

УДК 677.53

Д.П. Фарафонов¹, М.М. Серов², А.Ю. Патрушев¹,
Н.Е. Лещев¹, А.С. Ярошенко¹

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ДЛЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-23-34

Представлены результаты работ, проводимых во ФГУП «ВИАМ» в рамках нового материаловедческого направления – металлургия металлических волокон. Проведение таких работ стало возможно благодаря разработке метода получения металлических волокон, получившего название «метод экстракции висящей капли расплава» (ЭВКР). Данный метод является высокопроизводительным и позволяет получать волокна практически из любых материалов. Проведенные исследования показали возможность повышения эксплуатационных и экологических характеристик современных и перспективных двигателей благодаря внедрению новых классов материалов на основе металлических волокон.

Ключевые слова: *волокно, закалка расплава, жаропрочные сплавы, уплотнительные материалы, пористо-волокнистые материалы, звукопоглощающие материалы, щеточные уплотнения.*

D.P. Farafonov¹, M.M. Serov², A.Yu. Patrushev¹,
N.E. Leshchev¹, A.S. Yaroshenko¹

METAL FIBERS FOR NEW AIRCRAFT ENGINE MATERIALS

Presents the results of work carried out at the Federal state unitary enterprise «VIAM» in the framework of a new material science direction – metallurgy of metal fibers. This work was made possible by the development of a method for producing metal fibers called the hanging melt drop extraction method (EUCR). This method is high-performance and allows you to obtain fibers from almost any material. Research has shown that it is possible to improve the performance and environmental characteristics of modern and advanced engines by introducing new classes of materials based on metal fibers.

Keywords: *fiber, melt quenching, heat-resistant alloys, sealing materials, porous-fiber materials, sound-absorbing materials, brush seals.*

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» [Federal State Budgetary Educational Institution «Moscow Aviation Institution» National Research University]; e-mail: mai@mai.ru

Введение

Металлические волокна и материалы на их основе получили широкое распространение в современной технике. Они применяются для изготовления: фильтров очистки жидкостей и газов от взвешенных частиц; носителей катализаторов, дросселей, пористых электродов химических источников тока; электропроводных, экранирующих,

теплозащитных и фрикционных материалов; армирующих элементов композиционных материалов; демпферов механических и звуковых колебаний. В этих областях применение волокон приводит к повышению эксплуатационных свойств материалов, позволяет добиться экономии энергии и материалов, поэтому их потребление постоянно растет [1].

Началом разработок в области металлургии волокон можно считать 1948 год, когда впервые были изготовлены фильтры большой пористости из дискретных волокон коррозионностойких металлов. В 1955 г. американская фирма Armor Research Foundation разработала технологию изготовления из волокон на металлической основе материалов, подобных бумаге и войлоку, благодаря чему открылись совершенно новые возможности использования материалов из волокон на металлической основе в промышленности. Основными преимуществами обладающих высокой пористостью материалов из волокон на металлической основе перед материалами, получаемыми методами порошковой металлургии, является их более высокое значение отношения прочности к пластичности. Данные аспекты позволяют рассматривать материалы из волокон на металлической основе как весьма перспективные [2–5].

Появление новых прогрессивных методов получения волокон на основе металлов вытягиванием из расплава, разновидностью которых является метод экстракции висящей капли расплава (ЭВКР), позволило создать во ФГУП «ВИАМ» новое материаловедческое направление, в рамках которого разработаны принципиально новые материалы на основе металлических волокон для перспективных авиационных двигателей, обладающих рядом уникальных свойств. Применение материалов на основе металлических волокон позволит заметно улучшить технические и экологические характеристики авиационных двигателей.

Материалы и методы

Создать перспективные материалы из металлических волокон, обладающие повышенными эксплуатационными характеристиками, позволила разработка метода ЭВКР с вращающимся теплоприемником, который применяется для получения волокон на металлической основе.

Метод ЭВКР разработан в «Научном центре порошкового материаловедения» (г. Пермь) и МГТУ им. К.Э. Циолковского в начале 1990-х гг. Отличительной особенностью данного метода является применение бестигельной плавки, что позволяет применять в качестве исходного сырья для получения волокон практически любой материал (тугоплавкие, химически активные металлы; жаростойкие металлы; коррозионностойкие и труднодеформируемые стали и сплавы).

В настоящее время метод ЭВКР реализован на базе ФГУП «ВИАМ» и ФГБОУ ВО «МАИ». Суть этого метода заключается в следующем: образование висящей капли расплава происходит путем плавления нижнего торца вертикально расположенного стрежня, с данной каплей контактирует кромка водоохлаждаемого диска, затвердевание расплава происходит непосредственно в зоне контакта капли и диска, посредством вращения диска происходит вынос затвердевшего материала с последующим его сбросом с диска под действием центробежных сил.

Установка ЭВКР-ЭЛУ с электронно-лучевым нагревом, обеспечивающим температуру плавления >2000 °С, разработана для исследования процесса получения непрерывных волокон на металлической основе и волокон из неорганических материалов. Эта установка расположена на территории ФГБОУ ВО «МАИ». Конструкция установки предусматривает возможность крепления узла смотки волокна. Для увеличения производительности спроектирована и создана экспериментальная установка для изготовления волокон из нескольких прутков одновременно. Плавление заготовки осуществляется излучением от электрического нагревателя сопротивления. Экспериментальная установка ЭВКР-РН расположена на территории ФГУП «ВИАМ». Механизм подачи

прутков позволяет вводить в зону плавления до трех прутков. На установке получены волокна из материалов с температурой плавления до 1700 °С.

Применение данного метода позволило разработать новый класс истираемых уплотнительных материалов из дискретных металлических волокон для проточной части ГТД, высокотемпературные звукопоглощающие материалы на основе длинномерных волокон, а также провести поисковые работы в области создания волокон для последующего их применения в щеточных уплотнениях.

Необходимость создания нового класса истираемых уплотнительных материалов для проточной части ГТД вызвана требованиями к двигателям по уменьшению удельного расхода топлива и повышению их КПД. Одним из путей решения проблемы повышения КПД (в частности экономичности и надежности двигателя) является уменьшение зазоров между статорными и ответными роторными деталями в его проточной части, позволяющее снизить утечку горячих газов. Для уменьшения таких зазоров применяют уплотнительные материалы, которые позволяют сохранить, а иногда и уменьшить удельный расход топлива и повысить КПД двигателя [6–10].

В настоящее время наиболее распространенными уплотнительными материалами в компрессорах и турбинах ГТД являются металлические конструкции на основе сот и газотермические покрытия, изготавливаемые газопламенным или плазменным напылением композиционных порошков или гранул. Сотовые металлические конструкции, изготавливаемые из тонких металлических лент, работоспособны при температурах до 1100 °С, позволяют существенно уменьшить величину радиальных зазоров, так как они допускают скольжение периферийных торцов рабочих лопаток по сотам за счет значительно (до 10 раз) меньшей площади поверхности металлического контакта по сравнению с гладким уплотнением. Однако установлено, что сотовые уплотнения вызывают дополнительные концевые потери в рабочем колесе, которые обусловлены главным образом пульсациями давления газа в ячейках уплотнения, а также во время их эксплуатации часто происходит прогорание ячеек сот и их смятие при работе турбины в тяжелых условиях (взлет, посадка, турбулентность). Гладкие материалы наносят на статорные детали газотермическими методами, данные материалы представляют собой композиции, имеющие в своем составе металлы (Ni, Al и др.) с наполнителем в виде графита или нитрида бора, который в таких материалах выступает в виде мягкой смазки. Проблемой применения данных материалов является их недостаточная газоабразивная стойкость, из-за чего их невозможно сделать более «мягкими», что во время контакта лопатки с таким уплотнением приводит к износу кончика лопатки.

Проведенные в России и за рубежом опытные работы и анализ научнотехнической литературы по разработке и применению перспективных видов новых уплотнительных материалов показали, что наибольшую истираемость демонстрируют материалы на основе металлических волокон, обладающие повышенной пористостью (>70%). Формирование данных уплотнений происходит путем прессования и спекания металлических волокон, а сами металлические волокна обеспечивают необходимую прочность и эрозионную стойкость при пористости >(80–85)% [11–16].

Перспективными материалами для применения в качестве звукопоглощающих конструкций (ЗПК) являются пористо-волоконистые металлические материалы (ПВММ), они обладают эффективными поглощающими свойствами, практически не зависящими от уровня звукового давления в потоке, и обеспечивают уменьшение шума в широком диапазоне частот. Такие материалы имеют высокие характеристики температурной стойкости, пожаробезопасности, грибостойкости и мало абсорбируют различные жидкости. Современные ЗПК состоят из листа с отверстиями и расположенной за ним воздушной полостью, которая заполнена сотами. Данные ЗПК имеют акустическую эффективность в низком диапазоне частот (одна октава), тогда как ПВММ обеспечивают объемное поглощение звука в более широком диапазоне частот. Основная

проблема при создании ЗПК состоит в подборе материала для ПВММ, обеспечивающего поглощение звука в широком диапазоне частот. Во время выбора материала для ПВММ также следует обращать внимание на ограничения по массе и на эксплуатационные характеристики, такие как температура эксплуатации, прочность, коррозионная стойкость, пожаробезопасность и др. [17–20].

Еще одним направлением в области поисковых научно-исследовательских работ стало создание совместно с МАИ перспективных щеточных уплотнений из металлических волокон. Данные уплотнения пока не нашли широкого применения в отечественных двигательных установках летательных аппаратов, однако они широко используются в зарубежных двигателях – как авиационных, так и конвертированных. Щеточные уплотнения сочетают преимущества и недостатки контактных и лабиринтных уплотнений. Так, при больших значениях окружных скоростей и необходимости обеспечения значительного ресурса используются лабиринтные уплотнения (их герметичность напрямую зависит от величины зазора); при сравнительно умеренных окружных скоростях используются контактные уплотнения, которые обеспечивают практически нулевой уровень утечки рабочего газа.

Щеточные уплотнения изготавливают из металлической проволоки или металлических волокон (углеволокон), которые устанавливают с наклоном в сторону вращения между двух пластин разного диаметра. Сдерживающим фактором для применения щеточных уплотнений в двигателях летательных аппаратов в России является опасность повреждения подшипников отломившимися в течение работы проволочками, а также коксование при попадании масла на щетку. Основные требования при подборе материала для изготовления щеточных уплотнений:

- сохранение упругости и прочности в интервале температур 550–750 °С;
- стойкость к окислению при указанных температурах;
- малый износ при работе в составе двигателя.

Для оценки эксплуатационных свойств разрабатываемых материалов применяли лабораторную методику ММ 1.595-3-147–2002, включающую определение жаростойкости, термостойкости, стойкости к газообразному износу и оценку истираемости при моделировании процесса контактного взаимодействия материала с торцами рабочих лопаток. Проведение натуральных испытаний уплотнительных материалов в составе технологического двигателя стало возможным благодаря результатам лабораторных исследований.

Исследование акустических характеристик звукопоглощающих материалов проводили на акустическом интерферометре и стенде У-96Т в диапазоне частот 800–10000 Гц при уровне звукового давления от 110 до 150 дБ, т. е. в условиях, близких к существующим в натуральных каналах турбореактивных двигателей.

Результаты и обсуждение

Важным показателем эффективности при разработке уплотнительных материалов является величина их истираемости (характеризующаяся соотношением износов уплотнения и лопатки), которую можно оценить по результатам испытаний образцов на врезание по ММ 1.595-3-147–2002 при контактном взаимодействии уплотнения и вращающегося образца, имитирующего кончик лопатки. Испытания проводят на высокоскоростной машине трения при сближении образцов на расстояние 1 мм. Серийные уплотнительные материалы, используемые в интервале температур от 600 до 1100 °С, имеют соотношения износов от 2:1 до 4:1, тогда как разработанные уплотнительные материалы из волокон сплавов с повышенной жаростойкостью имеют очень высокую истираемость, составляющую 10:1 и более, при достаточно малой плотности $\leq 1,8 \text{ г/см}^3$ и повышенной пористости. Внешний вид таких уплотнений в составе деталей двигателя представлен на рис. 1.



Рис. 1. Детали авиационного двигателя с истираемым уплотнительным материалом из волокон системы Fe(Ni)–Cr–Al–Y

Работы по оптимизации составов для получения из них металлических волокон с целью последующего их применения в качестве уплотнительных материалов ГТД проводятся во ФГУП «ВИАМ» на протяжении последних нескольких лет. Главной задачей этих исследований является повышение рабочей температуры (жаростойкости и термостойкости) уплотнительных материалов, изготавливаемых из волокон на металлической основе, при сохранении заданного уровня механических свойств. Анализ научно-технической литературы и опытные работы показали, что оптимальными свойствами для производства уплотнительных материалов, изготавливаемых из волокон на металлической основе, обладают сплавы систем Ni–Cr–Al, Ni–Cr–Al–Y, Fe(Ni)–Cr–Al–Y, однако ограничительным фактором являются рабочие температуры уплотнительных материалов из данных сплавов, составляющие от 700 до 900 °С, что ограничивает их применение в современных и перспективных двигателях. Для решения данной проблемы необходимо повышать жаростойкость и термостойкость волокон на металлической основе, из которых изготавливают уплотнительные материалы, для чего на поверхность волокна возможно нанесение защитного покрытия (например, покрытия на основе системы SiC–SiO₂), что позволяет увеличить температуру работы данных уплотнений до 1000 °С. Однако нанесение данного покрытия приводит к уменьшению истираемости уплотнительного материала, что вызывает износ торцов лопаток турбины, поэтому дальнейшие исследования проводили в области подбора новых составов волокон на металлической основе. Сплавы на основе интерметаллида алюминия Ni₃Al являются перспективными в данном случае. Для изготовления уплотнительных материалов могут также использоваться волокна на металлической основе из сплава ВКНА-4У и опытного сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti, которые обладают удовлетворительным сочетанием жаростойкости и пластичности.

Последующие работы, связанные с повышением рабочих температур данного класса уплотнений, проводили путем введения легирующих элементов в сплавы систем Ni–Al, Ni–Cr–Al и Fe–Cr–Al. Так, установлено, что введение в состав данных систем платины и иридия позволяет поднять максимальную температуру эксплуатации до 1200 °С, что в свою очередь позволит применять данные материалы в турбинах перспективных ГТД.

Сплавы на основе металлов платиновой группы имеют исключительную стойкость к воздействию окружающей среды при сверхвысоких температурах, однако их использование малоцелесообразно с экономической точки зрения для получения волокон

на металлической основе и серийного производства истираемого уплотнительного материала для ГТД при наличии других возможных решений. Наибольший интерес с технической и экономической точек зрения представляют жаростойкие сплавы, легированные небольшим количеством металлов платиновой группы (до 15% (атомн.)). Это жаропрочные сплавы на основе никеля, сплавы систем Co–Cr–Al и Fe–Cr–Al с содержанием платины и других металлов платиновой группы от 0,5 до 20% (атомн.) [21, 22].

Из сплавов систем Fe–Cr–Al и Ni–Cr–Al, дополнительно легированных платиной и иридием, методом ЭВКР совместно с МАТИ изготовлены волокна средней толщины 40–60 мкм, которые получали из заготовок диаметром 12–13 мм, изготовленных из пальчиковых заготовок, полученных из слитков, выплавляемых в вакуумной индукционной печи. Исследования жаростойкости проводили путем оценки изменения массы образцов волокон после их выдержки при температуре 1100 °С в течение 100 ч в воздушной атмосфере, полученные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение массы экспериментальных образцов волокон после их выдержки при температуре 1100 °С в течение 100 ч

Система сплава	Δm , г	Δm , %
Ni–Cr–Al–Pt–Hf	0,070	4,8
Ni–Cr–Al–Pt–Ir–Hf	0,064	4,3
Fe–Cr–Al–Pt	0,470	32,5
Fe–Cr–Al–Y	0,640	45,1

Исследования показали, что наибольшей невосприимчивостью к окислению под действием высоких температур характеризуются волокна из жаропрочных никелевых систем с добавлением платины.

В табл. 2 представлены некоторые технологические параметры серийных уплотнений и нового класса уплотнений на основе металлических волокон.

Таблица 2

Эксплуатационные характеристики уплотнительных материалов проточной части ГТД

Свойства	Серийные уплотнительные материалы			Материалы из волокон систем				
	АНБ	УВС-2П	Пористый керамический материал типа RT-180	Ni–Cr–Al–Y	Fe–Cr–Al–Y	Fe–Cr–Al–Y с защитным покрытием	Ni–Al–Co–Re–Ti	Ni–Cr–Al–Pt
Рабочая температура, °С	≤450	≤700	≤1200	≤800	≤900	≤1100	≤1100	≤1200
Эрозионная стойкость	~550	~700	~500	≥1000				
Истираемость	5:1	3:1	1:1	≥10:1		≥5:1	≥5:1	≥5:1

Оценка эксплуатационных характеристик уплотнений на основе волокон системы Fe–Cr–Al–Y в составе турбины технологического двигателя показала, что данный класс уплотнений обладает повышенным уровнем эксплуатационных характеристик.

Для изготовления высокопористых конструкций, предназначенных для применения в ЗПК, в частности при получении волокон на металлической основе, использовали сплавы X20H80 и X23Ю5, которые являются жаростойкими, что привело к увеличению температурной стабильности данных ЗПК. Плотность – одна из важнейших характеристик при создании материалов для ЗПК [23, 24]. Расширенный диапазон частот глушения звука и низкая плотность ЗПК из волокон сплавов нихром (X20H80)

и фехраль (X23Ю5) стали возможны благодаря применению метода ЭВКР, который позволяет изготавливать длинномерные волокна с последующим формованием полотна, соединение которого происходит после сброса волокна с кромки теплопринимающего диска. Волокнистая структура, отличающаяся равномерностью, достигается путем подбора параметров процесса получения волокна, являющихся оптимальными для данного материала, а механическая прочность, позволяющая проводить механическую обработку, достигается благодаря сплавлению волокон и их сцепке в результате перегиба. Структура ПВММ из сплава X23Ю5 представлена на рис. 2.

Исследования акустических параметров, разработанных ЗПК, проводили путем сравнения доли звуковой энергии, преодолевшей данный материал и оставшейся в нем, сравнительно с общей энергией звуковой волны. Полученные зависимости коэффициентов звукопоглощения образцов ЗПК трех типов на основе ПВММ из волокон нихрома от частоты звуковых колебаний представлены на рис. 3.



Рис. 2. Пористо-волоknистый металлический материал из сплава X23Ю5, полученный методом экстракции висящей капли расплава, и его структура

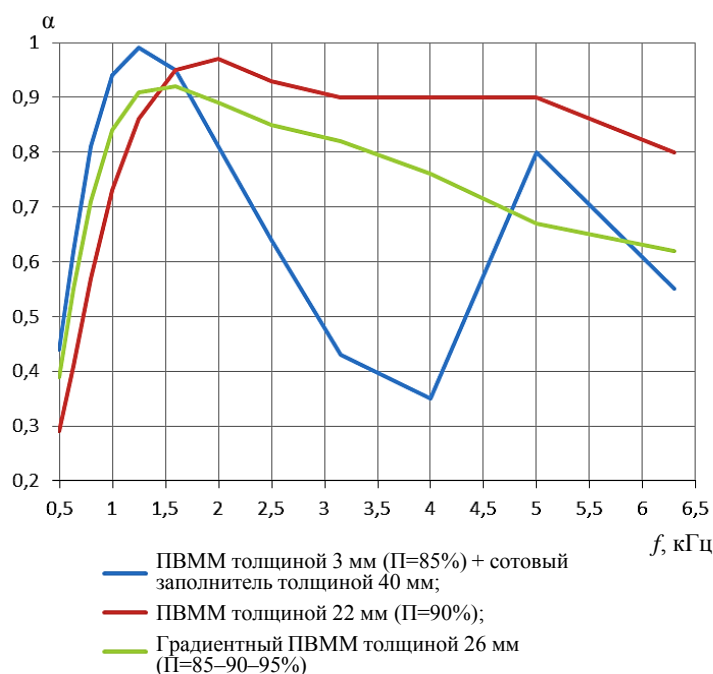


Рис. 3. Зависимость коэффициента звукопоглощения (α) образцов звукопоглощающих конструкций трех типов (Π – пористость) на основе пористо-волоknистого металлического материала (ПВММ) из волокон нихрома от частоты звуковых колебаний (f)

Для измерения коэффициента звукопоглощения (α) использовали интерферометр. Исследования показали, что при применении в ЗПК ПВММ происходит увеличение их широкополосности по сравнению с ЗПК, действие которых основано на резонансе, а на частотах $f > 1,6$ кГц происходит увеличение равномерности спектра поглощения.

Низкоплотные ПВММ из сплава фехраль сохраняют свою температурную стабильность до значений температуры 700 °С и более. Испытания на стойкость к высоко-температурной коррозии показали, что привес образцов данного ПВММ не превышает 1,1% при продолжительности выдержки 100 ч и температуре выдержки 700 °С.

Замеры акустических характеристик проводили в НИМК ФГУП «ЦАГИ» (коэффициент звукопоглощения α и импеданс $Re(Z)$ и $Im(Z)$) для образцов, вырезанных из матов с различной плотностью. Испытания выполнены на интерферометре с высоким уровнем акустического давления в диапазоне частот 500–5000 Гц при нормальном падении на слой образца звуковых волн в виде белого шума со звуковым давлением, составляющим $L \approx 120$ дБ. Значения коэффициента звукопоглощения α в различных частотных диапазонах для образцов толщиной 20 мм представлены в табл. 3.

Таблица 3

Акустические характеристики образцов из пористо-волоконного металлического материала толщиной 20 мм из волокон сплава системы Fe–Cr–Al

Условный номер образца	Плотность, г/см ³	Коэффициент звукопоглощения α	Частотный диапазон Δf , кГц
1	0,2	0,5–0,6	3–5
2		0,4–0,5	3–5
3		0,4–0,5	2,8–5
4	0,3	0,6–0,7	2,8–5
5		0,5–0,6	2,6–5
6		0,5–0,6	2,8–5
7	0,4	0,6–0,75	2,5–5
8		0,6–0,75	2,8–5
9		0,6–0,75	2,8–5

Видно, что образцы обеспечивают максимальное значение коэффициента звукопоглощения $\alpha \approx 0,5–0,7$ в зоне повышенных частот $f \approx 3–5$ кГц.

Третье направление исследований по применению волокон на металлической основе в авиационной промышленности, осуществляемых во ФГУП «ВИАМ» совместно с ФГБОУ ВПО «МАТИ» (ныне ФГБОУ ВО «МАИ») и АМНТК «Союз» в 1990 г., связано с созданием щеточных уплотнений между роторными и статорными деталями двигателя, эффективно работающих при окружной скорости в зоне контакта до 300 м/с и показателях температуры до 500 °С. Данные уплотнения в то время были призваны заменить лабиринтные уплотнения с целью снижения потерь рабочего тела в 2 раза и исключить заклинивание ротора.

Материал для изготовления щеточных уплотнений – стеллит (сверхтвердый сплав, основой которого являются кобальт и хром с добавлением вольфрама и/или молибдена), покрытие ротора – Al_2O_3 или Cr_2O_3 . Применение стеллита повышает упругость волокон (по сравнению с волокнами из нихрома), что позволяет лучше восстанавливать форму щеточного уплотнения и отслеживать неровности на поверхности ротора.

Наибольшее применение в щеточных уплотнениях нашли различные виды нихромов, но они не всегда удовлетворяют необходимым требованиям. Более высоким комплексом свойств обладают наплавочные материалы типа стеллитов (сплавы

системы Cr–Co), но из-за присутствия в их структуре большого количества карбидов и силицидов они обладают повышенной твердостью и из данных материалов практически невозможно получить тонкие волокна методами пластической деформации, а из-за структурных особенностей они очень хрупки. Поэтому для получения металлических волокон из стеллитов перспективны методы закалки расплава. Кроме того, высокие скорости охлаждения из расплава позволяют добиться повышения пластичности материала [25, 26].

В АМНТК «Союз» изготовлена опытная партия щеточных уплотнений на основе мерных волокон из жаростойких сплавов ЭП-578 и Х18Н10Т. Крепление мерных волокон к кольцу производилось путем перевязки проволокой, оплетки, сборки в трубчатую гильзу и последующей пайки.

Дальнейшие исследования показали, что основные трудности при создании щеточных уплотнений заключаются в создании оптимальной пары трения «торцы волокон–деталь ротора». В зависимости от интенсивности контакта происходит либо сваривание торцов волокон, либо износ детали ротора. Наиболее часто повторяющийся результат испытаний – это забивание щеточного уплотнения продуктами износа, в результате чего элементы теряют возможность упругого изгиба и уплотнение выходит из строя. Решить данную проблему позволило получение при помощи метода ЭВКР стеллитовых волокон диаметром 80–100 мкм с последующим использованием их в щеточных уплотнениях. Внешний вид щеточного уплотнения представлен на рис. 4.



Рис. 4. Опытное щеточное уплотнение, разработанное в АМНТК «Союз»

Проведенные стендовые испытания показали эффективность разработанных уплотнений при скорости вращения ротора в зоне контакта до 300 м/с и температуре до 500 °С. Применение щеточных уплотнений из волокон стеллита позволило уменьшить величину утечек рабочего тела в 2 раза и сохранить их стабильными в течение всего ресурса работы.

Заключения

Использование перспективного метода получения металлических волокон, получившего название «метод экстракции висящей капли расплава» (ЭВКР), позволило создать во ФГУП «ВИАМ» новое материаловедческое направление – металлургия металлических волокон. Главными преимуществами данного метода в отличие от традиционных методов получения волокон (например, шевингования, резания и вытягивания из расплавленного материала) является то, что метод ЭВКР обладает высокой производительностью,

позволяет получать материалы из сплавов с повышенной температурой плавления и из материалов, обладающих повышенной химической активностью, что достигается благодаря бесфильтровой плавке. При использовании данного метода возможно также получение материалов с микрокристаллической и даже аморфной структурой, что достигается сверхвысокими скоростями охлаждения за счет принудительного теплоотвода (10^6 К/с).

Повышение эксплуатационных характеристик авиационных ГТД является главной целью работ по внедрению в авиационную промышленность материалов на основе металлических волокон, проводимых во ФГУП «ВИАМ».

Первым направлением является создание перспективного класса материалов для применения их в виде истираемых уплотнений проточной части турбины и компрессора ГТД. В данных уплотнениях применяют волокна из сплавов на основе систем Ni–Al, Ni–Cr–Al и Fe–Cr–Al, обладающих повышенной жаростойкостью. Рабочая температура таких уплотнений может составлять до 1200 °С, они имеют также очень высокую истираемость, составляющую 10:1, при достаточно низкой плотности $\leq 1,8$ г/см³ и высокой пористости, что при их применении позволит существенно повысить КПД перспективных ГТД.

Пористо-волоконистые металлические материалы, применяемые в качестве гомогенного наполнителя звукопоглощающих конструкций, стали вторым направлением исследований в рамках материаловедческого направления – металлургия металлических волокон. Испытания показали, что сочетание свойств, присущее данным материалам, оптимально для их использования в составе звукопоглощающих конструкций авиационных ГТД. Преимущества данных ПВММ – это прочностные характеристики, отличающиеся высокими значениями; показатели пластичности, также являющиеся достаточно высокими; пористость, составляющая в некоторых случаях до 98%; немаловажная характеристика – плотность, которая по сравнению с серийными материалами достаточно мала; показатели температурной стабильности, обеспечивающие рабочие температуры данных материалов в пределах 700 °С и более. По уровню звукопоглощения данные ЗПК превосходят существующие аналоги и позволяют добиваться существенного снижения шума в диапазоне частот от 500 до 10000 Гц.

Третьим направлением исследований является применение металлических волокон в составе щеточных уплотнений ГТД. Хотя щеточные уплотнения не нашли широкого применения в отечественных ГТД, они довольно перспективны. Основной проблемой при разработке щеточных уплотнений является подбор такой пары трения, которая будет исключать износ ответной детали ротора и забивание щеточного уплотнения продуктами износа в случае работы двигателя на нерасчетных величинах мощности. В результате опытных работ получены щеточные уплотнения, в составе которых применялись металлические волокна систем Ni–Co и Co–Cr. Отмечено, что данные щеточные уплотнения работоспособны до температур ~500 °С (сохранение упругих и прочностных свойств) и до скоростей вращения в зоне контакта ~300 м/с (исключение износа ответной детали ротора). Применение данных уплотнений с использованием в их составе волокон системы Ni–Co позволило уменьшить утечку рабочего тела в 2 раза и сохранить их стабильными в течение всего ресурса работы. Дальнейшие исследования связаны с оптимизацией составов волокон и покрытий для ответных деталей ротора.

Следует отметить, что разработка материалов из волокон на металлической основе, получаемых методами закалки из расплава, в России и за рубежом не ограничивается их применением в авиации. Известны работы по внедрению металлических волокон в фильтры в качестве нетканых иглопробивных пористых проницаемых

материалов, в пористые проницаемые носители катализаторов для каталитических источников тепла, в катализаторы синтеза аммиака, а также для изготовления композиционных волокнистых материалов и т. д.

Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. С. 278–280.
2. 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.-техн. журн. 2014. №7. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-2-2.
3. 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.
4. Sun F.G., Chen H.L., Wu J.H., Feng K. Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures // Applied Acoustics. 2010. Vol. 711. P. 221–235. DOI: 10.1016/J.APACOUST.2009.09.001.
5. Felten E.J. Use of platinum and rhodium to improve oxide adherence on Ni–8Cr–6Al alloys // Oxidation of Metals. 1976. Vol. 10. No. 1. P. 23–28.
6. Allam I.M., Akuezue H.C., Whittle D.P. Influence of Small Pt Additions on Al₂O₃ Scale Adherence // Oxidation of Metals. 1980. Vol. 14. No. 6. P. 517–530. DOI: 10.1007/BF00611696.
7. 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. DOI: 10.1023/B:OXID.0000038784.73316.A4.
8. 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. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.492-493.21.
9. Heidloff A.J., Tang Z., Zhang F., Gleeson B.C. A combined mapping process for the development of platinum-modified Ni-based superalloys // The Journal of the Minerals. 2010. Vol. 62. P. 48–53. DOI: 10.1007/s11837-010-0156-x.
10. Ballard D.L., Plichak A.L. The use of precious-metal-modified Nickel-based superalloys for thin gage applications // The Journal of the Minerals. 2010. Vol. 62. P. 45–47.
11. Amano T., Takezawa Y., Shiino A., Shishido T. Surface morphology of scale on FeCrAl (Pd, Pt, Y) alloys // Journal of alloys and Compounds. 2008. Vol. 452. Issue 1. P. 16–22. DOI: 10.1016/J.Jallcom.2007.01.170.
12. Amano T. High-temperature oxidation of FeCrAl (Y, Pt) alloys in oxygen-water vapour // Materials at high temperatures. 2011. Vol. 28. Issue 4. P. 342–348. DOI: 10.3184/096034011X13190156331030.
13. Amano T. High-temperature oxidation resistance of Al₂O₃-forming heat-resisting alloys with noble metal and rare earth additions // Materials and Corrosion. 2011. Vol. 62. No. 7. P. 659–667. DOI: 10.1002/MACO.201005855.
14. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П. Исследование основных эксплуатационных свойств нового класса уплотнительных материалов для проточного тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2011. №3 (20). С. 15–20.
15. Buznik V.M., Kablov E.N. Arctic materials science: current state and prospects // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. Vol. 87. No. 5. P. 397–408.
16. Simms N.J., Norton J.F., McColvin G. Performance of candidate gas turbine abraadeable seal materials in high temperature combustion atmospheres // Materials and Corrosion. 2005. Vol. 56. P. 765–777. DOI: 10.1002/maco.200503877.
17. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Рыльников В.С., Фарафонов Д.П. Технология пайки пористо-волокнистого материала из сплава типа «фехраль» для уплотнения проточной части ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-2-2.

18. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Сараев А.А., Лещев Н.Е. Истираемость и эрозионная стойкость уплотнительных материалов проточной части ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №8 (68). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
19. Каблов Е.Н., Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Муравская Н.П. Оценка соответствия новых материалов с использованием СО и МИ высокого уровня // Компетентность. 2017. №2 (143). С. 40–46.
20. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
21. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Петрова А.П. Полимерный звукопоглощающий материал-конструкция для снижения шума на местности авиационных двигателей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №2 (62). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-6-6.
22. Mahaptara R.N., Varma S.K., Lei C.S. Thermal Stability and Oxidation Resistance of Pt–10Al–4Cr Alloy at Super-High Temperatures // Oxidation of Metals. 2006. Vol. 66. No. 3/4. P. 127–135. DOI: 10.1007/s11085-006-9020-3.
23. Odusote J.K., Cornish L.A., Chown L.H., Erasmus R.M. Isothermal Oxidation Behaviour of a Two-Phase γ/γ' Precipitation-Hardened Quaternary Pt-Based Alloys in Air at 1,350 °C // Oxidation of Metals. 2012. Vol. 78. P. 123–143. DOI: 10.1007/s11085-012-9295-5.
24. Шульдешов Е.М. Звукоизоляционные свойства авиационных теплозвукоизоляционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №12 (84). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-37-45.
25. Борисов Б.В. Разработка технологии получения волокон и пористых материалов из жаростойких сплавов методом экстракции висящей капли расплава: дис. ... канд. техн. наук. М.: Моск. авиац.-технол. ин-т, 2011. С. 21–25.
26. Летников М.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г., Бакрадзе М.М. Влияние скорости охлаждения при закалке на микроструктуру и свойства жаропрочного деформируемого никелевого сплава ВЖ175-ИД // Авиационные материалы и технологии. 2019. №2 (55). С. 21–30. DOI: 10/18577/2071-9140-2019-0-2-21-30.