

УДК 66.017:621.775.8

Д.П. Фарафонов¹, В.П. Мизунов¹

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОРИСТОВОЛОКНИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И УПЛОТНЕНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-2-2

Представлены основные результаты исследований разрабатываемых во ФГУП «ВИАМ» высокотемпературных материалов на основе металлических волокон, предназначенных для применения в качестве принципиально новых истираемых уплотнений проточного тракта газотурбинных двигателей и элементов звукопоглощающих конструкций.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, истираемые уплотнительные материалы» и 15.7. «Металлические пористоволокнистые материалы для звукопоглощающих конструкций» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Ключевые слова: *металлические волокна, пористоволокнистые металлические материалы, истираемые уплотнения, звукопоглощающие конструкции, жаростойкость.*

In the article the main results of research of high-temperature materials developed by FSUE «VIAM» produced from the metal fibers intended for application as essentially new abraded seals of air-gas channel and sound-absorbing materials of gas turbine engines are presented.

The work is executed within the implementation of the complex scientific directions: 9.7. «High-temperature deformable alloys and the composite materials strengthened by high-melting metal fibers and particles, abraded sealing materials» and 15.7. «Porous fiber metal materials for sound-proof designs» («The strategic directions of materials and technologies of their processing development for the period till 2030») [1, 2].

Keywords: *metal fibers, porous fiber metal materials, abradable seals, sound-proof designs, heat resistance.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Материалы из металлических волокон применяются в различных отраслях промышленности уже более шестидесяти лет. Благодаря своим уникальным характеристикам – повышенной проницаемости, развитой поверхности пор, пластичности и более высокому отношению прочности к пористости в сравнении с материалами из спеченных металлических порошков – пористоволокнистые металлические материалы (ПВММ) используют в качестве фильтров жидкостей и газов, глушителей шума, гасителей вибраций, катализаторов и др.

За несколько последних лет, с развитием отечественных технологий производства металлических волокон, стало возможным создание пористоволокнистых материалов с уникальными свойствами для авиационных газотурбинных двигателей (ГТД),

применение которых позволит решить наиболее актуальные задачи, связанные с обеспечением экологичности и экономичности ГТД.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны принципиально новые истираемые уплотнительные материалы и материалы для звукопоглощающих конструкций ГТД из металлических волокон, изготавливаемых методом экстракции висящей капли расплава в «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского» (с 2015 г. существующее как подразделение ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (НИУ)»).

Необходимость создания новых уплотнительных материалов для проточной части ГТД вызвана требованиями по уменьшению удельного расхода топлива. Одна из важнейших задач, с решением которой неизбежно сталкиваются разработчики перспективных ГТД, – обеспечение минимально допустимых зазоров между рабочими лопатками и корпусами компрессора и турбины с целью снижения утечек рабочего газа. Уменьшение радиальных зазоров связано с опасностью соприкосновения торцов лопаток с деталями статора вследствие неравномерной деформации корпуса. Во избежание поломок и износа лопаток разрабатываются специальные уплотнительные материалы, обладающие целым рядом физико-механических и триботехнических характеристик. Одним из основных требований к уплотнительным материалам является способность к истиранию при контактном взаимодействии. Соотношение износов вращающихся и неподвижных деталей является одним из критериев, определяющих эффективность уплотнительных материалов.

Трудности успешного решения этой задачи для узла турбины усугубляются чрезвычайно высокими значениями температуры газа, характерными для ГТД пятого и последующих поколений.

В настоящее время в качестве истираемых уплотнений турбины наибольшее применение имеют металлические сотовые конструкции и керамические покрытия, которые наносятся на детали статора.

Сотовые уплотнения, работающие при температурах до 1100°C, позволяют существенно уменьшить величину радиального зазора. Однако сотовое уплотнение вызывает дополнительные потери в рабочем колесе. Эффективность турбины с сотовым уплотнением ниже, чем с гладким уплотнением, при одинаковой величине зазора. Кроме того, в тяжелых условиях работы турбины сотовые уплотнения деформируются, прогорают, сминаются.

За рубежом в качестве замены сотовых конструкций для уплотнений турбины предложено применение пористых керамических газотермических покрытий, в основном на основе диоксида циркония. Такие покрытия работоспособны до температур 1200°C, однако они имеют ряд недостатков, основным из которых является их низкая истираемость, поэтому применение таких покрытий возможно только при одновременном упрочнении торцов рабочих лопаток с помощью абразивно-износостойких покрытий.

Во ФГУП «ВИАМ» в результате нескольких научно-исследовательских работ, посвященных исследованиям возможности повышения эффективности уплотнений проточного тракта ГТД, разработан новый класс истираемых уплотнительных материалов – высокопористые материалы на основе металлических волокон. По уровню эксплуатационных свойств, и в первую очередь по истираемости, эти материалы не имеют аналогов [3–6]. В рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» применительно к созданию перспективного концепта «Перспективный двигатель» начаты работы по разработке составов и технологии получения волокон из сплавов, легированных металлами платиновой группы (МПП), характеризующихся высокой жаростойкостью, для истираемых уплотнений турбин перспективных ГТД.

Второе направление проводимых во ФГУП «ВИАМ» работ в области создания новых пористоволокнистых металлических материалов для авиационных ГТД связано с исследованием и разработкой ПВММ для высокотемпературных звукопоглощающих конструкций (ЗПК). По сравнению с другими пористыми материалами (из металлических порошков, керамики, минеральной ваты, полимерной и металлической пены и пр.) ПВММ обладают оптимальным сочетанием свойств, требующихся для гомогенного широкополосного глушителя шума ЗПК авиационного двигателя [7–9]. Основными требованиями к таким материалам помимо жаростойкости и коррозионной стойкости являются их акустическая эффективность и низкая плотность. Совместно с МАТИ и ФГНУ «Научный центр порошкового материаловедения» (г. Пермь) разработаны материалы в виде панелей с пористостью до 95% и низкой плотностью – от $0,4 \text{ г/см}^3$. Проведены комплексные лабораторные исследования их эксплуатационных свойств и испытания на акустическую эффективность в условиях работы современных ГТД на стенде ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

В рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» проведены работы по созданию ПВММ со сверхнизкой плотностью ($<0,4 \text{ г/см}^3$) – разработана технология получения материала в виде гибких матов с плотностью $0,25\text{--}0,35 \text{ г/см}^3$ с рабочей температурой до 750°C .

Материалы и методы

Опыт эксплуатации материалов из металлических волокон в качестве истираемых уплотнений в проточном тракте ГТД и результаты многочисленных исследований, проведенных во ФГУП «ВИАМ» и зарубежными компаниями, показывают, что высокопористые уплотнительные материалы из тонких металлических волокон характеризуются наиболее высокими эксплуатационными свойствами (истираемостью, эрозийной стойкостью, твердостью и др.), благодаря чему их применение позволяет значительно минимизировать радиальные зазоры в проточном тракте ГТД, не вызывая дополнительного износа лопаток по торцам [3–5, 10, 11]. Однако, ввиду экстремально высоких рабочих температур, характерных для большинства ГТД, при которых тонкие металлические волокна начинают интенсивно окисляться, такие уплотнения не получили распространения в конструкциях современных двигателей.

Благодаря новой технологии производства металлических волокон методом экстракции висящей капли расплава (ЭВКР), осуществляемой в «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского», удалось получить дискретные волокна из современных жаростойких сплавов на основе систем Ni–Cr, Ni–Cr–Al, Fe–Cr–Al–Y и др. толщиной $15\text{--}30 \text{ мкм}$, которые позволили создать новые высокопористые уплотнительные материалы, работоспособные при температурах до 900°C без использования защитных покрытий (рис. 1).



Рис. 1. Истираемый уплотнительный материал из дискретных металлических волокон

Технологическая схема изготовления истираемых уплотнительных 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.

Метод ЭВКР является одним из наиболее прогрессивных методов получения волокон из жаростойких, коррозионностойких, тугоплавких металлов и сплавов. Волокна, полученные этим методом, обладают повышенными механическими характеристиками, исключительной структурной однородностью, чистотой и стабильностью химического состава благодаря сверхвысоким скоростям охлаждения и бесконтактному плавлению наряду с возможностью использования инертной атмосферы или вакуума. Кроме того, метод ЭВКР характеризуется высокой производительностью и небольшой себестоимостью получаемой продукции [12].

Наиболее жаростойкими промышленными сплавами являются сплавы на основе системы Me–Cr–Al и на основе интерметаллидов NiAl и Ni₃Al, на поверхности которых при их высокотемпературном окислении образуется плотная пленка, преимущественно состоящая из стабильной фазы оксида алюминия (α -Al₂O₃), препятствующая проникновению кислорода к поверхности металла и его дальнейшему окислению. Интерметаллидные сплавы типа ВКНА, разработанные во ФГУП «ВИАМ», благодаря повышенному содержанию алюминия имеют исключительную жаростойкость, позволяют получать волокна, стойкие к окислению при температурах >1000°C, однако изготовление из них истираемого уплотнительного материала методами порошковой металлургии затруднено из-за их повышенной хрупкости [6, 13, 14].

По результатам проведенных исследований установлено, что максимальная рабочая температура материалов из тонких металлических волокон (толщиной <100 мкм) из наиболее жаростойких известных сплавов может составлять 1100°C при использовании защитных покрытий типа SiC–SiO₂ на поверхности волокон [15, 16]. Дальнейшее повышение рабочих температур уплотнительного ПВММ для турбин перспективных и современных высокотемпературных ГТД возможно только в результате проведения работ по поиску новых составов жаростойких сплавов, которые позволят изготовить тонкие пластичные волокна, стойкие к окислению при экстремально высоких температурах.

В результате выполняемой во ФГУП «ВИАМ» НИР «Разработка технологий изготовления высокочистых материалов нового поколения со специальными свойствами на основе и легированных РМ и РЗМ» по подпрограмме «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов» государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» проведены исследования по поиску составов экспериментальных жаростойких сплавов, легированных РЗМ и МПГ, разработана технология выплавки заготовок из экспериментальных сплавов для получения волокон методом ЭВКР. По разработанной технологии выплавки, включающей получение шихтовой заготовки в вакуумных индукционных печах типа ВИАМ-2002 и последующее литье заготовок в керамические формы на вакуумной плавильно-заливочной установке типа УППФ, изготовлены заготовки из экспериментальных сплавов на основе никеля и железа с содержанием платины и иридия от 0,5 до 10% с суммарным содержанием примесей (серы, кислорода и азота) менее 0,01%. Из заготовок методом ЭВКР в МАТИ изготовлены образцы дискретных волокон для проведения исследований их жаростойкости и пластичности.

При разработке и исследовании уплотнительных материалов из волокон основное внимание обращалось на уровень их жаростойкости, термостойкости, истираемости и эрозионной (газоабразивной) стойкости. Оценку этих свойств проводили в соответствии с разработанной в институте методикой, предназначенной для проведения срав-

нительных лабораторных исследований уплотнительных материалов компрессора и турбины ГТД.

Методика испытаний на врезание (истираемость) уплотнительных материалов основана на измерении износа при контактном взаимодействии образца уплотнительного материала и вращающегося образца – имитатора лопатки при их сближении на заданную величину с заданной скоростью.

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

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

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

За результат испытаний уплотнительных материалов на жаростойкость, ввиду их сильно развитой поверхности из-за высокой пористости и сложности количественного определения площади поверхности, принимается относительное изменение массы образца при воздействии на него температуры в течение определенного промежутка времени в присутствии воздуха.

Метод определения термостойкости заключается в определении количества рабочих теплосмен, приводящих материал к разрушению. Под рабочей теплосменой подразумевается цикл нагрева материала до заданной температуры с последующим охлаждением его до температуры окружающей среды.

Основными требованиями к материалам из металлических волокон для звукопоглощающих конструкций, помимо жаростойкости и коррозионной стойкости, являются их акустическая эффективность в широком диапазоне частот, определяемая по величине снижения уровня шума авиационных двигателей, и низкая плотность. В отличие от уплотнительных материалов, при разработке и исследовании звукопоглощающих ПВММ использовали длинномерные волокна (от 20 до 500 м) из сплавов систем Ni–Cr и Fe–Cr–Al, позволяющие изготавливать панели и маты с пористостью >95%.

При исследовании акустических характеристик ПВММ с помощью импедансной трубы определяли коэффициент звукопоглощения (α) образцов в диапазонах частот от 100 до 10000 Гц.

Акустическую эффективность ПВММ исследовали во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» и в НИМК ФГУП «ЦАГИ» на стендах, предназначенных для систематических исследований эффективности ЗПК авиационных реактивных двигателей, в условиях, близких к существующим в натуральных каналах турбореактивных двигателей.

Результаты

Уплотнительные материалы из металлических волокон

В таблице приведены свойства отечественных и зарубежных серийных истираемых уплотнительных материалов, отличающихся наибольшей истираемостью и рабочими температурами, применяемых в современных авиационных ГТД, и свойства разработанных во ФГУП «ВИАМ» материалов из металлических волокон жаростойких сплавов. Значения получены при испытаниях образцов по разработанной для уплотнительных материалов методике.

Свойства современных уплотнительных материалов

Свойства	Значения свойств материалов								
	АНБ	УВС-2П	НППГ-75	Metco 320NS	Metco 313NS	покрытие на основе ZrO ₂ (типа RT-180)	на основе волокон системы		
							Ni-Cr-Al-Y	Fe-Cr-Al-Y	Fe-Cr-Al-Y с защитным покрытием
Максимальная рабочая температура $T_{\text{раб}}$, °C	450	700	550	480	420	1200	800	900	1100
Плотность, г/см ³	~2,2	2,7–3,8	2,3–2,9	~2,5	~2,5	~2,5	≤1,8		≤2,2
Пористость, %	~28	~30	~35	~30	~25	~10	≥70		
Жаростойкость – привес после 100 ч при $T_{\text{раб}}$, %	0,5–1	8	4	1,5–2,0	<0,1	–	≤0,5	≤0,7	≤1,5
Эрозионная стойкость β	~550	~700	~250	~550	~1000	~500	≥1000		
Истираемость – соотношение износов уплотнительного материала и образца-имитатора лопатки	5:1	3:1	5:1	2:1	2:1	1:1	Не менее 10:1		Не менее 5:1

Из приведенных данных можно сделать вывод, что удовлетворительной истираемостью характеризуются материалы, представляющие собой композиции на основе металла (Ni, Al и др.) с «мягким» наполнителем – графитом или нитридом бора, которые наносятся на статорные детали газотермическими методами и применяются, главным образом, для уплотнения радиальных зазоров компрессора при температурах до 700°C. Однако даже самые «мягкие» уплотнительные композиционные материалы, такие как АНБ, НППГ-75 и их зарубежные аналоги, имеют истираемость не более 5:1 и при касании и врезании в них лопатки изнашиваются. Ограничение по истираемости материалов этого типа связано с тем, что всякая попытка сделать материал более «мягким» путем повышения количества наполнителя или пористости приводит к тому, что он не отвечает требованиям по газообразивной стойкости.

Наиболее остро ощущается необходимость в создании истираемого уплотнительного материала для первых ступеней турбины ГТД, где температуры газового потока достигают максимальных значений. 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.

В 2015 г. проведены испытания разработанного во ФГУП «ВИАМ» нового уплотнительного материала из металлических волокон системы Fe–Cr–Al–Y на рабочие температуры до 900°C в составе технологического двигателя производства АО «Климов» по программе периодических эквивалентно-циклических испытаний за гарантийный ресурс 1500 ч, подтвердившие работоспособность и высокий уровень эксплуатационных свойств материалов из металлических волокон в реальных условиях.

В рамках научно-исследовательской работы по разработке технологии получения волокон для истираемого уплотнительного материала с рабочей температурой до 1400°C для применения в турбинах перспективных ГТД получены предварительные результаты исследований, показывающие, что существует реальная возможность получения из сплавов, легированных МПГ, волокон, обладающих высокой стойкостью к

окислению и пластичностью, необходимыми для изготовления ПВММ с рабочими температурами до 1200°C и выше.

Наибольший интерес с технической и экономической точек зрения для изготовления жаростойких волокон представляют сплавы, легированные небольшим количеством МПГ – до 15% (атомн.). В основном исследования сплавов такого типа проводятся в США, Великобритании и Японии с целью повышения стойкости к высокотемпературному окислению и коррозии жаропрочных и износостойких сплавов на основе никеля, систем Co–Cr–Al и Fe–Cr–Al. Предположительно, роль платины и металлов платиновой группы при окислении жаростойких сплавов схожа с ролью гафния в сплавах на основе системы Ni–Cr–Al и иттрия в сплавах системы Fe–Cr–Al – это улучшение адгезии пленки Al₂O₃ к поверхности сплава и снижение скорости роста окалина за счет торможения диффузии алюминия и кислорода по границам оксидных зерен [17–23].

В данной работе исследованы сплавы пяти экспериментальных составов, легированные редкими металлами, в том числе платиновой группы (платиной и иридием): Ni–Al–15Pt, Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf, Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf, Fe–Cr–Al–0,5Pt и Fe–Cr–Al–10Pt.

На рис. 2 представлены результаты испытаний образцов экспериментальных сплавов на жаростойкость при температуре 1300°C.

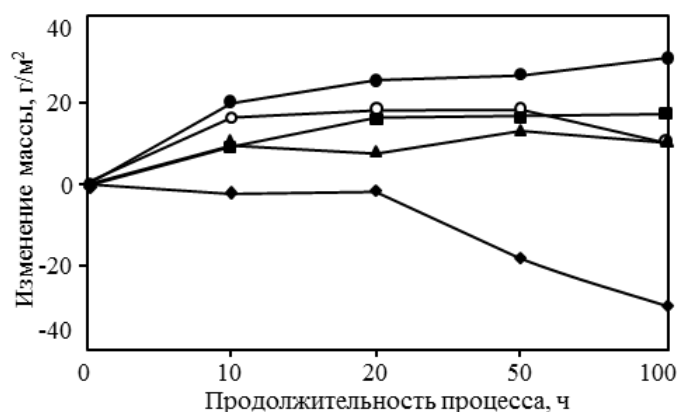


Рис. 2. Изменение массы экспериментальных образцов жаростойких сплавов при их выдержке в течение 100 ч при 1300°C (средние значения по трем образцам) систем: Ni–Al–15Pt (♦); Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf (■); Fe–Cr–Al–0,5Pt (▲); Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf (○); Fe–Cr–Al–10Pt (●)

На рис. 3 приведены результаты сравнительных испытаний на жаростойкость при температуре 1300°C образцов из сплава X23Ю5Т, который характеризуется максимальной стойкостью к высокотемпературному окислению среди отечественных промышленных сплавов на основе системы Fe–Cr–Al и применяется для изготовления нагревательных элементов печей с рабочей температурой до 1400°C, с образцами из сплава на основе системы Fe–Cr–Al, содержащего 0,5% Pt, полученного по разработанной технологии выплавки в вакуумных печах.

Из сплавов систем Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf, Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf и Fe–Cr–Al–0,5Pt методом ЭВКР в МАТИ удалось получить экспериментальные образцы волокон, средняя толщина которых составила 50–60 мкм. По результатам исследований полученных волокон определено, что наибольшую стойкость к окислению при температуре 1100°C имеют экспериментальные образцы из сплавов систем Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf и Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf – их привес составил <5%, при этом волокна после испытаний сохранили пластичность на уровне 5–7 изгибов на 180 град до разрушения.

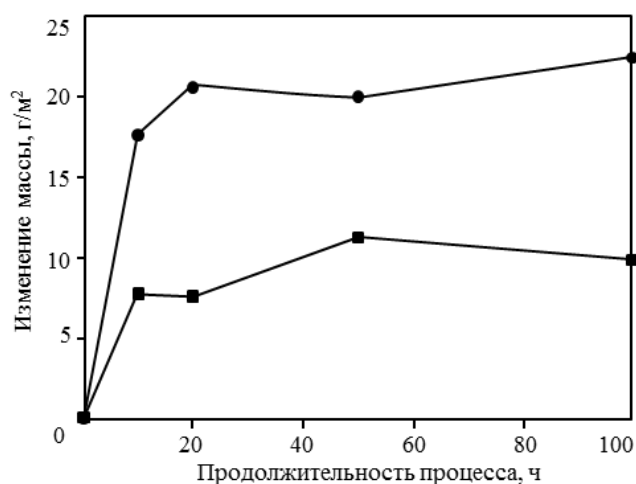


Рис. 3. Изменение массы сплавов систем Fe–Cr–Al (■) и Fe–Cr–Al–0,5Pt (●) при температуре 1300°C

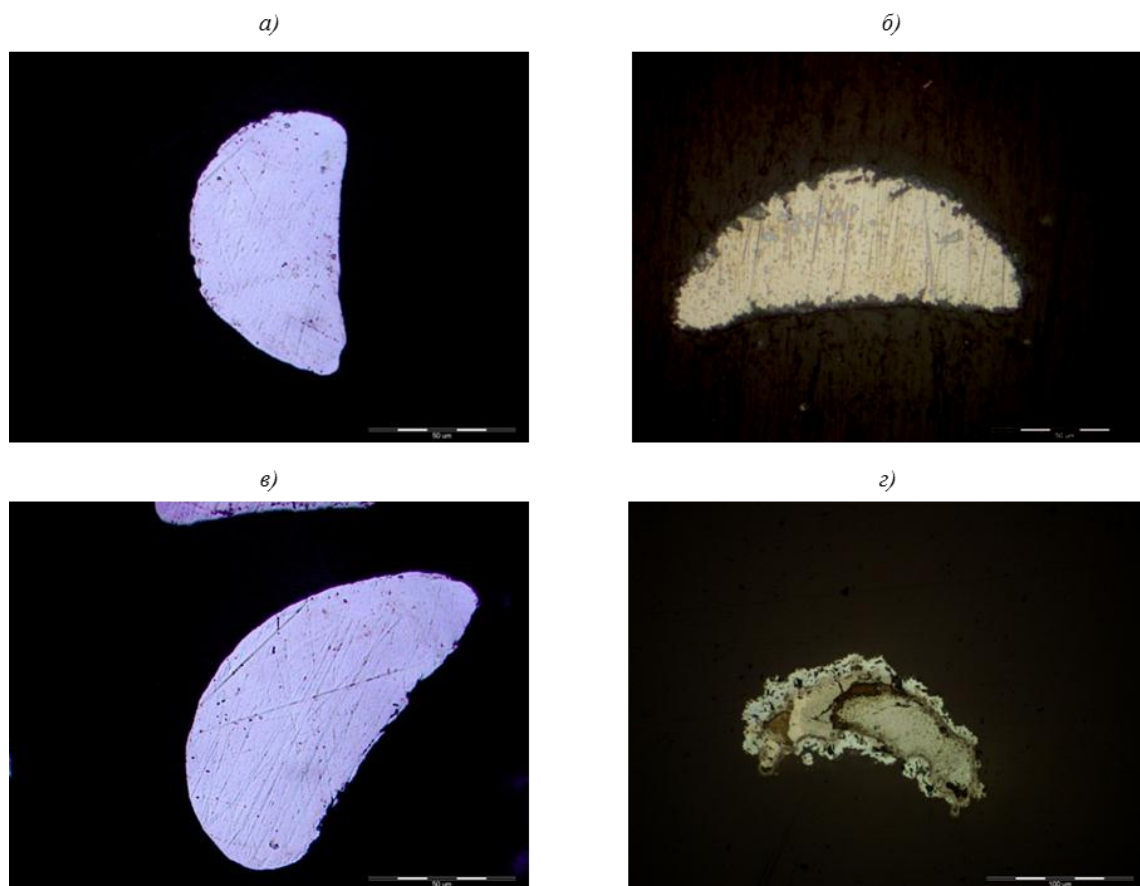


Рис. 4. Микроструктура волокон, полученных методом экстракции висящей капли расплава, из сплавов на основе систем Ni–Al–Cr–Pt–Ir–Hf (а, б) и Fe–Cr–Al (X23Ю5Т) (в, г) в исходном состоянии (а, в) и после 100 ч выдержки при температуре 1100°C (б, г)

На рис. 4 представлен внешний вид отдельных волокон толщиной ~50 мкм (поперечное сечение) из экспериментального сплава на основе системы Ni–Cr–Al–Pt–Ir–Hf и из сплава X23Ю5Т в исходном состоянии и после испытаний на жаростойкость при выдержке при температуре 1100°C в течение 100 ч в воздушной среде. Видно, что волокна из сплава X23Ю5Т после испытаний в указанных условиях окисляются полностью (рис. 4, г). На поверхности волокон из экспериментального сплава системы

Ni–Cr–Al–Pt–Ir–Hf после испытаний по тому же режиму образуется тонкая оксидная пленка толщиной не более 10 мкм (рис. 4, б), отслоившейся от волокон окалина не обнаружено.

ПВММ для звукопоглощающих конструкций

Для материалов высокотемпературных звукопоглощающих конструкций авиационных ГТД максимальные рабочие температуры могут составлять от 400 до 900°C. В настоящее время для обеспечения снижения шума ГТД эксплуатируемых отечественных летательных аппаратов необходимо создать эффективные звукопоглощающие материалы с рабочими температурами 700–750°C и плотностью <0,4 г/см³. Этого можно достичь при использовании для изготовления волокон известных жаростойких сплавов типа X20H80 и X23Ю5. По результатам проведенных исследований материалы из этих волокон с пористостью 85–98% могут выдерживать температуры от 600 (сплав X20H80) до 750–800°C (сплав типа X23Ю5 на основе системы Fe–Cr–Al), при этом такие материалы обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью – по результатам проведенных испытаний в условиях камеры солевого тумана и промышленной атмосферы.

Метод ЭВКР позволяет получать непрерывное волокно, из которого возможно формирование холста непосредственно после его отрыва от рабочей поверхности диска теплоприемника. При этом формирующийся на принимающей поверхности пористый материал (при оптимально подобранных параметрах процесса) имеет равномерную волокнистую структуру при средней плотности ~0,05 г/см³ и достаточную для его дальнейшей обработки механическую прочность, которая обеспечивается путем механического сцепления волокон вследствие их перегибов и за счет образования очагов припекания волокон из-за наличия на их поверхности расплава (рис. 5).



Рис. 5. Пористый материал из волокон сплава типа X23Ю5Т, полученный методом экстракции висящей капли расплава

Из волокон сплава типа X23Ю5 (системы Fe–Cr–Al) методом ЭВКР получены холсты, которые использованы для разработки и изготовления опытной партии материала-наполнителя ЗПК сверхнизкой плотности. Опытная партия матов толщиной до 20 мм с плотностью 0,25–0,35 г/см³ и пористостью >95% из заготовок (холстов), полученных методом ЭВКР, изготовлена совместно с ОАО «НИИИМ» (г. Серпухов).

Такой материал при малой плотности имеет достаточную прочность и упругость для применения его в качестве наполнителя высокотемпературных ЗПК авиационного двигателя. Материал легко обрабатывается, а его высокая пластичность и упругость обеспечивают возможность заполнения рабочего пространства ЗПК любой конфигурации и радиуса и исключение необходимости припайки или крепления наполнителя к металлической основе.

Результаты испытаний на акустическую эффективность образцов ЗПК на основе матов сверхнизкой плотности с использованием перфорированных и сетчатых слоев, которые проведены в НИМК ФГУП «ЦАГИ» на установке «Канал с потоком», показали, что такие конструкции обеспечивают снижение шума в диапазоне частот от 500 до 10000 Гц при максимальном затухании 14–17 дБ на частотах 2000–2500 Гц. В области частот ниже 1000 Гц затухание не превышает 4 дБ, в области высоких частот (>5000 Гц) затухание составляет 5–6 дБ.

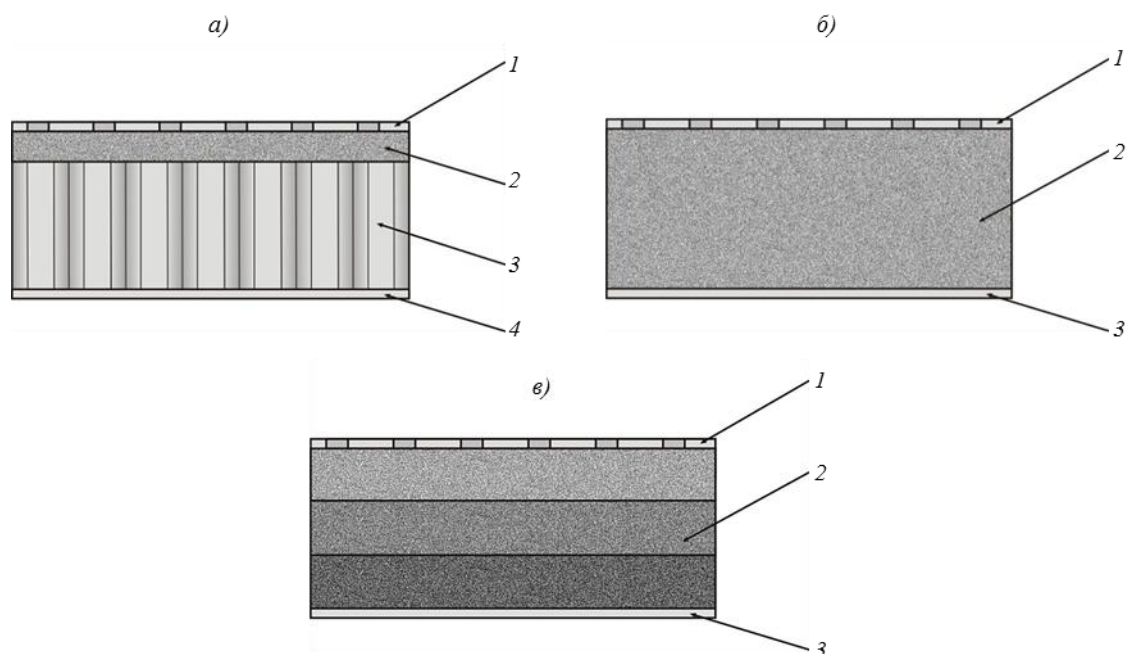


Рис. 6. Схемы конструкций образцов звукопоглощающих конструкций на основе пористоволокнистых металлических материалов (ПВММ):

а – тип 1 (1 – перфорированный металлический лист толщиной 0,3 мм; 2 – слой ПВММ толщиной 3 мм с пористостью 85; 90 или 95%; 3 – шестигранный сотовый наполнитель высотой 20 мм; 4 – непроницаемое основание); б – тип 2 (1 – перфорированный металлический лист толщиной 0,3 мм; 2 – слой ПВММ толщиной 30 мм с пористостью 85; 90 или 95%; 3 – непроницаемое основание); в – тип 3 (1 – перфорированный металлический лист толщиной 0,3 мм; 2 – три слоя ПВММ толщиной 10 мм каждый, пористостью 95; 90 и 85%; 3 – непроницаемое основание)

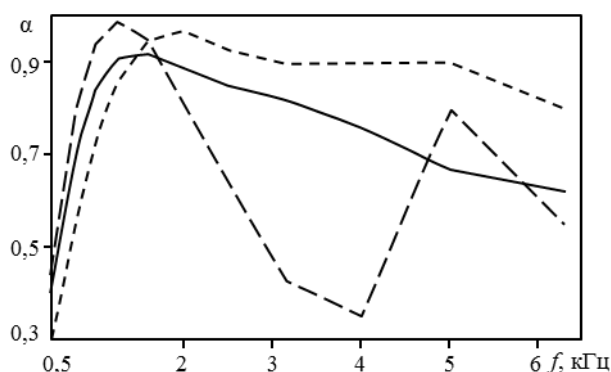


Рис. 7. Коэффициент звукопоглощения (α) конструкционных образцов ЗПК из пористоволокнистого металлического материала (ПВММ):

– – – ПВММ толщиной 3 мм (пористость 85%) + сотовый наполнитель толщиной 40 мм;
 - - - ПВММ толщиной 22 мм (пористость 90%);
 — градиентный ПВММ толщиной 26 мм (пористость 85–90–95%)

О преимуществе ПВММ в сравнении с традиционными сотовыми наполнителями ЗПК можно судить по результатам проведенных исследований звукопоглощающих свойств различных типов конструкционных образцов (рис. 6). На рис. 7 представлены частотные зависимости звукопоглощения конструкционных образцов ЗПК трех типов на основе ПВММ из волокон нихрома. Коэффициент звукопоглощения (α) конструкционных образцов определяли на интерферометре при расположении образца по отношению к жесткой стенке без воздушного зазора.

Обсуждение и заключения

Результаты проведенных в течение нескольких последних лет во ФГУП «ВИАМ» работ в области разработки и исследования ПВММ показывают, что благодаря применению новых технологий производства металлических волокон и пористых материалов возможно создание уникальных по своим эксплуатационным характеристикам материалов, применение которых в качестве истираемых уплотнений и наполнителей ЗПК позволит повысить технические характеристики и конкурентоспособность отечественных авиационных ГТД.

Разработанные во ФГУП «ВИАМ» звукопоглощающие и уплотнительные материалы на основе металлических волокон находятся на стадии испытаний и подготовки к испытаниям в реальных условиях работы авиационных ГТД с целью их дальнейшего внедрения.

Развитие данного материаловедческого направления в рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» связано с проведением работ по повышению свойств ПВММ, их опробованию и внедрению в конструкции ГТД.

Результаты исследований волокон из жаростойких сплавов, легированных металлами платиновой группы, показывают, что существует реальная возможность получения волокон, обладающих свойствами (высокой стойкостью к окислению, сочетающейся с пластичностью), необходимыми для изготовления ПВММ с рабочими температурами $>1100^\circ\text{C}$.

По результатам проведенных исследований подана заявка и получен патент на изобретение №2573542 «Металлические волокна из жаростойкого сплава (варианты) и изделие, выполненное из металлических волокон».

Несмотря на высокую стоимость платины и металлов платиновой группы, 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. Согласно зарубежным исследованиям, снижение КПД двигателя достигает 5% за счет утечек из-за увеличенных радиальных зазоров.

Следует отметить, что для изготовления эффективных уплотнений из металлических волокон для наиболее высокотемпературных первой и второй ступеней турбины ГТД требуется не более 200 г волокон, содержащих от 1 до 20 г металлов платиновой группы.

Работа в данном направлении будет продолжена. В 2016 г. планируется разработка промышленной технологии получения волокон из жаростойких сплавов, легированных МПГ. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку технологий производства уплотнительного материала из жаростойких металлических волокон и его нанесения на детали статора современных и перспективных ГТД.

Продолжение работ по созданию эффективных звукопоглощающих ПВММ также связано с проведением опробования разработанных ПВММ в составе реальных изделий и дальнейшим улучшением их свойств – повышением рабочих температур и уменьшением плотности. В сотрудничестве с МАТИ и ОАО «НИИИМ» во ФГУП «ВИАМ» изготовлена опытная партия матов из ПВММ сверхнизкой плотности ($0,25\text{--}0,35\text{ г/см}^3$), предназначенных для проведения испытаний в составе глушителя ВСУ самолета МС-21.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
3. 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.
4. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Ступина Т.И. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 94–97.
5. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л. Истираемый уплотнительный материал на основе волокон из медных сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №9. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-4-4.
6. 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: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №7. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-2-2.
7. Соболев А.Ф., Ушаков В.Г., Филиппова Р.Д. Звукопоглощающие конструкции гомогенного типа для каналов авиационных двигателей // *Акустический журнал*. 2009. Т. 55. №6. С. 749–759.
8. Халецкий Ю.Д. Эффективность комбинированных глушителей шума авиационных двигателей // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58. №4. С. 556–562.
9. Sun F.G., Chen H.L., Wu J.H., Feng K. Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures // *Appl. Acoust.* 2010. V. 711. P. 221–235.
10. Smarsly W., Zheng N., Buchheim C.S., Nindel C., Silvestro C., Sporer D., Tuffs M., Schreiber K., Langlade-Bomba C., Andersen O., Goehler H., Simms N.J., McColvin G. Advanced High Temperature Turbine Seals Materials and Designs // *Material Science Forum*. 2005. V. 492–493. P. 21–26.
11. Simms N.J., Norton J.F., McColvin G. Performance of candidate gas turbine abrazeable seal materials in high temperature combustion atmospheres // *Materials and Corrosion*. 2005. V. 56. P. 765–777.
12. 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.
13. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 26–31.
14. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Сплавы на основе алюминидов никеля // *МиТОМ*. 1999. №1. С. 32–34.
15. 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: 30.03.2016).
16. 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.
17. Felten E.J. Use of Platinum and Rhodium to Improve Oxide Adherence on Ni–8Cr–6Al Alloys // *Oxidation of Metals*. 1976. V. 10. №1. P. 23–28.
18. Allam I.M., Akuezue H.C., Whittle D.P. Influence of Small Pt Additions on Al₂O₃ Scale Adherence // *Oxidation of Metals*. 1980. V. 14. №6. P. 517–530.
19. Heidloff A.J., Tang Z., Zhang F., Gleeson B.C. A Combined Mapping Process for the Development of Platinum-modified Ni-based Superalloys // *JOM*. 2010. V. 62. P. 48–53.
20. 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.
21. 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. Issue 1. P. 16–22.
22. Amano T. High-temperature oxidation of FeCrAl (Y, Pt) alloys in oxygen-water vapour // *Materials at high temperatures*. 2011. V. 28. Issue 4. P. 342–348.
23. Amano T. High-temperature oxidation resistance of Al₂O₃-forming heat-resisting alloys with noble metal and rare earth additions // *Materials and Corrosion*. 2011. V. 62. №7. P. 659–667.