

УДК 621.775.8:621.438

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-51-59

*Д.П. Фарафонов<sup>1</sup>, В.П. Мигунов<sup>1</sup>, М.Л. Деговец<sup>1</sup>, Р.Ш. Алешина<sup>1</sup>***ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ИСТИРАЕМЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В ПРОТОЧНОМ ТРАКТЕ ТУРБИНЫ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Истираемые уплотнительные материалы из металлических волокон обладают уникальным комплексом свойств. Благодаря высокой пористости и низкой твердости они имеют высокую способность к истиранию при контактном взаимодействии торцов лопаток со статором турбины и компрессора ГТД. В то же время, при своей пористости и низкой плотности, они характеризуются высокой прочностью и газоабразивной стойкостью, необходимой для надежной работы в высокоскоростных газовых потоках. Основным направлением развития материалов из металлических волокон является повышение их стойкости к высокотемпературному окислению за счет поиска новых сплавов и защитных жаростойких покрытий. В статье приведены результаты исследований основных эксплуатационных свойств разработанных в ВИАМ истираемых уплотнительных материалов из металлических волокон, готовых к опробованию в рабочих условиях натурных ГТД, и результаты испытаний экспериментальных образцов новых материалов из волокон, которые могут быть использованы в конструкциях турбин современных и перспективных ГТД.*

**Ключевые слова:** истираемые уплотнительные материалы, металлические волокна, жаростойкость, газотурбинный двигатель.

*It is known that abrasible sealing materials made from metal fibers have a unique combination of properties. Due to high porosity and low hardness, these materials have a high abrasability in case of contact of blade tips with turbine stator and compressor of GTE. At the same time, these materials have high strength and gas-abrasive resistance necessary for reliable operation under conditions of high-speed gas flow. The main trend in development of metal fiber materials is improvement of their resistance to high-temperature oxidation due to creation of new alloys and heat-resistant coatings.*

*Main operational properties of abrasible sealing metal fiber materials developed in VIAM and experimental samples of new materials ready for tests under real operational conditions in GTE are described in this article. Test results of experimental samples of new abrasible fibrous materials, which can be used in structures of up-to-date and advanced GTE are given as well.*

**Keywords:** abrasible sealing materials, metal fibers, heat resistance, gas-turbine engine.

<sup>1</sup>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

**Введение**

Решение проблемы создания надежных уплотнительных материалов обеспечит эффективную работу газотурбинных двигателей при существенном снижении удельного расхода топлива, обусловленном минимизацией зазора между статорной и роторной частями двигателя.

Уплотнительные материалы отличаются тем, что к ним предъявляются противоречивые требования, такие как сочетание высокой истираемости и эрозионной стойкости, необходимой термостойкости. Такие материалы должны легко срабатываться при врезании в них торцов рабочих лопаток, минимально изнашивая их. Этим требованиям в большей степени соответствуют пористые материалы, изготавливаемые из тонких дискретных металлических волокон методом их прессования и спекания (рис. 1).

Разработкой истираемых уплотнительных материалов из металлических волокон начали зани-

маться в 50-х годах XX века. В частности, французской аэрокосмической исследовательской организацией Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatiale (ONERA) из металлических волокон толщиной 15 мкм, полученных путем осаждения из растворов на углеродные нити никеля, кобальта, меди и других металлов, с последующим их прессованием и спеканием, были получены уплотнительные материалы с пористостью 60–80%. Такие материалы начали применять в лабиринтных уплотнениях на двигателях Societe Turbomeca, а также на двигателе Larzac, созданном совместно фирмами Turbomeca и Snecma. Опыт эксплуатации этих материалов и результаты многочисленных исследований показали, что высокопористые уплотнительные материалы из тонких металлических волокон характеризуются наиболее высокими эксплуатационными свойствами (истираемостью, эрозионной стойкостью, твердостью и др.) по сравнению с другими уплот-

нительными материалами, благодаря чему их применение позволяет значительно минимизировать радиальные зазоры в проточном тракте ГТД между вращающимися лопатками и корпусом, не вызывая значительного износа лопаток по торцам. При этом было установлено, что для применения этих материалов при повышенных температурах требуется введение в состав волокон дополнительных элементов, таких как хром и алюминий, повышающих стойкость волокон к высокотемпературному окислению.



Рис. 1. Детали статора турбины авиационного ГТД с истираемым уплотнительным материалом из металлических волокон

В дальнейшем применение для получения тонких волокон таких технологий, как экстракция из расплава позволило получать волокна из жаростойких промышленных сплавов на основе Ni и Fe, содержащих в своем составе Cr и Al и другие легирующие элементы, однако рабочие температуры пористоволокнистых уплотнений удалось поднять лишь до 900°C, так как толщина волокон для получения наиболее эффективного по истираемости материала не должна превышать 80–100 мкм, поэтому широкого распространения эти материалы в конструкциях турбин ГТД не получили. Однако исследования по возможности повышения рабочих температур и ресурса уплотнительного материала на основе металлических волокон не прекращаются, так как по уровню истираемости он не имеет аналогов и превосходит существую-

щие высокотемпературные уплотнительные материалы более чем в 3 раза. В основном все исследования направлены на поиск сплавов для получения волокон с большей жаростойкостью (из числа известных) и разработку тонких защитных покрытий [1–6].

Стойкость волокон к высокотемпературному окислению во многом зависит от прочности и защитных свойств оксидного слоя, образующегося на их поверхности.

Наиболее жаростойкими промышленными сплавами являются сплавы на основе систем Ni–Cr–Al, Fe–Cr–Al, Co–Cr–Al и сплавы на основе интерметаллидов NiAl и Ni<sub>3</sub>Al, на поверхности которых при их высокотемпературном окислении образуется плотная пленка, преимущественно состоящая из стабильной фазы оксида алюминия –  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, препятствующая проникновению кислорода к поверхности металла и его дальнейшему окислению. Интерметаллидные сплавы типа ВКНА, разработанные в ВИАМ, благодаря повышенному содержанию алюминия имеют исключительную стойкость к высокотемпературному окислению, позволяют получать волокна, стойкие к окислению при температурах >1000°C, однако изготовление из них истираемого уплотнительного материала методами порошковой металлургии (прессование в пресс-формах с последующим спеканием) затруднено из-за низкой пластичности таких сплавов, приводящей к охрупчиванию полученных из них волокон при прессовании. По этим причинам наибольшее распространение для получения волокон и истираемого уплотнительного материала из них получили сплавы на основе системы Me–Cr–Al (где Me: Fe, Ni или Co). Такие сплавы при их дополнительном легировании редкоземельными металлами (РЗМ) позволяют изготавливать волокна и уплотнения, работоспособные до температур 900–1000°C [2].

Положительное влияние РЗМ на стойкость к высокотемпературному окислению волокон из сплавов на основе системы Me–Cr–Al заключается в повышении адгезии и защитных свойств образующейся на их поверхности оксидной пленки.

Основные микролегирующие элементы, обеспечивающие улучшение адгезии оксидной пленки при изотермическом и циклическом окислении сплавов системы Me–Cr–Al, – это Hf, La, Ce, Zr, Y, Yb, Th, Er [7]. При этом сплавы, содержащие в своем составе Y и Hf в количестве <1%, как правило, стойки к окислению при более высоких температурах.

Наиболее полно влияние Y изучено применительно к сплавам системы Fe–Cr–Al–Y. Сплавы данного типа на основе Fe характеризуются стойкостью к окислению при более высоких температурах в сравнении со сплавами систем Ni–Cr–Al–Y и Co–Cr–Al–Y. По некоторым данным иттрий в сплаве системы Fe–25Cr–4Al–0,5Y присутствует в составе интерметаллидной фазы (Fe, Cr)<sub>4</sub>(Al, Y)

различных форм и размеров. При окислении сплава в сухом кислороде при температурах 1100–1200°C происходит образование столбчатого мелкозернистого  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,5–1 мкм), рост которого преимущественно происходит за счет кислорода, перемещающегося по границам зерен. Интерметаллидная фаза при внедрении в оксидный слой переходит в  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , а хром и железо из интерметаллидной фазы диффундируют в металлическую матрицу. Фаза  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  насыщает слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  иттрием, который собирается на границах оксидных зерен. Улучшение адгезии оксидного слоя за счет добавления иттрия является следствием образования мелкозернистого слоя, в котором нагрузки при росте оксида могут быть снижены в результате диффузионной пластической деформации. Более того, итрий сдерживает перемещение Al в оксидный слой и предотвращает зарождение зерен  $\text{Al}_2\text{O}_3$  внутри этого слоя, приводящее к образованию напряжений в окалине [8–11].

Наибольшей рабочей температурой среди промышленных сплавов системы Fe–Cr–Al характеризуются дисперсноупрочненные сплавы с оксидным упрочнением. В качестве упрочняющих частиц в таких сплавах чаще всего используют искусственно введенные оксиды  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Основное применение такие сплавы нашли в аэрокосмической промышленности и ядерной энергетике. Дисперсноупрочненные сплавы системы Fe–Cr–Al по прочности уступают никелевым суперсплавам, но имеют исключительную стойкость к окислению при температурах >1000°C, высокие стойкость к сульфидной коррозии и пластичность.

Максимальная заявленная производителем температура применения коммерческого дисперсноупрочненного сплава APM фирмы Kanthal AB (Швеция), получаемого методом порошковой металлургии, с основой, аналогичной основе сплава Kanthal A-1, составляет 1425°C, что на 25°C выше, чем для выплавляемого сплава A-1.

Европейскими организациями MTU Aero Engines GmbH (Германия), AVIO S.P.A. (Италия), Rolls-Royce plc (Великобритания), Fraunhofer Institut IF AM (Германия), Siemens Industrial Turbines Ltd. (Великобритания) и др. в рамках совместного проекта «ADSEALS» в 1999–2005 гг. проведены широкие исследования различных материалов для применения их в качестве истираемых уплотнений нового поколения. В частности, проведено сравнение эксплуатационных характеристик материалов из металлических волокон и сот из сплавов на основе системы Fe–Cr–Al, таких как Aluchrom YHf, Haynes 230, PM2000, PM2Hf, а также пористых керамических материалов. По основным результатам проведенных исследований видно, что по истираемости наибольшей эффективностью обладают материалы из металлических волокон, а сплавы на основе системы Fe–Cr–Al превосходят по жаростойкости в интер-

вале температур 700–1200°C сплавы на никелевой основе, применяемые для изготовления серийных тонкостенных сотовых уплотнений. Наибольшую жаростойкость имели сплавы, дисперсноупрочненные частицами оксида иттрия, PM2000 и PM2Hf, однако материалы, полученные из них, имели худшую истираемость, так как лопатки или гребешки на торцах лопаток изнашивались абразивными дисперсными частицами, находящимися в составе сплавов [3, 4].

Для сплавов системы Ni–Cr–Al одним из наиболее эффективных легирующих элементов является Hf. Роль гафния схожа с ролью иттрия в сплавах системы Fe–Cr–Al – это улучшение адгезии пленки из  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и снижение скорости роста окалины за счет торможения диффузии алюминия и кислорода по границам оксидных зерен. Установлено, что наличие 0,05% Hf в составе алюминидных жаростойких покрытий на порядок уменьшает скорость роста окалины в сравнении с чистым  $\beta$ -NiAl [12].

Еще одним способом повышения стойкости материалов из металлических волокон к высокотемпературному окислению является разработка защитных покрытий и технологий их нанесения на волокна.

Исследовательскими организациями AMRAC и MMAE (США) разработан способ повышения жаростойкости металлических волокон из сплава системы Fe–Cr–Al–Y путем нанесения на поверхность волокон покрытия из оксида титана, которое способствует торможению образования метастабильных фаз  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и образованию чистого стабильного защитного слоя  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Жаростойкость таких волокон значительно повышается при температурах >900°C [1].

Большой потенциал для создания волокон и высокотемпературного уплотнительного материала из них могут представлять сплавы, легированные металлами платиновой группы, исследованием которых занимаются в основном в США и Японии [11, 13–15].

В ВИАМ более 10 лет проводятся работы по созданию высокоэффективных истираемых уплотнительных материалов из металлических волокон. Разработаны материалы из волокон сплавов систем Ni–Cr–Al, Ni–Cr–Al–Y и Fe–Cr–Al–Y, полученных совместно с МАТИ на установке экстракции висящей капли расплава. Для повышения рабочей температуры истираемого уплотнительного материала на основе металлических волокон до 1100°C разработаны жаростойкое керамическое покрытие системы SiC–SiO<sub>2</sub> и технология его нанесения, позволяющие защищать поверхность волокон во всем объеме материала [6, 15–19]. Проводятся работы по технологическому опробованию принципиально нового для отечественных конструкторов истираемого уплотнительного материала из металлических волокон и исследование возможности повышения стойкости

к высокотемпературному окислению тонких металлических волокон путем применения для их изготовления новых жаростойких сплавов и защитных покрытий.

### Материалы и методы

В статье приведены результаты исследований основных эксплуатационных свойств разработанных в ВИАМ истираемых уплотнительных материалов из волокон жаростойких сплавов систем Ni–Cr–Al, Ni–Cr–Al–Y, Fe–Cr–Al–Y и Fe–Cr–Al–Y с защитным жаростойким покрытием, а также новых материалов из волокон сплавов на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al. Приведены данные сравнительных испытаний стойкости к высокотемпературному окислению сплавов, легированных металлами платиновой группы, которые могут быть использованы для изготовления волокон с максимально высокими рабочими температурами. Исследования проводились в рамках нескольких научно-исследовательских работ по ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002–2010 гг. и на период до 2015 г.», направленных на разработку новых эффективных истираемых уплотнительных материалов и технологий их нанесения (пайки) на детали статора турбины авиационных ГТД.

Основными эксплуатационными свойствами истираемых уплотнительных материалов являются их истираемость, эрозионная (газообразивная) стойкость, жаростойкость и термостойкость.

Технологическая схема изготовления истираемых материалов из металлических дискретных волокон заключается в укладке волокон в стальные пресс-формы с использованием вибрационного воздействия на пресс-форму, прессовании на гидравлическом прессе и спекании в вакуумных печах. Нанесение уплотнительных материалов из металлических воло-

кон на статорные детали ГТД возможно методом высокотемпературной вакуумной пайки [20].

Одним из основных требований к уплотнительным материалам является способность к истиранию при контактном взаимодействии. Соотношение износов вращающихся и неподвижных деталей является одним из критериев выбора уплотнительных материалов, что вызывает необходимость определения истираемости при разработке новых материалов.

Испытания на истираемость и эрозионную стойкость проводили на лабораторных установках по разработанным в ВИАМ методикам, позволяющим проводить быстрые сравнительные испытания уплотнительных материалов на стадии их разработки. Методика испытаний на истираемость (врезание) основана на измерении износа при контактном взаимодействии образца уплотнительного материала и вращающегося образца имитатора лопатки при их сближении на заданную величину с заданной скоростью. Испытания проводили на смонтированной на базе испытательной машины ИМ-58 лабораторной высокоскоростной установке при торцевом трении подвижного (материал лопатки) и неподвижного (исследуемый уплотнительный материал) образцов (рис. 2). За результат испытаний принимается соотношение среднего значения линейного износа уплотнительного материала к максимальному износу контртела.

Метод определения эрозионной стойкости основан на измерении потери массы исследуемого материала при обдувании его скоростным потоком воздуха с взвешенными в нем твердыми абразивными частицами. Газообразивная стойкость определяется как отношение объема истраченного абразива к объему унесенного им испытываемого материала:

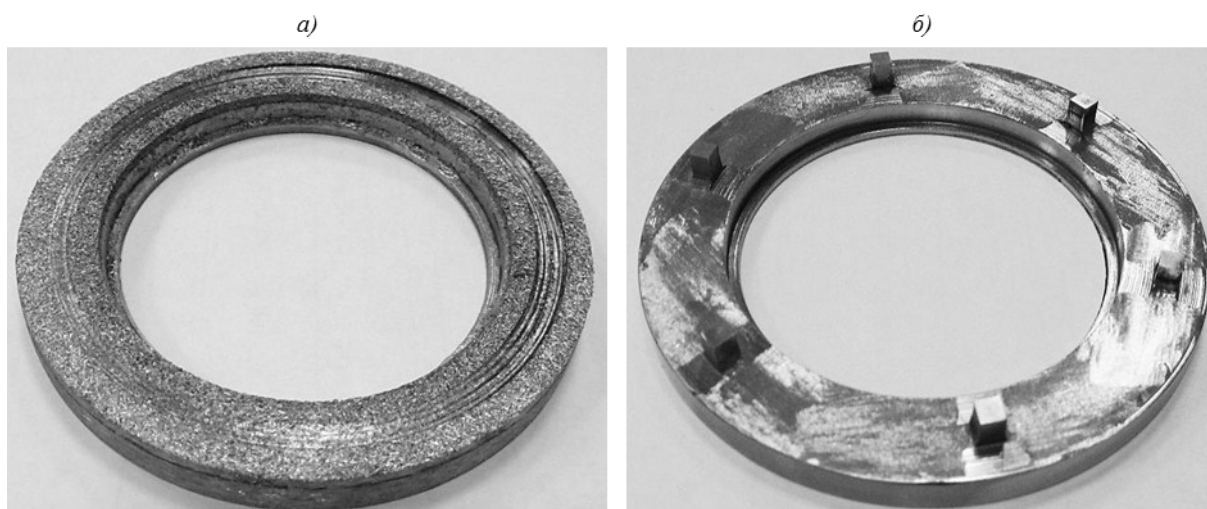


Рис. 2. Образцы после испытаний на врезание:

*а* – истираемый уплотнительный материал из металлических волокон; *б* – контртело из сплава для лопатки

$$\beta = \frac{V_a \cdot \gamma_m}{\Delta m},$$

где  $V_a$  – объем истраченного абразива, см<sup>3</sup>;  
 $\gamma_m$  – плотность испытываемого материала, г/см<sup>3</sup>;  
 $\Delta m$  – потеря массы испытываемого образца, г.

Характерной особенностью уплотнительных материалов проточного тракта ГТД является их сильно развитая поверхность вследствие высокой пористости. Пористость материалов из дискретных металлических волокон может достигать 80–85% (рис. 3).

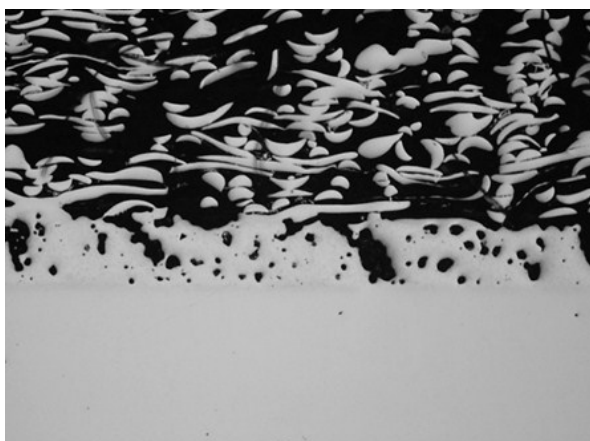


Рис. 3. Истираемый уплотнительный материал из металлических волокон, напаянный на подложку (статор турбины ГТД) ( $\times 50$ )

Площадь поверхности данных материалов количественному определению практически не поддается. Поэтому существующие методы оценки жаростойкости к этим материалам не применимы.

Методика определения жаростойкости уплотнительного материала основана на определении относительного изменения массы образца при воздействии на него температуры в течение определенного промежутка времени в присутствии воздуха. Термостойкость характеризует способность материала сохранять прочность и форму деталей при теплосменах.

Метод определения термостойкости заключается в определении количества рабочих теплосмен, приводящих к разрушению материала. Под рабочей теплосменой подразумевается цикл нагрева материала до заданной температуры с последующим охлаждением его до температуры окружающей среды. При этом скорость нагрева и скорость охлаждения во всех экспериментах сохраняется одинаковой. За показатель термостойкости при исследовании принимается число теплосмен до начала образования ясно различимых невооруженным глазом трещин.

### Результаты

Результаты испытаний на врезание (истираемость) всех исследуемых уплотнительных материалов из металлических волокон в паре с контртелом из сплава ЖС26 для лопаток показали, что материал из металлических волокон характеризуется очень высокой истираемостью (в среднем до 10:1 и более). При контактом взаимодействии образцов выкрашивание уплотнительного материала отсутствует и не происходит наволакивания уплотнительного материала на образец контртела; почти не наблюдается свечения, характерного для взаимодействия металлических материалов при высокоскоростном трении, при их перегреве. Глубина образующейся при испытании канавки за счет уплотнения пористого материала при врезании контртела может достигать 1 мм при износе контртела не более 0,1 мм (см. рис. 2).

Применение защитного керамического покрытия на волокнах несколько отрицательно сказывается на истираемости материала: соотношение среднего линейного износа уплотнительного материала к износу контртела в этом случае составляет от 3:1 до 5:1. Тем не менее уплотнительный материал на основе волокон Fe–Cr–Al–Y с жаростойким покрытием превосходит по истираемости большинство известных материалов и находится на уровне лучших по данному показателю применяемых в серийном производстве уплотнений (АНБ, УВС-2П), превосходя их по уровню эрозионной стойкости и максимальной рабочей температуре.

В аналогичных условиях в ВИАМ были проведены испытания современного зарубежного керамического материала, применяемого в качестве истираемого уплотнения первых ступеней турбины ГТД с рабочей температурой до 1200°C. Результаты этих испытаний показали, что материал имеет абразивные свойства и фактически не является истираемым (износ контртела составил до 0,4 мм при истираемости около 1:1), поэтому применение материалов такого класса в качестве уплотнений радиальных зазоров турбины обуславливает необходимость разработки и применения специальных износостойких покрытий для торцов лопаток, что является достаточно сложной задачей. На рис. 4 представлены испытанные образцы керамического уплотнительного материала и контртела из сплава ЖС26. На контртеле (площадке, имитирующей торец лопатки) видны следы значительного износа.

По уровню эрозионной стойкости, которая определялась по приведенной методике, истираемые уплотнительные материалы из металлических волокон также превосходят все керамические уплотнительные материалы и покрытия не менее чем в 1,5 раза, что позволяет прогнозировать отсутствие газоабразивного износа уплотнений из металлических волокон при их эксплуатации в составе авиационных ГТД.

В связи с выявленным снижением истираемости уплотнительного материала из металлических волокон с жаростойким покрытием, защищаю-





Рис. 4. Образцы после испытаний на врезание:

*а* – керамический истираемый уплотнительный материал; *б* – контртело из сплава для лопатки

щим волокна от высокотемпературного окисления, в ВИАМ была проведена работа по поиску новых высокотемпературных сплавов, позволяющих получать волокна, работоспособные при температурах  $>1000^{\circ}\text{C}$ , без использования защитных покрытий. Совместно с МАТИ были получены волокна из новых интерметаллидных сплавов на основе  $\text{Ni}_3\text{Al}$  [21–24].

Попытки получения волокон для изготовления истираемого уплотнительного материала из интерметаллидных сплавов на основе  $\text{NiAl}$  и  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , обладающих высокой стойкостью к окислению (в основном благодаря повышенному содержанию алюминия), проводились и ранее, однако получить волокна, обладающие необходимой технологической пластичностью, не удавалось.

В результате выполненной работы было установлено, что наибольшей жаростойкостью в интервале температур  $1100\text{--}1300^{\circ}\text{C}$  обладают волокна из нового интерметаллидного сплава системы  $\text{Ni-Al-Co-Re-Ti}$ , однако они показали нулевую пластичность. Оптимальным соотношением жаростойкости и пластичности обладают волокна из сплава типа ВКНА-4У.

Пластичность волокон из сплава  $\text{Ni-Al-Co-Re-Ti}$  удалось повысить за счет высокотемпературного вакуумного отжига, способствующего росту зерен и изменению фазового состава. Установлено, что удовлетворительную технологическую пластичность после отжига имеют волокна, диаметр которых  $<80$  мкм.

Из волокон сплавов типа ВКНА-4У и системы  $\text{Ni-Al-Co-Re-Ti}$  были изготовлены экспериментальные образцы уплотнительного материала с

пористостью  $>60\%$ , исследования которых подтвердили, что применение этих волокон обеспечивает возможность создания высокоэффективного уплотнительного материала с рабочей температурой  $>900^{\circ}\text{C}$ , а при использовании защитных покрытий на поверхности отожженных в вакууме волокон из сплава системы  $\text{Ni-Al-Co-Re-Ti}$  рабочая температура может достигать  $1300^{\circ}\text{C}$ , что делает возможным применение таких уплотнений в конструкциях перспективных авиационных ГТД.

В табл. 1 представлены основные эксплуатационные свойства истираемых уплотнительных материалов из металлических волокон жаростойких сплавов, разработанных в ВИАМ.

Большой потенциал для разработки дискретных волокон и высокотемпературного уплотнительного материала из них могут представлять жаростойкие сплавы, легированные металлами платиновой группы (МПП).

Такие сплавы могут иметь исключительно высокую стойкость к высокотемпературному окислению и выгодно отличаются от интерметаллидных сплавов по уровню пластичности.

В ВИАМ начаты исследования по поиску таких сплавов и разработке технологии получения из них волокон для истираемого уплотнительного материала с рабочей температурой до  $1400^{\circ}\text{C}$  для применения в турбинах перспективных ГТД. Выплавлены экспериментальные сплавы систем  $\text{Fe-Cr-Al}$  и  $\text{Ni-Cr-Al}$ , легированные МПП ( $\text{Pt}$  и  $\text{Ir}$ ), проведены сравнительные испытания их жаростойкости.

На рис. 5 приведены полученные по результатам проведенных испытаний графические зависи-

Таблица 1

Свойства уплотнительных материалов на основе металлических волокон

Свойства	Значения свойств волокон					
	Ni-Cr-Al	Ni-Cr-Al-Y	Fe-Cr-Al-Y	Fe-Cr-Al-Y с покрытием системы SiC-SiO <sub>2</sub>	ВКНА-4У	Ni-Al-Co-Re-Ti
Рабочая температура, °C	700	800	900	1100	1000	1100
Плотность, г/см <sup>3</sup>	≤1,8			≤2,2	≤3,2	≤3,0
Пористость, %	≥70				≥60	≥60
Жаростойкость (привес после 100 ч при T <sub>раб</sub> ), %	≤0,4	≤0,5	≤0,7	≤1,5	≤5,0	≤5,0
Эрозионная стойкость β	≥1000					
Термостойкость – число циклов T <sub>раб</sub> ± 20°C без видимых разрушений образца	Не менее 100					
Истираемость – соотношение износов уплотнительного материала и образца-имитатора лопатки	Не менее 10:1			(3–5):1	Не менее 10:1	

мости изменения массы образцов серийного жаростойкого сплава на основе системы Fe–Cr–Al марки X23Ю5 и экспериментального сплава с такой же основой, легированного платиной в количестве 0,5% (по массе). Испытания проводили при выдержке образцов в воздушной атмосфере при температуре 1300°C. Видно, что дополнительное легирование жаростойкого сплава системы Fe–Cr–Al небольшим количеством платины положительно влияет на его стойкость к окислению при 1300°C.

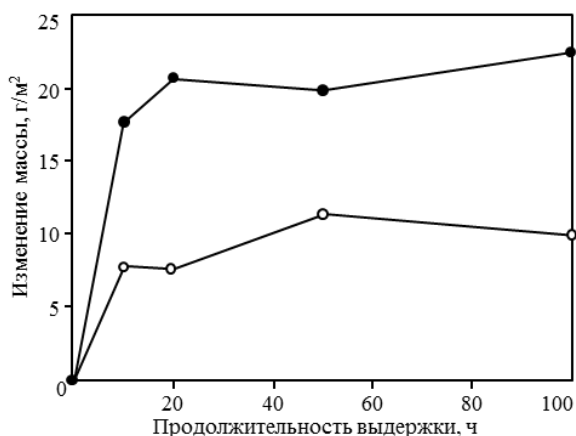


Рис. 5. Изменение массы сплавов систем Fe–Cr–Al (●) и Fe–Cr–Al–0,5Pt (○) при 1300°C

Исследования, направленные на поиск жаростойких сплавов, легированных металлами платиновой группы, разработку технологий получения из них волокон и высокотемпературного уплотнительного материала, будут продолжены, так как,

несмотря на высокую стоимость МПГ, экономическая эффективность от разработки и применения истираемого уплотнительного материала из металлических волокон в турбинах современных и перспективных авиационных ГТД, достигаемая за счет снижения удельного расхода топлива благодаря эффективному уменьшению величины радиальных зазоров между ротором и статором (без износа рабочих лопаток по торцам), будет ощутима.

#### Обсуждение и заключения

В результате проведенных в ВИАМ исследований экспериментально подтвержден высокий уровень эксплуатационных свойств истираемых уплотнительных материалов из металлических волокон. Разработан ряд материалов из волокон жаростойких сплавов, которые по истираемости и эрозионной стойкости превосходят все известные уплотнительные материалы.

В табл. 2 приведены свойства серийных истираемых уплотнительных материалов, отличающихся наибольшей истираемостью (АНБ, УВС-2П) и рабочими температурами (зарубежный керамический материал из оксида циркония), применяемых в современных авиационных ГТД, и свойства разработанного в ВИАМ материала из волокон сплава системы Fe–Cr–Al–Y. Значения получены при испытаниях по разработанной в ВИАМ методике.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что наиболее остро ощущается необходимость в создании истираемого уплотнительного материала для первых ступеней ГТД, где температура газового потока может достигать 1200–1250°C и еще больших значений – для перспективных дви-

Таблица 2

Свойства истираемых уплотнительных материалов различного класса

Свойства	Значения свойств истираемого уплотнительного материала				
	АНБ	УВС-2П	пористого керамического типа RT-180	из волокон системы Fe–Cr–Al–Y	
				без покрытия	с покрытием
Максимальная рабочая температура, °С	450	700	1200	900	1100
Истираемость	5:1	3:1	1:1	10:1 или более	(3–5):1
Эрозионная стойкость $\beta$	400–550	$\geq 700$	$\geq 500$	$\geq 1000$	
Метод получения	Плазменное напыление порошковой смеси Al и BN	Газопламенное напыление порошковой смеси на основе Ni	Плазменное напыление порошка ZrO <sub>2</sub>	Вакуумная пайка заготовок из волокон	Вакуумная пайка заготовок из волокон с последующим нанесением покрытия

гателей. Материалов, обладающих высокой истираемостью и эрозионной стойкостью в этих условиях, пока не создано. Так, истираемость современных зарубежных керамических материалов на основе оксида циркония составляет в среднем 1:1 при износе торца лопатки до 0,4 мм и более, поэтому для эффективной работы таких уплотнений необходимо разрабатывать износостойкие покрытия для рабочих лопаток и технологии их нанесения.

С начала 70-х годов XX века наиболее широко в уплотнениях турбин современных отечественных ГТД применяются металлические сотовые конструкции, работающие при температурах до 1100–1200°С, изготавливаемые в основном из жаростойкой хромоникелевой фольги.

С помощью сотовых уплотнений можно существенно уменьшить величину радиального зазора. Однако сотовое уплотнение вызывает дополнительные потери в рабочем колесе, обусловленные главным образом пульсациями давления газа в ячейках уплотнения. При одинаковой величине радиального зазора эффективность турбины с сотовым уплотнением ниже, чем турбины с гладким уплотнением. Кроме того, в тяжелых условиях работы турбины сотовые уплотнения часто деформируются и прогорают [25].

Полученные результаты сравнительных лабораторных исследований позволяют сделать вывод, что разработанные в ВИАМ материалы из дискретных металлических волокон не имеют аналогов по уровню эксплуатационных свойств и могут эффективно применяться при температурах до 1100°С и выше при использовании защитных жаростойких покрытий.

Необходимым этапом перед внедрением в серийное производство этих материалов является проведение испытаний непосредственно в рабочих условиях натуральных ГТД, что позволит в полной мере определить работоспособность принципиально новых истираемых уплотнений и эффективность их применения на переходных режимах работы ГТД.

Несомненно, что истираемые уплотнительные материалы из металлических волокон будут иметь большие перспективы в случае решения проблемы их высокотемпературного окисления при экстремально высоких температурах в турбинах перспективных ГТД. По предварительным результатам начатых в ВИАМ исследований видно, что решение этой проблемы возможно путем применения для получения волокон пока еще мало изученных сплавов, легированных металлами платиновой группы. Целесообразно продолжать исследования в этом направлении, так как эффективность и рабочие характеристики ГТД находятся в прямой зависимости от величины зазоров в уплотнениях газового тракта. Кроме того, с повышением рабочих температур газа, что неизбежно при разработке перспективных ГТД, для обеспечения работоспособности элементов уплотнения зазора в турбине придется использовать все большее количество охлаждающего воздуха, отбираемого после последних ступеней компрессора, а выдув высокоэнергетического воздуха в проточную часть неизбежно ведет к снижению КПД турбины и ГТД в целом. При этом величины требуемых расходов охлаждающего воздуха зависят от допустимых температур материалов истираемого уплотнения.



## ЛИТЕРАТУРА

1. 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. V. 62. №1–2. P. 29–44.
2. Leprince G., Alperine S., Vandenbulke L., Walder A. New high temperature-resistant NiCrAl and NiCrAl+Hf felt materials. Part 2 //Materials Science and Engineering: A. 1989. V. 120–121. P. 419–425.
3. Smarsly W., Zheng N., Buchheim C.S. et al. Advanced High Temperature Turbine Seals Materials and Designs //Material Science Forum. 2005. V. 492–493. P. 21–26.
4. 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. V. 56. P. 765–777.
5. Solntsev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. SiC–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–SiO<sub>2</sub> high temperature coatings for metal fibers sealing materials //Glass and ceramics. 2011. V. 68. №5–6. P. 194–196.
6. 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. 2013. №1. Ст. 5 (materialsnews.ru).
7. Абраимов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. М.: Машиностроение. 1993. 336 с.
8. Nychka J.A., Clarke D.R. Quantification of Aluminum Outward Diffusion During Oxidation of FeCrAl Alloys //Oxidation of Metals. 2005. V. 63. №5–6. P. 324–352.
9. Clemendot F., Gras J.M., van Duysen J.C. Influence of yttrium on high temperature behavior of Fe–Cr–Al–Y alloys //J. Phys. IV France. 1993. V. 3. P. 291–299.
10. Mennicke C., Schumann E., Ruhle R.J. et al. The Effect of Yttrium on the Growth Process and Microstructure of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on FeCrAl //Oxidation of Metals. 1998. V. 49. №5–6. P. 455–466.
11. Amano T. High-temperature oxidation of FeCrAl (Y, Pt) alloys in oxygen-water vapour //Materials at high temperatures. 2011. V. 28. №4. P. 342–348.
12. Pint B.A., Haynes J.A., More K.L. et al. Composition-effects on Aluminide Oxidation Performance: Objectives for Improved Bond Coats //ASM-TMS Superalloys–2000, Seven Springs, PA, Sept. 2000.
13. Amano T., Takezawa Y., Shiino A., Shishido T. Surface morphology of scale on FeCrAl (Pd, Pt, Y) alloys //Journal of alloys and Compounds. 2008. V. 452. №1. P. 16–22.
14. Amano T. High-temperature oxidation resistance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-forming heat-resisting alloys with noble metal and rare earth additions //Materials and Corrosion. 2011. V. 62. №7. P. 659–667.
15. Ballard D.L., Plichak A.L. The use of Precious-metal-modified Nickel-based Superalloys for Thin Gage Applications //JOM. 2010. V. 62. P. 45–47.
16. 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.
17. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Ступина Т.И. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 94–97.
18. 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.
19. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л. Истираемый уплотнительный материал на основе волокон из медных сплавов //Труды ВИАМ. 2014. №9. Ст. 04 (viam-works.ru).
20. 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. 2014. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).
21. Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Серов М.М. Исследование свойств и технологических параметров получения металлических волокон для истираемых уплотнительных материалов авиационных ГТД //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 02 (viam-works.ru).
22. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Литейные конструкционные сплавы на основе алюминиды никеля //Двигатель. 2010. №4. С. 24–25.
23. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б. и др. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al //Металлы. 1999. №1. С. 58–65.
24. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Сплавы на основе алюминидов никеля //МиТОМ. 1999. №1. С. 32–34.