

УДК 62-762

Д.П. Фарафонов¹, В.П. Мигунов¹, А.А. Сараев¹, Н.Е. Лещев¹

ИСТИРАЕМОСТЬ И ЭРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80

Основными свойствами истираемых уплотнительных материалов, определяющими эффективность их применения в проточной части газотурбинных двигателей, являются истираемость, которая может быть представлена величиной относительного износа уплотнительного материала и материала деталей ротора, и их эрозионная стойкость, которая должна быть достаточно высокой, чтобы гарантировать работу двигателя в течение заданного ресурса. Истираемость и эрозионная стойкость определяются прочностными свойствами материалов и являются обратно пропорциональными величинами, поэтому создание эффективных истираемых уплотнительных материалов – одна из наиболее сложных и актуальных задач авиационного материаловедения. Приведены результаты исследований истираемости и эрозионной стойкости применяемых в конструкциях современных авиационных двигателей уплотнительных материалов, а также опытных материалов, разрабатываемых во ФГУП «ВИАМ».

Ключевые слова: истираемость, эрозионная стойкость, газотурбинный двигатель, уплотнительный материал, износ, продукты износа.

D.P. Farafonov¹, V.P. Migunov¹, A.A. Saraev¹, N.E. Leschev¹

ABRADABILITY AND EROSION RESISTANCE OF SEALS IN TURBINE ENGINE AIR-GAS CHANNEL

The main properties of abraded sealing materials defining efficiency of their application in flowing part of gas turbine engines, are abrasability which can be provided by relative wear of sealing material and material of rotor details, and its erosion resistance, which has to be rather high to guarantee engine operation during the set resource. Abradability and erosion resistance are defined by strength properties of materials and are inversely proportional sizes therefore creation of effective abraded sealing materials is one of the most complex and actual challenges of aviation materials science. Results of researches of abrasability and erosion resistance of modern aircraft engines of sealing materials applied in designs are given in article, and also the pilot materials developed by VIAM Federal State Unitary Enterprise

Keywords: abrasability, erosion resistance, gas-turbine engine, sealing material, wear, wear debris.

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

Одним из эффективных направлений совершенствования характеристик ГТД является уменьшение радиальных зазоров между кончиками лопаток и рабочими кольцами, а также зазоров в лабиринтных уплотнениях. Согласно проведенным в России и за рубежом исследованиям, до 5% КПД двигателя снижается за счет утечек из-за повышенных радиальных зазоров. Минимальный гарантированный зазор, при котором отсутствуют касания подвижной детали о неподвижную, определяется допусками изготовления и тепловыми деформациями деталей в процессе работы двигателя. Если

точность изготовления сопряженных деталей можно повысить улучшением культуры производства, то управление тепловыми деформациями является трудноразрешимой на практике задачей. Изменение величины зазоров в процессе работы двигателя также может быть следствием маневров самолета, перегрузок при взлете и посадке, колебаний ротора и корпуса при работе на нерасчетных режимах, скрутки ротора, деформации корпуса и др. Перечисленные факторы приводят к возникновению процессов трения между вращающимися (лопатки компрессора или турбины) и неподвижными статорными деталями. Этот процесс контактного взаимодействия, происходящий при высоких скоростях, приводит к чрезмерному повышению температуры и дополнительным нагрузкам на лопатки, что может послужить причиной их износа, а иногда и поломки контактирующих деталей. Наиболее рациональным способом устранения этих явлений является применение специальных материалов, связанных с неподвижной деталью (например, покрытия на рабочих кольцах), которые легко истираются при взаимодействии с кончиками лопаток или гребешками лабиринтов.

Эффективность применения истираемых уплотнительных материалов наиболее наглядно можно проиллюстрировать на примере двух крайних случаев контактного взаимодействия ротора и статора газотурбинного двигателя (рис. 1) [1].

В идеальном случае, когда в результате взаимодействия деталей ротора с истираемым материалом изнашивается только последний (рис. 1, б), при смещении ротора на величину δ образуется зазор с площадью

$$F = D \cdot \delta, \quad (1)$$

где D – диаметр ротора по торцам лопаток или гребешков лабиринта.

В случае, когда кольцо выполнено из абсолютно неизнашиваемого материала (рис. 1, а), при смещении ротора на величину δ в результате износа кончиков лопаток или гребешков лабиринта площадь образовавшегося зазора составит

$$F = \pi D \delta. \quad (2)$$

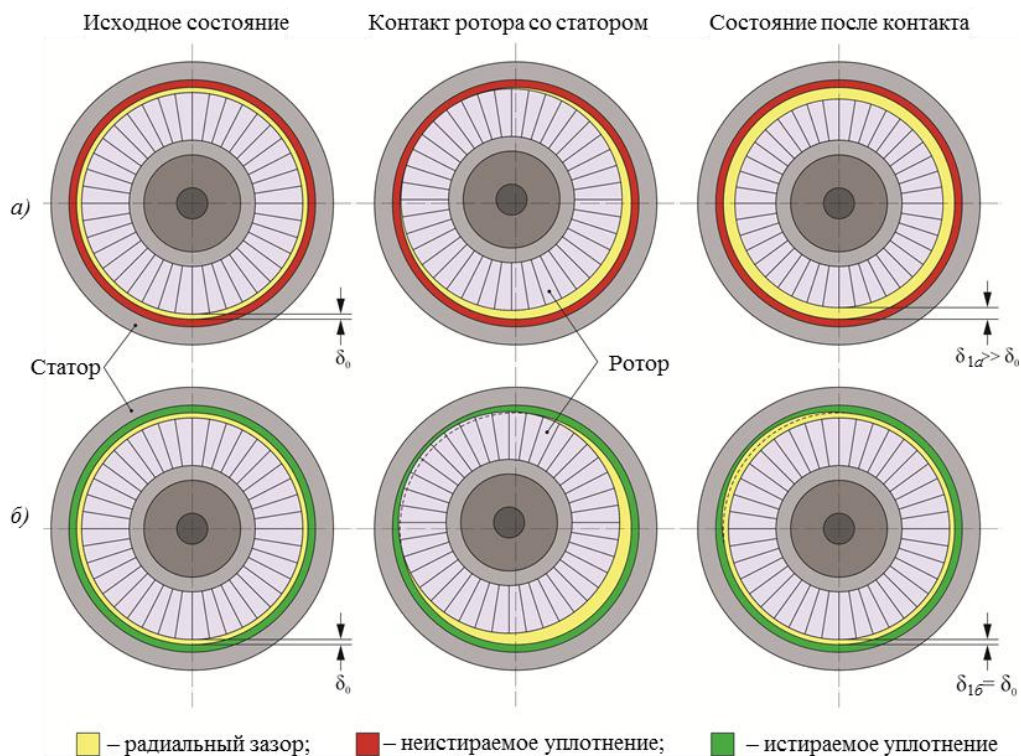


Рис. 1. Влияние истираемости уплотнения на величину радиального зазора проточного тракта ГТД в результате контактного взаимодействия ротора и статора

Поскольку расход газа прямо пропорционален площади истечения, очевидно, что утечка газа во втором случае будет приблизительно в 3 раза больше, чем в первом.

Таким образом, способность к истиранию является одним из основных требований к уплотнительным материалам. Для удовлетворения этого требования необходимо, чтобы прочность уплотнительного материала была значительно ниже прочности материала лопаток или гребешков лабиринта.

Однако прочность уплотнительного материала определяет и его эрозионную стойкость, которая должна быть достаточно высокой, чтобы гарантировать работу двигателя в течение заданного ресурса. Поскольку к прочности уплотнительного материала предъявляются два таких противоречивых требования, выбор ее величины является наиболее ответственным моментом при разработке и применении материала.

Влияние прочности уплотнительного материала на его истираемость и эрозионную стойкость показано на рис. 2. Характер этих зависимостей аналогичен для разных материалов, но количественные соотношения разные. При построении этих кривых подразумевается, что состав материала сохраняется, а прочность регулируется изменением структуры материала.

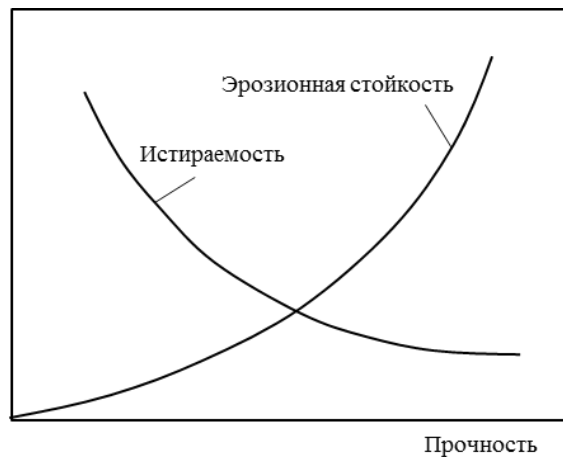


Рис. 2. Влияние прочности уплотнительного материала на его истираемость и эрозионную стойкость

Уплотнительные материалы проточной части ГТД в большинстве своем представляют композиционные материалы, имеющие матрицу и наполнители. В частном случае наполнителем могут служить поры.

Предел прочности на растяжение такого материала может быть представлен как

$$\sigma_b = \sigma_b^M \cdot (1 - v_n - v_p), \quad (3)$$

где σ_b^M – предел прочности на растяжение материала матрицы; v_n, v_p – объемная концентрация наполнителя и пор соответственно.

Разработка и выбор уплотнительного материала заключается в обеспечении прочностных характеристик, при которых истираемость и эрозионная стойкость материала соответствуют предъявляемым требованиям при заданных рабочих условиях на протяжении всего ресурса.

Решение последней задачи в первую очередь связано с обеспечением термостойкости и стойкости уплотнительного материала к окислению, т. е. при термическом расширении и сжатии прочность материала не должна снижаться за счет образования трещин, а под воздействием высокотемпературного газового потока изменение величины прочности не должно выходить из пределов, определяемых истираемостью и эрозионной стойкостью материала.

Кроме того, уплотнительный материал не должен осыпаться на границах канавок изнашивания, так как в противном случае снижается эффективность уплотнения. Частицы продуктов изнашивания не должны превышать определенный размер (0,2–0,3 мм). Более крупные частицы, попадая в зазоры между вращающейся деталью и уплотнительным материалом, могут вызвать его дополнительное разрушение.

Непрерывное совершенствование газотурбинных двигателей, направленное на повышение их эффективности, связано с увеличением давлений, скоростей и температур газового потока, что ведет к ужесточению рабочих условий для материалов ГТД, в том числе уплотнительных [2–6].

В данной статье представлены результаты исследований двух основных, наиболее противоречивых свойств уплотнительных материалов проточной части компрессора и турбины ГТД – истираемости и эрозионной стойкости. Все испытания проводились в рамках нескольких работ, посвященных исследованиям и разработке истираемых уплотнительных материалов авиационных ГТД, по комплексной научной проблеме 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, истираемые уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [7, 8].

Материалы и методы

Опыт разработки и внедрения уплотнительных материалов показывает, что основным критерием оценки их работоспособности являются результаты натуральных испытаний. Однако эти испытания длительны и дорогостоящи, поэтому возникает необходимость создания комплекса лабораторных методик, позволяющих прогнозировать работу уплотнительных материалов в двигателе и сократить число натуральных испытаний. В настоящее время разработаны методики, позволяющие оценить ряд служебных характеристик уплотнительных материалов: жаростойкость, эрозионную стойкость, истираемость и термостойкость. Исследования истираемости и эрозионной стойкости проводили по разработанной во ФГУП «ВИАМ» лабораторной методике оценки основных эксплуатационных свойств уплотнительных материалов проточной части ГТД, включающей проведение испытаний на врезание и газоабразивную (эрозионную) стойкость [9].

Метод испытания на врезание основан на измерении осевой реакции и момента трения при контактном взаимодействии материалов при их сближении на заданную величину с постоянной заданной скоростью. Испытания проводятся на смонтированной на базе испытательной машины ИМ-58 лабораторной высокоскоростной установке при торцевом трении подвижного (материал лопатки) и неподвижного (исследуемый уплотнительный материал) образцов.

С учетом того, что площадь торцов лопаточного диска составляет ~10% от ометаемой площади, на образце, имитирующем материал лопатки, предусмотрены вместо сплошного кольца шесть прямоугольных в радиальном сечении стержней площадью 3×3 мм.

Поскольку в реальных условиях в силу различных факторов износ уплотнительных материалов происходит не по всей поверхности, то для имитации этого явления предусмотрен наклон (50°) образца уплотнительного материала.

За результаты испытаний на врезание могут приниматься: величины осевой реакции и момента трения; линейный износ гребешков контртела и максимальная глубина дорожки трения уплотнительного материала; работа сил трения в течение процесса врезания; состояние поверхностей трения, определяемое визуально.

После испытаний на образце истираемого материала образуется четко выраженная дорожка трения. На гребешках контртела следы износа также выражены достаточно четко (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид образцов уплотнительных материалов и имитаторов деталей ротора после испытаний на врезание:

a – ВИПВМ900; *б* – контртело из сплава ЖС6У после испытаний в паре с ВИПВМ900; *в* – Metco 2460NS; *г* – контртело из сплава ЖС6У после испытаний в паре с Metco2460NS; *д* – АНБ; *е* – контртело из сплава ВТ20 после испытаний в паре с АНБ

Метод определения эрозионной стойкости основан на измерении потери массы исследуемого материала при обдувании его потоком твердых частиц (электрокорунд с величиной частиц 100 мкм). Испытания проводят на образцах в виде пластин размером не менее 10×10 мм, на поверхность которых через сопло лабораторной установки поступает воздух с абразивным материалом при давлении 0,5 МПа.

За эрозионную стойкость материала принимается отношение объема истраченного абразива (частиц электрокорунда) к объему унесенного им испытываемого материала:

$$\beta = \frac{V_a \cdot \gamma_m}{\Delta m}, \quad (4)$$

где V_a – объем истраченного абразива, см³; γ_m – плотность испытываемого материала, г/см³; Δm – потеря массы испытываемого образца, г.

По данным методикам проведены сравнительные исследования истираемости и эрозионной стойкости образцов уплотнительных материалов, применяемых в компрессорах и турбинах современных ГТД, а также образцов опытных уплотнительных материалов.

В настоящее время в качестве истираемых уплотнений проточной части компрессора ГТД в основном применяются материалы, представляющие композиции на органическом связующем или материалы на алюминиевой и никелевой основах с наполнителями в виде графита и нитрида бора, выполняющими роль твердой смазки. Максимальные рабочие температуры этих материалов составляют от 300 до 700°С и в основном все они характеризуются удовлетворительной истираемостью.

Наиболее сложной и актуальной задачей является разработка эффективных уплотнительных материалов для турбины ГТД в виду чрезвычайно высоких температур газа, которые постоянно увеличиваются.

Для проведения сравнительных исследований истираемости и эрозионной стойкости изготовили образцы следующих уплотнительных материалов.

1. Покрытия 20Б и УВС-2П на основе никеля с наполнителем в виде смеси нитрида бора и графита. Данные покрытия применяются в современных компрессорах ГТД при температурах до 700°C и наносятся на детали статора плазменным напылением порошков, представляющих собой смеси металлических и неметаллических компонентов.

2. Покрытие НПП-75 на основе никеля с наполнителем в виде графита. Покрытие наносится плазменным методом с применением порошка графита, плакированного никелем. Применение для плазменного напыления плакированного порошка позволяет получить уплотнительный материал, содержащий до 50% (объемн.) равномерно распределенной твердой смазки, которая должна обеспечивать высокую истираемость покрытия.

3. Плазменное покрытие Metco 313NS на основе смеси порошков алюминия и графита.

4. Плазменные покрытия АНБ и Metco 320NS с рабочими температурами до 450°C на основе алюминия с наполнителем в виде гексагонального нитрида бора.

5. Плазменное покрытие на основе алюминия и никелированного порошка нитрида бора – НИБРАН.

6. Опытные материалы на основе волокон из жаростойких сплавов ВИПВМ900 и на основе волокон с жаростойким покрытием ВИПВМ1100, истираемость которых достигается за счет высокой пористости (70–80%). Материалы наносят на статор турбины или компрессора методом пайки [10–13].

7. Керамическое плазменное покрытие Metco 2460NS на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, применяемое для уплотнений турбины ГТД. Рабочие температуры покрытий данного типа могут достигать 1200°C [14, 15].

Истираемость уплотнительных материалов исследовали в паре с образцами из сплавов, применяемых для изготовления деталей ротора компрессора (ВТ20, ЭП866) и турбины (ЖС6У) ГТД.

Результаты

Результаты испытаний уплотнительных материалов на врезание, проведенных на модернизированной машине трения ИМ-58, представлены в таблице.

Результаты испытаний уплотнительных материалов на врезание

Уплотнительный материал	Материал контртела	Максимальная глубина канавки на уплотнительном материале, мм	Линейный износ контртела, мм	Относительный износ k
АНБ	ВТ20	0,74–1,05	0,20	(4÷5):1
Metco 313NS	ВТ20	0,21–0,59	0,41	1:1
Metco 320NS	ВТ20	0,10–0,57	0,32	(1÷2):1
20Б	ЭП866	0,50–0,60	0,45	1:1
ВИПВМ900	ЖС6У	0,85–1,05	0,05	>10:1
ВИПВМ1100	ЖС6У	0,79–0,92	0,15	(5÷6):1
УВС-2П	ЭП866	0,71–0,84	0,22	3:1
НПП-75	ВТ20	0,73–0,85	0,19	4:1
НИБРАН	ВТ20	0,68–0,79	0,24	3:1
Metco 2460NS	ЖС6У	0,10–0,22	0,35	1:1

Для характеристики процесса взаимодействия кончиков лопаток или гребешков лабиринта с уплотнительным материалом при натуральных и стендовых испытаниях обычно используется величина относительного износа:

$$k=h/h_p, \quad (5)$$

где h – наибольшая глубина канавки изнашивания в уплотнительном материале (глубина внедрения); h_p – линейный износ гребешков ротора.

По этому параметру, по результатам проведенных испытаний, лучшей истираемостью (по сравнению с другими образцами) обладают материалы АНБ, ВИПВМ и НППГ-75, удовлетворительной – материалы УВС-2П и НИБРАН. Материалы Metco 313NS, 320NS, 2460NS и 20Б не являются «истираемыми», так как при их испытании на врезание линейный износ имитатора лопатки равен или превышает износ уплотнительного материала (глубину внедрения контртела).

Для всех плазменных покрытий, представляющих собой механическую смесь компонентов, наиболее вероятен механизм срабатывания, включающий пластическую и упругую деформацию, а также воздействие типа резания, при котором торец лопатки действует как режущий инструмент, а продукты приработки удаляются из зоны контакта. При испытании всех плазменных покрытий наблюдалось образование продуктов износа уплотнительного материала в виде пылевого облака (в большем или меньшем количестве). Необходимо отметить, что образующиеся продукты износа (приработки) уплотнительного материала в определенных условиях работы двигателя могут попадать в отверстия охлаждающих каналов лопаток ТВД, нарушая их охлаждение, что необходимо учитывать при выборе уплотнительного материала исходя из конкретных условий эксплуатации.

Испытания на врезание материалов Metco 2460NS и 20Б сопровождались значительным искрением и разогревом контактирующих поверхностей вплоть до образования на контртеле цветов побежалости, наблюдался перенос материала контртела на поверхность уплотнительного материала с образованием сплошной тонкой пленки по всей длине канавки (рис. 3).

Лучшей истираемостью по результатам проведенных испытаний (в сравнении со всеми другими типами уплотнений) обладают опытные материалы на основе металлических волокон из жаростойких сплавов марок ВИПВМ900 и ВИПВМ1100. Истираемость уплотнительных материалов из тонких металлических волокон достигается за счет их высокой пористости (70–80%). Механизм их срабатывания отличается от срабатывания плазменных покрытий и заключается преимущественно в пластической деформации, приводящей к уплотнению. На поверхности уплотнительного материала образуется канавка с ровными краями глубиной до 1 мм. При этом данный процесс низкоэнергичен, т. е. отсутствует эффект сильного разогрева деталей ротора при касании и связанный с этим их износ, а также явление наволакивания материала. Продукты износа при врезании контртела в высокопористые материалы как на основе только металлических волокон (ВИПВМ900), так и на основе волокон с защитным жаростойким покрытием (ВИПВМ1100), отсутствуют. Линейный износ имитаторов лопаток минимальный в сравнении с другими испытанными прирабатываемыми парами.

Внешний вид образцов уплотнительных материалов и образцов имитаторов деталей ротора после испытаний на врезание показан на рис. 3.

Относительный износ является одним из основных критериев при выборе уплотнительного материала. Чем он выше для конкретной пары материалов уплотнения и ротора, тем предпочтительней считается выбор этой пары [15]. Однако отдельные

моменты, связанные с применением относительного износа в качестве критерия, требуют уточнения.

При одновременном изнашивании ротора и уплотнительного материала выражение для площади образующегося зазора можно записать как

$$F = D\sqrt{h^2 + 2hh_p} + Dh_p \left(\pi - \arccos \frac{h_p}{h+h_p} \right). \quad (6)$$

Выбрав в качестве эталона случай идеального уплотнения, площадь зазора при котором определяется формулой (1), и разделив выражение (6) на выражение (1), получим

$$\frac{F}{D\delta} = \frac{\sqrt{h^2 + 2hh_p}}{h+h_p} + \frac{h_p}{h+h_p} \left(\pi - \arccos \frac{h_p}{h+h_p} \right). \quad (7)$$

График зависимости приведенной площади зазора $F/D\delta$ от относительного износа k , определяемый этим выражением, показан на рис. 4. Видно, что при определенной величине смещения ротора δ площадь зазора, образовавшегося в результате этого смещения, уменьшается с увеличением относительного зазора k , приближаясь к идеальному случаю, когда износ ротора отсутствует. Однако из графика также следует, что уже при $k=5$ утечки через уплотнение будут не на много больше, чем в идеальном случае. Из этого можно заключить, что стремление получить как можно больший относительный износ k , тем более за счет ухудшения других характеристик уплотнительного материала, не оправдано.

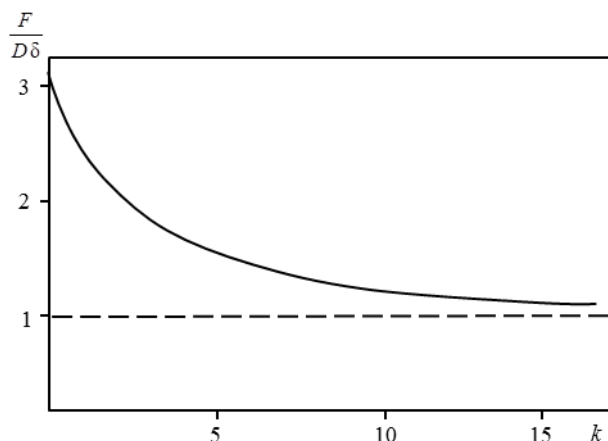


Рис. 4. Зависимость приведенной площади зазора от относительного износа

С учетом того, что истираемость уплотнительных материалов зависит от их прочности, можно было бы предположить, что материалы с высокой истираемостью (величиной относительного износа) будут обладать меньшей эрозионной стойкостью, которая, как и истираемость, определяется прочностными свойствами материалов (рис. 2). Однако по результатам проведенных испытаний уплотнительных материалов на стойкость к газообразному износу подтверждено, что характер этих зависимостей справедлив исключительно для материалов одного состава. На рис. 5 представлены значения эрозионной стойкости β и относительного износа уплотнительных материалов k .

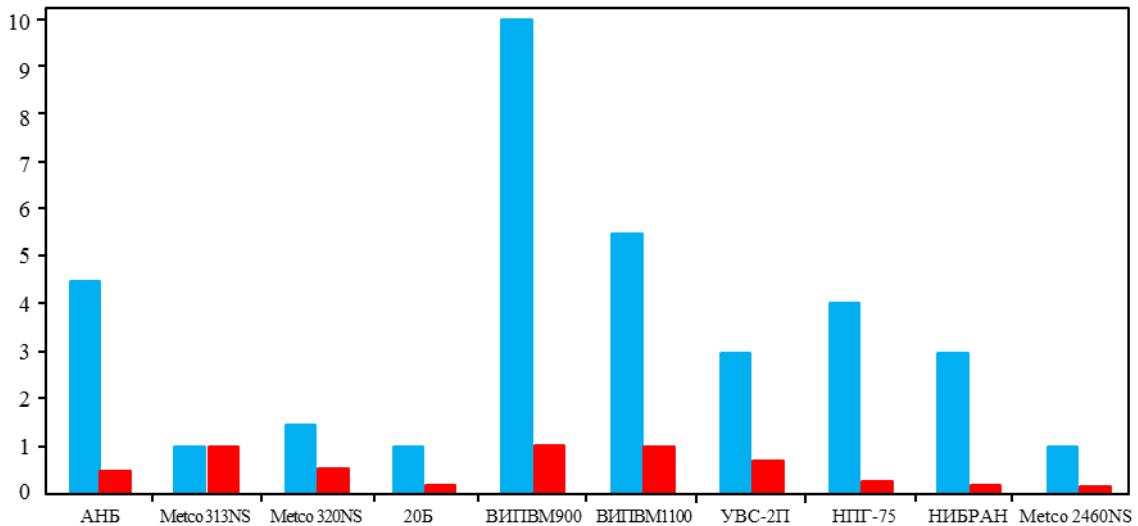


Рис. 5. Эрозионная стойкость $\beta \cdot 10^{-3}$ (■) и относительный износ k (■) уплотнительных материалов проточной части ГТД

По результатам проведенных исследований показано, что серийные уплотнительные материалы (20Б и Metco 2460NS), характеризующиеся наименьшей истираемостью, имеют минимальные значения эрозионной стойкости (не более 200). Опытные материалы ВИПВМ при своей высокой пористости и максимальной величине относительного износа ($k > 5$) имеют значительно более высокую прочность и стойкость к газоабразивному износу по сравнению со всеми типами плазменных прирабатываемых покрытий. Высокая прочность и эрозионная стойкость при очень высокой истираемости этих материалов обусловлены применением для их изготовления тонких металлических волокон с определенным соотношением их длины к толщине, обеспечивающим повышенную пластичность и высокое отношение прочности к пористости за счет образования большого количества прочных металлических контактов между отдельными волокнами при спекании пористого материала в вакууме или восстановительной среде.

Уникальное сочетание прочности и пластичности пористых материалов из металлических волокон позволяет применять их для уплотнения проточной части ГТД с нулевым установочным зазором, при исключении или сведении к минимуму износа деталей ротора и образования продуктов приработки (износа), характерного для плазменных уплотнительных покрытий, приработка которых идет преимущественно за счет срезания уплотнительного материала.

Высокий уровень эксплуатационных характеристик разработанного во ФГУП «ВИАМ» уплотнительного материала ВИПВМ900 из волокон сплава системы Fe–Cr–Al–Y подтвержден результатами эквивалентно-циклических испытаний в составе технологического двигателя на одном из предприятий Объединенной двигателестроительной корпорации.

Обсуждение и заключения

Основным критерием оценки эффективности применения уплотнительных материалов в проточной части ГТД является их истираемость, которая численно может быть представлена величиной относительного износа k или отношением линейного износа уплотнительного материала к износу ответной детали ротора, определяемого по результатам стендовых или натурных испытаний. Максимальная эффективность

применения уплотнительных материалов достигается при относительном износе 5:1 или более. Однако стремление получить как можно больший относительный износ уплотнения не всегда оправдано, так как при значениях $k > 5$ снижение потерь рабочего газа уже незначительно зависит от этой характеристики (рис. 4), кроме того, повышение истираемости уплотнительного материала может привести к ухудшению его эрозионной стойкости, также находящейся в прямой зависимости от прочностных характеристик материала, однако характер этих зависимостей справедлив исключительно для материалов одного состава, в случае, когда прочность регулируется изменением структуры.

По результатам проведенных сравнительных исследований истираемости и эрозионной стойкости серийных и опытных уплотнительных материалов проточной части ГТД показано, что не все материалы могут эффективно применяться в соответствии со своим основным функциональным назначением. Например, один из первых, разработанных более 40 лет назад, уплотнительных материалов, получаемых методом плазменного напыления, – марки 20Б имеет плохую истираемость и низкую эрозионную стойкость, тем не менее он применяется в составе многих отечественных изделий и в настоящее время. Более современные плазменные прирабатываемые покрытия АНБ, УВС-2П и НППГ-75 не уступают или превосходят по истираемости зарубежные аналоги (материалы Metco 313NS и 320NS). Материал Metco 2460NS на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, применяемый для уплотнений радиальных зазоров первых ступеней турбины ГТД при температурах до 1150°C, нельзя назвать «истираемым», так как при его контактном взаимодействии с деталями ротора больше изнашиваются последние, в то же время он имеет самую низкую эрозионную стойкость.

Материалы на основе волокон из жаростойких сплавов отличаются более высоким отношением прочности к пористости по сравнению с материалами, изготавливаемыми (напыляемыми) из порошковых композиций. По результатам лабораторных исследований и проведенных натурных испытаний материалы типа ВИПВМ обладают уникальным сочетанием хорошей истираемости и высокой эрозионной стойкости. Применение таких материалов для уплотнений радиальных зазоров проточной части ГТД позволит сократить величину утечек рабочего газа в 2–3 раза по сравнению с применением существующих серийных материалов с истираемостью (величиной относительного износа) 1:1, такими как 20Б, Metco 2460NS и др.

Повышение эффективности истираемых уплотнительных материалов возможно путем разработки и применения абразивно-износостойких покрытий для упрочнения деталей ротора, взаимодействующих со статором. Для обеспечения эффективности применения высокотемпературных материалов на основе тугоплавких оксидов, таких как Metco 2460NS, это условие является обязательным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wilson S. Overview of Sulzer Metco compressor and turbine abrasible technology // 8th International Charles Parsons Turbine Conference. 2011. University of Portsmouth. URL: <http://www.iom3.org/sites/default/files/iom3-corp/wed%200940%20s%20Wilson.pdf> (дата обращения: 14.06.2018).
2. 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.
3. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Деговец М.Л., Алешина Р.Ш. Перспективы развития и применения истираемых уплотнительных материалов из металлических волокон в проточном тракте турбины авиационных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2015. №3 (36). С. 51–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-51-59.

4. Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Алешина Р.Ш. Металлические волокна из жаростойких сплавов, легированных металлами платиновой группы // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №1 (40). С. 44–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-44-52.
5. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 26–31.
6. Simms N.J., Norton J.F., McColvin G. Performance of candidate gas turbine abra-deable seal materials in high temperature combustion atmospheres // *Materials and Corrosion*. 2005. Vol. 56. P. 765–777.
7. 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.
8. 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.
9. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П. Исследование основных эксплуатационных свойств нового класса уплотнительных материалов для проточного тракта ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С. 15–20.
10. Серов М.М., Борисов Б.В. Получение металлических волокон и пористых материалов из них методом экстракции висящей капли расплава // *Технология легких сплавов*. 2007. №3. С. 62–65.
11. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Современные полифункциональные высокотемпературные покрытия для никелевых сплавов, уплотнительных металлических волокнистых материалов и бериллиевых сплавов // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 18.06.2018).
12. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Высокотемпературные тонкопленочные покрытия для уплотнительных материалов из металлических волокон // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №1. С. 30–36.
13. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Рыльников В.С., Фарафонов Д.П. Технология пайки пористо-волоконистого 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: 15.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-2-2.
14. Fei W., Kuiry S.C., Seal S. Inhibition of Metastable Alumina Formation on Fe–Cr–Al–Y Alloy Fibers at High Temperature Using Titania Coating // *Oxidation of Metals*. 2004. Vol. 62. Issue 1–2. P. 29–44.
15. Sporer D., Refke A., Dratwinski M. et al. Increased Efficiency of Gas Turbines // *Sulzer Technical Review*. URL: http://www.sulzer.com/-/media/files/about-us/sulzer-technical-review/str-archive/2008/_2_4_sporer_e.ashx (дата обращения: 25.06.2018).