68). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
4. Wilson S. Overview of Sulzer Metco compressor and turbine abradable technology // 8th International Charles Parsons Turbine Conference. 2011. URL: <http://www.iom3.org/sites/default/files/iom3-corp/wed%200940%20s%20Wilson.pdf> (дата обращения: 14.03.2019).
5. Simms N.J., Norton J.F., McColvin G. Performance of candidate gas turbine abradable seal materials in high temperature combustion atmospheres // *Materials and Corrosion*. 2005. Vol. 56. P. 765–777.
6. Bill R.C., Ludwig L.P. Wear of seal materials used in aircraft // *Wear*. 1980. Vol. 59. P. 165–189.
7. Мигунов В.П. Материалы для уплотнения газового контура в компрессоре и турбине // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. №1. С. 165–169.
8. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Рыльников В.С., Фарафонов Д.П. Технология пайки пористо-волокнутого материала из сплава типа «фехраль» для уплотнения проточной части ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-2-2.
9. Smarsly W., Zheng N., Buchheim C.S. et al. Advanced High Temperature Turbine Seals Materials and Designs // *Material Science Forum*. 2005. Vol. 492–493. P. 21–26.
10. Davenport J.R., Mendez-Garcia L., Purkayastha S. et al. Material needs for turbine sealing at high temperature // *Materials Science and Technology*. 2014. Vol. 30. No 15. P. 1877–1883.
11. 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.
12. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
13. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
14. Фарафонов Д.П., Базылева О.А., Рогалев А.М. Сплавы для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №9 (45). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-7-7.
15. Coating forming method and coating forming material, and abrasive coating forming sheet: pat. 7063250 B2 US; field 13.05.04; publ. 20.07.06.
16. Abrasive coating and manufacture and use methods: pat. 10018056 B2 US; field 25.06.2015; publ. 10.07.18.
17. Wear-resistant coating and method for applying it: pat. 6811898 B2 US; field 01.04.03; publ. 2.11.04.
18. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // *Электрометаллургия*. 2016. №10. С. 23–38.
19. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Егорова Л.Н., Луценко А.Н., Галоян А.Г. Защитные и упрочняющие покрытия лопаток и деталей ГТД // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 107–124.
20. Александров Д.А., Артеменко Н.И. Износостойкие покрытия для защиты деталей трения современных ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №10 (46). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-6-6.