

УДК 621.775.8:62-758.34

Д.П. Фарафонов¹, В.П. Мизунов¹, М.Л. Деговец¹, Р.Ш. Алешина¹

ПОРИСТОВОЛОКНИСТЫЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-1-1

Представлены результаты проведенных в ВИАМ работ, направленных на создание эффективного звукопоглощающего материала из металлических волокон для высокотемпературных звукопоглощающих конструкций (ЗПК) авиационных газотурбинных двигателей.

Пористоволокнистые металлические материалы (ПВММ) являются одними из наиболее перспективных материалов для ЗПК. Они обладают эффективными поглощающими свойствами, которые практически не зависят от уровня звукового давления в потоке и обеспечивают снижение шума в широкой области частот.

Помимо высокой акустической эффективности звукопоглощающие материалы для авиационных газотурбинных двигателей должны обладать высокой температурной и коррозионной стойкостью, прочностью и низкой плотностью. Результаты проведенных в ВИАМ исследований показывают, что из металлических волокон возможно создание звукопоглощающего материала, удовлетворяющего всем этим требованиям.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.7. «Металлические пористоволокнистые материалы для звукопоглощающих конструкций» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: *металлические волокна, звукопоглощающие конструкции, авиационный двигатель, высокопористые металлические материалы.*

The article presents the results of VIAM efforts aimed at creating an effective sound-absorbing material made of metal fibers for high-temperature sound-absorbing structures of aviation gas turbine engines (SAS).

Porous fibrous metal material (PFMM) is one of the most challenging materials for SAS. Their high level of the absorption properties, which are almost self-contained under stream sound pressure, can provide noise reduction within a wide frequency range of the sound vibrations.

In addition to high acoustic efficiency of the sound absorbing materials for aircraft gas turbine engines they have to possess high heat and corrosion resistance, high strength with low specific weight. The results of VIAM studies show that with the help of the metal fibers it is possible to create the sound-absorbing material with the characteristics named above.

Research is executed within implementation of the complex scientific direction 15.7. «Metal porous-fibrous materials for sound-proof structures» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: *metal fiber, sound-absorbing structure, aircraft engine, high-porous metal materials.*

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

Проблема снижения уровня авиационного шума является одной из основных экологических проблем защиты окружающей среды от воздействия авиации. Главным источником шума при взлете и посадке самолета является авиационный двигатель. Разработке эффективных звукопоглощающих материалов и звукопоглощающих конструкций (ЗПК) для снижения уровня шума от авиационных двигателей посвящен ряд работ, выполненных в ВИАМ [2–4].

Пористые металлические материалы давно получили широкое применение в энергомашиностроении, авиационной, химической, нефтяной, пищевой, металлургической и других отраслях промышленности. Благодаря своим поглощающим свойствам за счет проницаемой структуры они активно используются в качестве глушителей шума. В звукопоглощающих конструкциях широко применяют пористые слои из перфорированных листов с плотно прилегающими к ним густыми металлическими сетками. Однако в акустическом отношении такие пористые слои уступают пористым материалам из металлических волокон, обладающим высокими поглощающими свойствами, которые практически не зависят от уровня звукового давления в потоке и обеспечивают снижение шума в широкой области частот благодаря эффекту вязкого трения.

В силу привлекательности пористоволокнистых материалов по звукопоглощающим свойствам делались неоднократные попытки их внедрения в систему шумоглушения авиационного двигателя. Практическое их применение, однако, наталкивается на сложности с обеспечением требуемых эксплуатационных характеристик – температуры, прочности, коррозионной стойкости и т. д. Кроме того, большое значение имеет плотность ЗПК для авиационного двигателя, что также накладывает определенные требования при выборе звукопоглощающего материала. Из-за указанных причин для снижения шума, распространяющегося по каналам авиационного двигателя, в основном применяются ЗПК, включающие перфорированный лист и воздушную полость за ним с сотовым наполнителем. Такие конструкции относятся к резонансному типу глушителей шума. Обычно они имеют высокую акустическую эффективность в довольно узком диапазоне частот, не превышающем одной октавы, в отличие от пористых гомогенных материалов [5, 6].

Эксплуатационные свойства пористоволокнистого металлического материала (ПВММ) во многом зависят от материала, из которого изготовлены волокна. Для обеспечения работоспособности ПВММ в условиях горячего тракта авиационных ГТД волокна должны иметь стойкость к высокотемпературному окислению и коррозии.

Наиболее прогрессивным методом получения металлических волокон из жаростойких и коррозионностойких сплавов является бесфильтровая разливка металла на охлаждаемую поверхность. Его разновидностью является метод экстракции висящей капли расплава (ЭВКР), позволяющий изготавливать волокна с заданными размерами из большинства сплавов, в том числе из тугоплавких и химически активных металлов.

Одновременно с высокой жаростойкостью и коррозионной стойкостью волокна для получения высокопористых звукопоглощающих материалов должны обладать прочностью и пластичностью, что позволяет проводить прессование и прокатку ПВММ и обеспечивать стойкость материала к воздействию скоростных потоков газа.

Многие известные жаростойкие сплавы, содержащие в своем составе большое количество алюминия, не позволяют получать волокна с необходимой пластичностью. Например, разработанные в ВИАМ сплавы типа ВКНА на основе интерметаллидов NiAl и Ni₃Al отличаются высокой жаропрочностью и исключительной стойкостью к окислению при температурах до 1200°C, что позволило применить их для получения деталей авиационных ГТД, работающих при максимальных температурах [1, 7–9]. Однако, как показали проведенные в ВИАМ исследования, полученные из этих сплавов

волокна имеют практически нулевую пластичность, что не позволяет применять их в качестве исходного материала для изготовления ПВММ [10].

Наибольшее распространение для получения пластичных волокон и высокотемпературных пористых материалов из них получили сплавы на основе системы Me–Cr–Al, где Me: Fe, Ni или Co. Такие сплавы при их дополнительном легировании редкоземельными металлами позволяют изготавливать волокна толщиной от 15 мкм, способные выдерживать температуры до 900°C и выше.

Основными направлениями развития высокотемпературных ПВММ в мире являются: разработка новых технологий получения волокон и пористых материалов из них с высоким уровнем эксплуатационных свойств и низкой стоимостью, а также поиск сплавов и защитных покрытий, обеспечивающих повышение рабочих температур ПВММ [10–15].

Материалы и методы

Жаростойкость тонких металлических волокон является основным фактором, определяющим возможность использования ПВММ в условиях высоких температур. В связи с тем, что волокна для изготовления высокопористого материала, обладающего наибольшей акустической эффективностью и низкой плотностью, имеют толщину не более 50 мкм, они должны изготавливаться из сплавов с наибольшей жаростойкостью, сочетающейся с пластичностью и коррозионной стойкостью.

При разработке звукопоглощающих ПВММ в ВИАМ для получения волокон использовали метод экстракции висящей капли расплава (ЭВКР), осуществляемый во ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского» и ФГНУ «Научный центр порошкового материаловедения» (г. Пермь). Сущность метода заключается в плавлении торца вертикально расположенного стержня материала и приведении сформированной капли расплава в контакт с вращающимся теплоприемником. На рабочей кромке последнего происходит охлаждение материала со скоростью до миллиона градусов в секунду и затвердевание в виде волокна толщиной 30–150 мкм с формированием микрокристаллической и аморфной структуры.

Благодаря сверхвысоким скоростям охлаждения получаемые материалы обладают повышенными механическими характеристиками и исключительной структурной однородностью. Плавление материала бесконтактным способом наряду с возможностью использования инертной атмосферы или вакуума обеспечивает чистоту получаемого материала и стабильность его химического состава.

Методом ЭВКР в МАТИ получены волокна из коррозионностойкой стали, никрома и других жаростойких сплавов, которые позволили разработать материалы с рабочими температурами до 750°C.

Характерной особенностью пористоволокнистых материалов является их сильно развитая поверхность. Точно определить величину удельной поверхности данных материалов сложно, поэтому существующие методы оценки жаростойкости к этим материалам не применимы [16].

Методика определения жаростойкости пористоволокнистых материалов основана на определении относительного изменения массы образца при воздействии на него температуры в течение определенного промежутка времени в воздушной атмосфере. При разработке звукопоглощающих ПВММ кроме жаростойкости проводили лабораторные исследования их коэффициента звукопоглощения, коррозионной стойкости, плотности и пористости.

Исследования коррозионных свойств ПВММ включали испытания в камерах солевого тумана и тропического климата, испытания на сульфидно-оксидную, хлоридную коррозию и др.

Определение коэффициента звукопоглощения (α) проводили двухмикрофонным методом, называемым также методом передаточной функции, с помощью импедансной трубы в диапазонах частот от 100 до 10000 Гц.

Акустическую эффективность ПВММ исследовали во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» и 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

В результате выполненных в ВИАМ работ по созданию ПВММ для высокотемпературных ЗПК разработан ряд материалов из металлических волокон. Материалы с условными марками ШВ-1, ШВ-2 и ШВ-3 отличаются технологиями их получения, плотностью, пористостью и рабочими температурами. Все материалы прошли стендовые испытания и готовы к опробованию в составе натуральных изделий.

Вначале при создании пористоволокнистого звукопоглощающего материала разработали технологию получения материала марки ШВ-1 с использованием методов, применяемых в порошковой металлургии. Из волокон коррозионностойкой стали толщиной 20–40 мкм и длиной 200–1500 мм, изготовленных методом ЭВКР, получили пористый материал для ЗПК на рабочие температуры 400–500°C.

Технологическая схема получения ПВММ включала:

- изготовление металлического волокна;
- формирование заготовок в пресс-формах;
- спекание заготовок в вакуумных печах;
- резка заготовок;
- пайка заготовок к металлической основе.

По приведенной схеме изготовили панели из ПВММ размером 250×400 мм, толщиной 2, 6 и 10 мм и пористостью 70 и 90%.

Для исследования акустической эффективности панелей на основе ПВММ из волокон коррозионностойкой стали проведены испытания во ФГУП «ЦИАМ» на стенде У-96Т в диапазоне частот 800–10000 Гц при числе $M=0,35-0,4$ (число Маха – отношение скорости потока к скорости звука) и уровне звукового давления 110–150 дБ. В результате исследований установлено, что панели из ПВММ на основе волокон коррозионностойкой стали являются достаточно широкополосными с равномерным спектром поглощения. Так, в диапазоне частот шириной три октавы (1000–6300 Гц) средняя эффективность двухсторонней облицовки составляет 1,1–2,2 дБ.

В дальнейшем для рабочих температур до 600°C и выше разработан ПВММ для ЗПК марки ШВ-2 на основе волокон из нихрома (Х20Н80) толщиной 20–40 мкм и длиной не менее 500 мм.

Для получения ПВММ из волокон нихрома совместно с ФГНУ «Научный центр порошкового материаловедения» разработана технология получения панелей с использованием методов расчеса, иглопробивной обработки волоконной массы и последующего спекания.

Предложенная технология позволяет получать проницаемые материалы с заданной пористостью и параметрами поровой структуры, исключив процесс прессования, а использование иглопробивной обработки, осуществляемой на иглопробивном устройстве, обеспечивает высокую механическую прочность готового материала с помощью дополнительного скрепления ПВММ отдельными составляющими его волокнами, а также позволяет осуществлять крепление одного холста к другому, тем самым увеличивая толщину конечного листа, и послойно изменять его плотность.

Панели ПВММ из волокон сплава X20H80 представлены на рис. 1.

Полученный по этой технологии материал может подвергаться механической обработке и калибровке на прессе под необходимые размеры при сохранении равномерной структуры, а также крепиться к металлическим листам с помощью пайки.

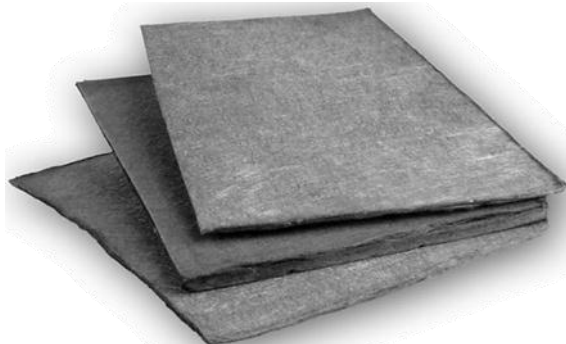


Рис. 1. Панели пористоволокнистого металлического материала (ПВММ) из волокон сплава X20H80

Кроме того, по приведенной технологии получены экспериментальные образцы материала в виде полуколец толщиной до 20 мм (рис. 2), предназначенные для применения в глушителе вспомогательных силовых установок (ВСУ). Проведены всесторонние исследования физических и акустических свойств образцов такого материала с пористостью от 85 до 95%, в том числе с градиентной пористостью и в сочетании с металлическими сотами.



Рис. 2. Пористоволокнистый металлический материал (ПВММ) марки ШВ-2 для применения в звукопоглощающей конструкции глушителя вспомогательной силовой установки

На основе результатов испытаний различных типов конструкционных образцов на жаростойкость, твердость, плотность, пористость и коэффициент звукопоглощения сделан вывод, что оптимальными свойствами обладают образцы на основе гомогенных однослойных ПВММ, которые имеют наиболее высокий коэффициент звукопоглощения, наибольшую жаростойкость, самую низкую плотность и максимальную пористость (95%).

На рис. 3 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.

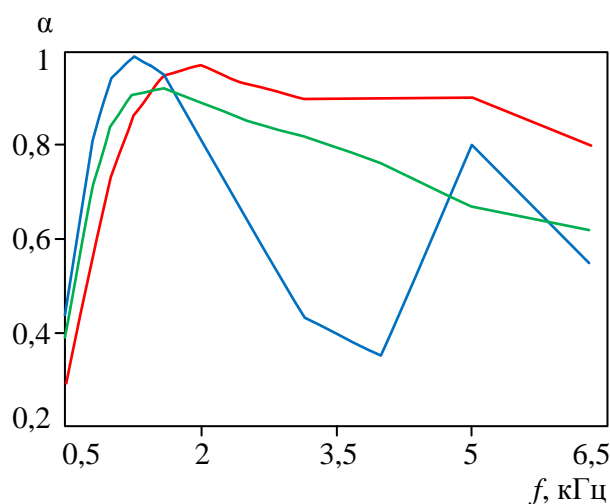


Рис. 3. Коэффициент звукопоглощения α образцов звукопоглощающей конструкции на основе пористоволокнистого металлического материала (ПВММ):

— ПВММ (толщина 3 мм, пористость 85%)+сотовый наполнитель (толщина 40 мм);
 — ПВММ толщиной 22 мм с пористостью 90%; — градиентный ПВММ толщиной 26 мм с пористостью 85, 90 и 95%

По результатам проведенных сравнительных исследований акустических характеристик на стенде У-96Т (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова») установлено, что ЗПК на основе ПВММ являются существенно более широкополосными по сравнению с резонансными конструкциями и характеризуются равномерным спектром поглощения на частотах выше 1,6 кГц с эффективностью 6–8 дБ.

По весовым характеристикам ПВММ из волокон нихрома (рис. 4) соответствует металлическому сотовому наполнителю – масса 1 м² такого материала с пористостью 95% при толщине 10 мм составляет 4 кг.

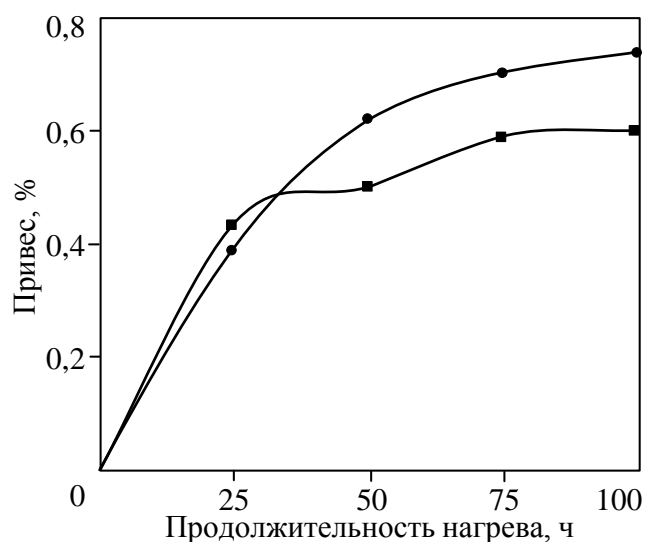


Рис. 4. Результаты испытаний материала марки ШВ-2 с пористостью 85 (●) и 95% (■) на жаростойкость при температуре 600°C

Исследования коррозионной стойкости материала с условной маркой ШВ-2 на основе волокон нихрома, проведенные на образцах, вырезанных из панелей толщиной 10 мм, при температурах 450 и 600°C по методике ускоренных циклических испытаний

с распылением 3%-ного раствора NaCl показали, что коррозионная стойкость образцов с увеличением пористости несколько снижается, оставаясь на удовлетворительном уровне. При испытаниях в камере тропического климата и в условиях повышенной влажности и действия температур (450 и 600°C) материал также обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью.

Как показали дальнейшие исследования, с использованием технологии получения волокон методом ЭВКР возможно создание пористоволокнистого металлического материала из волокон жаростойких сплавов с еще меньшей плотностью и необходимыми свойствами для его применения в качестве наполнителя высокотемпературных ЗПК авиационных двигателей.

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 $\sim 0,05$ г/см³ и достаточную для его дальнейшей обработки механическую прочность, которая обеспечивается путем механического сцепления волокон вследствие их перегибов и образования очагов спекания волокон из-за наличия на их поверхности расплава (рис. 5).



Рис. 5. Пористый материал из волокон сплава типа X23Ю5, полученный методом экстракции висящей капли расплава (а), и его структура (б)

Из волокон сплава типа X23Ю5 (системы Fe–Cr–Al) методом ЭВКР получены холсты, которые используют для разработки и изготовления опытной партии материала-наполнителя ЗПК сверхнизкой плотности марки ШВ-3. Совместно с Научно-исследовательским институтом нетканых материалов (АО «НИИНМ», г. Серпухов) изготовлена опытная партия матов толщиной до 20 мм с плотностью 0,2–0,3 г/см³ и пористостью >95% из заготовок (холстов), полученных методом ЭВКР.

По результатам проведенных испытаний коррозионной стойкости и жаростойкости ПВММ марки ШВ-3 может эксплуатироваться при рабочей температуре до 700°C и выше – привес образцов этого материала не превышает 1,1% за 100 ч при температуре 700°C.

По результатам испытаний на общую коррозионную стойкость в условиях камеры солевого тумана и промышленной атмосферы установлено, что ПВММ марки ШВ-3 в исходном состоянии и после нагревов при температуре 700°C обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью. Следует отметить, что коррозионная стойкость образцов ПВММ в камере солевого тумана и в условиях промышленной атмосферы повышается при предварительном термостатировании образцов (непродолжительной выдержке при 700°C), что можно объяснить защитными свойствами оксидов, образующихся на поверхности волокон (рис. 6).

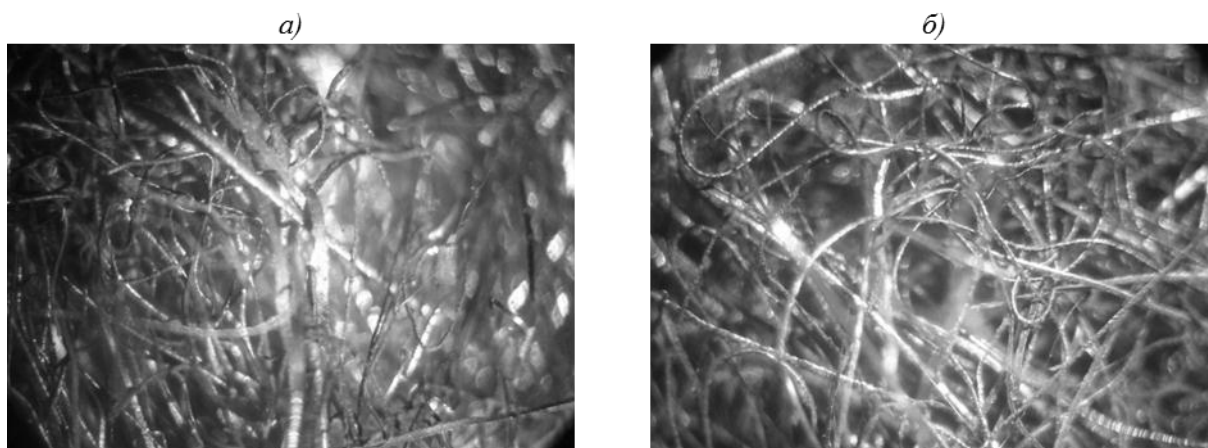


Рис. 6. Вид образцов ($\times 16$) пористоволокнистого металлического материала (ПВММ) после 6 мес испытаний в промышленной атмосфере – вид отдельных волокон ПВММ без нагрева (а) и после термостатирования при 700°C (б)

Такой материал при малой плотности имеет достаточную прочность и упругость – его применяют в качестве наполнителя высокотемпературных ЗПК для авиационных двигателей. Материал легко обрабатывается, а его высокая пластичность и упругость обеспечивают возможность заполнения рабочего пространства ЗПК любой конфигурации и радиуса, что исключает необходимость припаивания или крепления наполнителя к металлической основе.

На рис. 7 представлены результаты сравнительных испытаний образцов из материала марки ШВ-3 по определению коэффициента звукопоглощения в диапазоне частот 500–6400 Гц. Испытывали образцы толщиной 15 мм из материала с пористостью 95–97% и комбинированные образцы из материала марки ШВ-3 с входным слоем из тонкой металлической сетки.

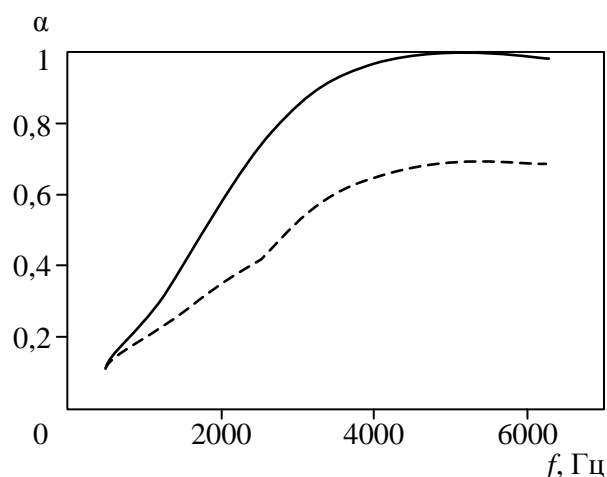


Рис. 7. Коэффициент звукопоглощения α образцов из гомогенного пористоволокнистого металлического материала (ПВММ) (---) и из ПВММ в сочетании с одним слоем густой металлической сетки марки С450 (—) в диапазоне частот 500–6400 Гц

Результаты последующих 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 использование металлической сетки в большинстве случаев не приводит к сколько-нибудь заметному изменению эффективности ЗПК. Вместе с тем

влияние входного перфорированного покрытия даже с большим процентом перфорации при наличии высокоскоростного потока оказывает заметное влияние на входное сопротивление конструкций, особенно на частотах вблизи максимума затухания, и его необходимо учитывать при конструировании глушителя с использованием ПВММ. Конструкции на основе матов сверхнизкой плотности с входным перфорированным слоем 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 <1000 Гц затухание не превышает 4 дБ. В области высоких частот >5000 Гц затухание составляет 5–6 дБ.

В таблице приведены свойства всех звукопоглощающих ПВММ, разработанных в ВИАМ.

Эксплуатационные свойства звукопоглощающих пористоволокнистых металлических материалов (ПВММ), разработанных в ВИАМ

Марка ПВММ	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Максимальная рабочая температура, °С	Акустическая эффективность (затухание) при числе Маха 0,32–0,42 и уровне звукового давления 110–150 дБ
ШВ-1	0,8–1,2	70–90	500	1,1–2,2 дБ в области частот 1,0–6,3 кГц
ШВ-2	1,2–0,4	85–95	600	6–8 дБ в области частот 1,6–6,3 кГц
ШВ-3	0,25–0,4	95–98	750	14–17 дБ в области частот 2,0–2,5 кГц; 4 дБ в области частот <1 кГц; 5–6 дБ в области частот 5–10 кГц

Обсуждение и заключения

По результатам проведенных в ВИАМ научно-исследовательских работ, направленных на разработку ПВММ для ЗПК авиационных ГТД, можно сделать следующие выводы:

– ПВММ марок ШВ-1, ШВ-2 и ШВ-3 и ЗПК на основе этих ПВММ обладают высокой акустической эффективностью в широком диапазоне частот и превосходят по эффективности традиционные конструкции на основе сотовых заполнителей и конструкции активно-резонансного типа, сочетающие слои из пористого материала с металлическими сотами;

– оптимальным сочетанием свойств обладают конструкции на основе гомогенных однослойных ПВММ с пористостью 95% и плотностью 0,4 г/см³;

– по уровню коррозионной стойкости и жаростойкости ПВММ, разработанные в ВИАМ, могут применяться в ЗПК авиационных ГТД с рабочими температурами до 700–750°С;

– применение метода ЭВКР для получения металлических волокон позволяет изготавливать ПВММ со сверхнизкой плотностью – от 0,3 г/см³ и ниже, обладающих необходимым комплексом свойств для создания эффективных ЗПК.

В сотрудничестве с МАТИ и АО «НИИИМ» (г. Серпухов) в ВИАМ изготовлена опытная партия матов из ПВММ сверхнизкой плотности (0,2–0,3 г/см³), предназначенных для проведения испытаний в составе глушителя ВСУ самолета МС-21, однако испытания пока не проведены.

Пористоволокнистые металлические материалы (ПВММ) по сравнению с другими пористыми материалами (из металлических порошков, керамики, минеральной ваты, полимерной и металлической пены и пр.) обладают оптимальным сочетанием свойств, требующихся для гомогенного глушителя шума ЗПК авиационного двигателя. Помимо высокой акустической эффективности они характеризуются высокой прочностью, сочетающейся с пластичностью, высокой пористостью (до 98%), низкой плотностью. Благодаря использованию волокон из жаростойких и коррозионностойких сплавов пористоволокнистые металлические материалы могут длительно использоваться при температурах до 700°С и выше.

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.
2. Мигунов В.П., Ломберг Б.С. Пористоволокнистые металлические материалы для звукопоглощающих и уплотнительных конструкций / В кн.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 270–275.
3. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л. Пористоволокнистый материал сверхнизкой плотности на основе металлических волокон // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 38–41.
4. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П. Изготовление пористоволокнистого материала сверхнизкой плотности для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4. С. 26–30.
5. 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.
6. Халецкий Ю.Д. Эффективность комбинированных глушителей шума авиационных двигателей // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58. №4. С. 556–562.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Литейные конструкционные сплавы на основе алюминиды никеля // *Двигатель*. 2010. №4. С. 24–25.
8. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б., Базылева О.А., Морозова Г.И., Казанская Н.К. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al // *Металлы*. 1999. №1. С. 58–65.
9. 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: 30.07.2015).
10. 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: 30.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-2-2.
11. 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.
12. Leprince G., Alperine S., Vandenbulke L., Walder A. New high temperature-resistant NiCrAl and NiCrAl+Hf felt materials // *Materials Science and Engineering: A*. 1989. V. 120–121. part 2. P. 419–425.
13. Solntsev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. SiC–Si₃N₄–SiO₂ high temperature coatings for metal fibers sealing materials // *Glass and ceramics*. 2011. V. 68. №5–6. P. 194–196.
14. 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.
15. 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.
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.