

Д.П. Фарафонов<sup>1</sup>, В.П. Мигунов<sup>1</sup>

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОРИСТОВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА СВЕРХНИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ\*

*Представлен опыт изготовления пористоволокнистого материала из металлических волокон с использованием технологии получения волокон из расплава методом экстракции висящей капли (ЭВКР). Полученный материал характеризуется низкой плотностью, высокой акустической эффективностью и эксплуатационными свойствами, необходимыми для его применения в качестве наполнителя звукопоглощающих конструкций (ЗПК) авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).*

**Ключевые слова:** пористоволокнистый металлический материал, звукопоглощающие конструкции, газотурбинный двигатель.

D.P. Farafonov<sup>1</sup>, V.P. Migunov<sup>1</sup>

## MANUFACTURING OF POROUS FIBROUS MATERIAL OF ULTRALOW DENSITY FOR SOUND-PROOF DESIGNS OF AIRCRAFT ENGINES

*In article experience of manufacturing of porous fibrous material from metal fibers with use technology of receiving fibers by method of extraction of hanging drop of melt (EHDM) is provided. The received material is characterized by the low specific weight, high acoustic effectiveness and the service properties necessary for its application as filler of sound absorbing structures (SAS) of aviation gas turbine engines (GTE).*

**Keywords:** porous-fibrous metal material, sound absorbing structures, gas turbine engine.

---

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

Пористые металлические материалы давно получили широкое применение в энергомашиностроении, авиационной, химической, нефтяной, пищевой, металлургической и других отраслях промышленности. Благодаря своим поглощающим свойствам из-за проницаемой структуры они активно используются в качестве глушителей шума. Однако для снижения шума, распространяющегося по каналам авиационного двигателя, в основном применяются звукопоглощающие конструкции (ЗПК), включающие перфорированный лист и воздушную полость за ним с сотовым наполнителем [1, 2]. 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 – объемных поглотителей. Конструкции на основе гомогенного материала могут обладать максимально широкополосной характеристикой коэффициента звукопоглощения. Кроме того, поглощающие свойства гомогенной конструкции не зависят или слабо зависят от уровня звукового давления.

В силу привлекательности гомогенных 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 эксплуатации, прочности, коррозионной стойкости, пожаробезопасности и т. д. [2, 3]. Кроме того, большое значение имеет масса ЗПК авиационного двигателя, это также накладывает определенные требования при выборе звукопоглощающего материала.

---

\* В работе принимал участие М.Л. Деговец.

Решение проблемы создания гомогенного глушителя шума, способного эффективно работать в ЗПК авиационного двигателя, заключается в выборе исходных материалов и разработке технологий получения из них пористого материала.

Во ФГУП «ВИАМ» совместно с ФГНУ «Научный центр порошкового материаловедения» (г. Пермь) и ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского» проведены работы по созданию пористо-волоконистых металлических материалов (ПВММ) для эффективного поглощения шума в высокотемпературной зоне ГТД. По сравнению с другими пористыми материалами (из металлических порошков, керамики, минеральной ваты, полимерной и металлической пены и пр.) пористоволоконистые металлические материалы обладают оптимальным сочетанием свойств, требующихся для гомогенного глушителя шума ЗПК авиационного двигателя [4]. 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 ПВММ могут длительно использоваться при температурах до 700°C и выше [5].

В своих исследованиях авторы исходили из того, что волокна для получения высокопористого ПВММ для высокотемпературных ЗПК авиационных двигателей должны изготавливаться из жаростойких сплавов и обладать определенной величиной как по толщине, так и по длине [6].

Для получения материала с необходимой прочностью, жаростойкостью, высокой пористостью и низкой плотностью средняя длина волокон должна быть не менее 100 мм, а оптимальная толщина: 15–50 мкм.

Способы получения металлических волокон можно разделить на четыре группы: механический способ (разрезка проволоки, точение, шабрение, шевингование и др.); способ получения волокон из расплавов (фонтанирование, распыление, вытягивание из расплава и др.); химический способ (восстановление галогенидов соединений или травление металлов); способ осаждения из паров или электролитическое осаждение.

Наибольший прогресс в производстве неорганических волокон достигнут при использовании способов непосредственного их получения из расплава. К этим способам относятся перспективные высокопроизводительные методы безфильтровой разливки металла на охлаждаемую поверхность, их разновидностью является метод экстракции висящей капли расплава (ЭВКР), осуществляемый во ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского». Сущность метода заключается в плавлении торца вертикально расположенного стержня с образованием висящей капли расплава. С каплей контактирует рабочая кромка вращающегося охлаждаемого диска-теплоприемника. В зоне контакта происходит затвердевание расплава. Вследствие вращения диска затвердевший материал выносится из расплава в виде волокна и под действием центробежных сил сбрасывается с диска [7].

Волокна из нержавеющей стали и нихрома толщиной 20–40 мкм и длиной 20–500 мм, полученные методом ЭВКР, были использованы при изготовлении ПВММ толщиной до 10 мм с пористостью от 70 до 90%. Технология изготовления этого материала включала:

- изготовление металлического волокна;
- формирование заготовок в пресс-формах;
- спекание заготовок в вакуумных печах;
- резка заготовок.

Для получения ПВММ из волокон нихрома с максимальной заданной пористостью до 95%, с более равномерным распределением волокон в объеме материала и с более высокими механическими свойствами, совместно с ФГНУ «Научный центр порошкового материаловедения» разработана технология получения панелей с использованием методов расчесывания, иглопробивания волокнистой массы и последующего спекания.

Предложенная технология позволяет получать проницаемые материалы с заданной пористостью и параметрами поровой структуры, исключив процесс прессования, а использование иглопробивания, осуществляемого на иглопробивном устройстве, обеспечивает высокую механическую прочность готового материала благодаря дополнительному скреплению ПВММ отдельными составляющими его волокнами, а также поз-

воляет осуществлять крепление одного холста к другому, тем самым увеличивая толщину конечного листа, и послойно изменять его плотность.



Рис. 1. Технологическая схема получения панелей из ПВММ

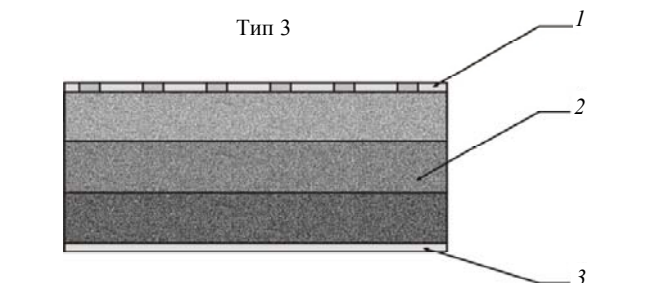
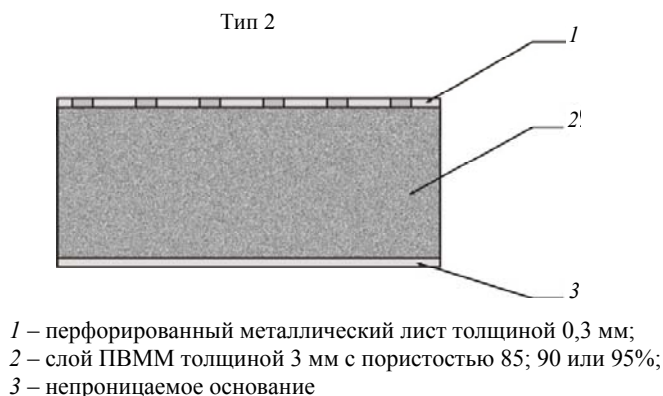
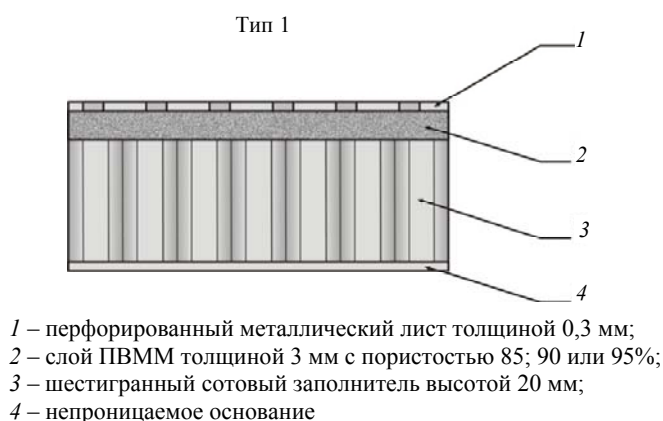


Рис. 2. Схемы конструкций панелей ПВММ на основе пористоволокнистого материала (К) на основе пористоволокнистого материала (К) на основе пористоволокнистого материала (К)

Технологическая схема получения панелей ПВММ из волокон сплава X20N80 с использованием этих методов представлена на рис. 1. Полученный по этой технологии материал может подвергаться механической обработке и калибровке на прессе под не-

обходимые размеры при сохранении равномерной структуры, а также крепиться к металлическим листам с помощью пайки.

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). На основе результатов испытаний различных типов конструкционных образцов на жаростойкость, твердость, плотность, пористость и коэффициент звукопоглощения был 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  $\alpha$  конструкционных образцов определяли на интерферометре при расположении образца по отношению к жесткой стенке без воздушного зазора.

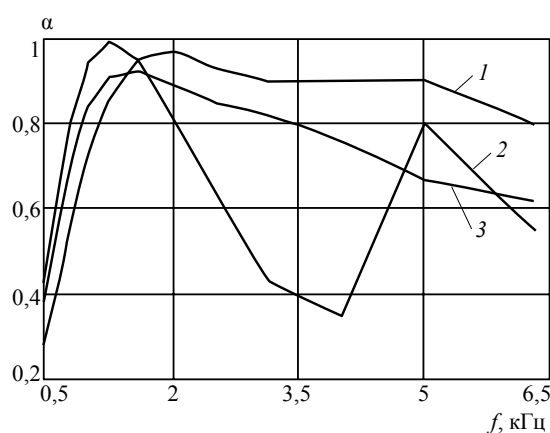


Рис. 3. Коэффициент звукопоглощения  $\alpha$  образцов ЗПК на основе ПВММ:

1 – толщина 22 мм (пористость 90%); 2 – толщина 3 мм (пористость 85%) + сотовый наполнитель (40 мм); 3 – градиентный толщиной 26 мм с пористостью по слоям 85; 90 и 95%

Следует отметить, что из волокон нихрома удалось получить материал с пористостью 95%. Это технически очень высокий результат и был получен впервые, что является большой удачей, так как позволяет сэкономить материал и снизить массу ЗПК. К тому же, как показали результаты проведенных стендовых испытаний, материал с пористостью 95% обладает наибольшей акустической эффективностью [6].

По весовым характеристикам ПВММ из волокон нихрома соответствует металлическому сотовому наполнителю (масса  $1 \text{ м}^2$  такого материала с пористостью 95% при толщине 10 мм составляет 4 кг), превосходя его по акустической эффективности.

Однако, 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 с необходимыми для применения его в качестве наполнителя высокотемпературных ЗПК авиационных двигателей свойствами.

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 холст (при оптимально подобранных параметрах процесса) имеет равномерную волокнистую структуру при средней плотности  $\sim 0,05 \text{ г/см}^3$  и достаточную для его дальнейшей обработки механическую прочность, которая обеспечивается благодаря механическому

сцеплению волокон вследствие их перегибов, а также образованию очагов припекания волокон из-за наличия на их поверхности расплава [8].

Для получения из холстов ПВММ наполнителя ЗПК сверхнизкой плотности в виде матов заданной толщины использовалась технология прокатки заготовок, собранных из нескольких волокнистых холстов. Прокатка ПВММ на двухвалковом каландре позволила получить маты толщиной до 20 мм с плотностью 0,2–0,3 г/см<sup>3</sup> и пористостью >95% с высокими звукопоглощающими свойствами (рис. 4). Технология получения матов представлена на схеме (рис. 5).



Рис. 4. Мат из ПВММ с пористостью более 95%

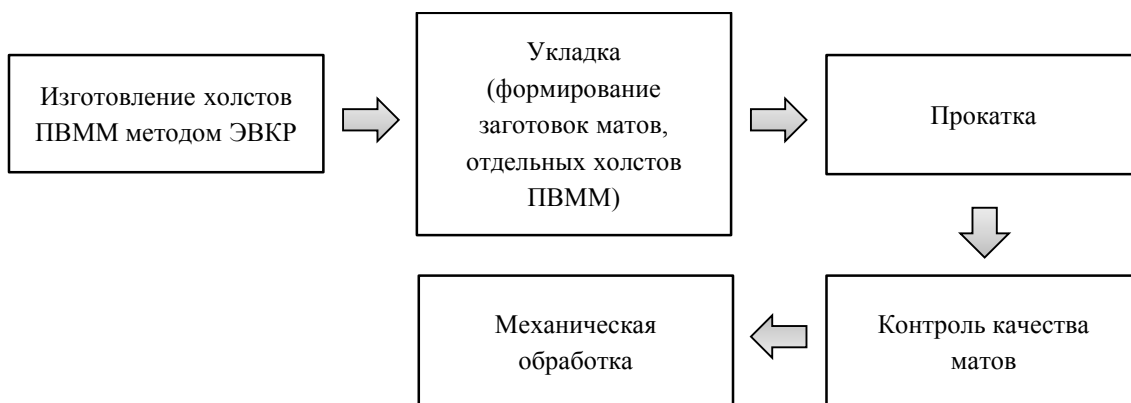


Рис. 5. Технологическая схема получения матов из ПВММ

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 припаивания или крепления наполнителя к металлической основе. При толщине 20 мм маты из ПВММ с плотностью 0,2–0,4 г/см<sup>3</sup> имеют максимальное значение коэффициента звукопоглощения  $\alpha \approx 0,5–0,7$  в основном в области высоких частот  $f \approx 3–5$  кГц. При необходимости возможно достижение более высокого звукопоглощения в расширенном диапазоне частот путем использования при изготовлении матов сверхнизкой плотности дополнительных элементов в виде перфорированных пластин или металлических сеток, увеличения толщины поглощающего слоя, уменьшения толщины волокон или с использованием материала с переменной пористостью [9].

Таким образом, проведенными исследованиями показано, что создание эффективного гомогенного глушителя шума для авиационных ЗПК, превосходящего применяемые глушители из сотового наполнителя не только по акустической эффективности, но и по весовым характеристикам, возможно с использованием технологии получения металлических волокон методом ЭВКР и простых технологических приемов, таких как

холодная прокатка и механическая обработка с использованием обыкновенных ножниц по металлу или другого инструмента.

За рубежом ПВММ постепенно становится незаменимым при создании ЗПК, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях. Например, материал из волокон нержавеющей стали был применен фирмой «Боинг» в качестве шумоглушителя в выхлопной системе вспомогательной силовой установки и звукопоглощающей облицовки основных авиадвигателей. Металлический пористоволокнистый материал начали применять для шумоглушения в автомобилях Ауди. Кроме того, звукопоглощающие материалы из алюминиевых волокон успешно применяются при строительстве шоссе, метро, туннелей, в концертных и выставочных залах [10].

Отечественные конструкторы, разрабатывающие новые самолеты и двигатели, также заинтересованы в эффективных и легких звукопоглощающих материалах. В ближайшие годы отечественный рынок гражданской авиационной техники имеет большие перспективы развития, но без новых материалов невозможно создание конкурентоспособной авиационной техники с улучшенными летно-техническими характеристиками и экологичностью [11, 12].

Обеспечить конкуренцию импортным материалам такого класса могли бы ПВММ сверхнизкой плотности, изготавливаемые по разработанной в ВИАМ технологии. Метод ЭВКР достаточно производительный, и создание производственного участка с одной установкой могло бы обеспечить получение матов сверхнизкой плотности для авиационных ЗПК в количестве, необходимом для оснащения около 100 самолетов в год.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью //Акустический журнал. 2007. Т. 53. №6. С. 861–872.
2. 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.
3. Халецкий Ю.Д. Эффективность комбинированных глушителей шума авиационных двигателей //Акустический журнал. 2012. Т. 58. №4. С. 556–562.
4. 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.
5. 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.
6. Мигунов В.П., Ломберг Б.С. Пористоволокнистые металлические материалы для звукопоглощающих и уплотнительных конструкций /В сб.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 270–275.
7. 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.
8. Борисов Б.В. Разработка технологии получения волокон и пористых материалов из жаростойких сплавов методом экстракции висящей капли расплава: Автореф. дис. к.т.н. М.: МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского. 2011. 19 с.
9. 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.
10. Zhengping X., Jilei Z., Huiping T., Qingbo A., Hao Z., Jianyong W., Cheng L. Progress of application researches of porous fiber metals //Materials. 2011. №4. P. 816–824.
11. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.

12. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.

#### REFERENS LIST

1. Sobolev A.F. Polujempiricheskaja teorija odnoslojnyh sotovyh zvukopogloshhajushhih konstrukcij s licevoj perforirovannoju panel'ju [Semiempirical theory of single-layer cellular sound-absorbing designs with the front punched panel] //Akusticheskij zhurnal. 2007. T. 53. №6. S. 861–872.
2. Sobolev A.F., Ushakov V.G., Filippova R.D. Zvukopogloshhajushhie konstrukcii gomogennogo tipa dlja kanalov aviacionnyh dvigatelej [Sound-absorbing designs of homogeneous type for channels of aviation engines] //Akusticheskij zhurnal. 2009. T. 55. №6. S. 749–759.
3. Haleckij Ju.D. Jefferktivnost' kombinirovannyh glushitelej shuma aviacionnyh dvigatelej [Effectiveness of the combined mufflers of noise of aviation engines] //Akusticheskij zhurnal. 2012. T. 58. №4. S. 556–562.
4. Sun F.G., Chen H.L., Wu J.H., Feng K. Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures [Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures] //Appl. Acoust. 2010. V. 711. R. 221–235.
5. Migunov V.P., Farafonov D.P. Issledovanie osnovnyh jekspluatacionnyh svojstv novogo klassa uplotnitel'nyh materialov dlja protochnogo trakta GTD [Research of the main operational properties of a new class of sealing materials for a flowing path of GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 15–20.
6. Migunov V.P., Lomberg B.S. Poristovoloknistye metallicheskie materialy dlja zvukopogloshhajushhih i uplotnitel'nyh konstrukcij [Porous-fibrous metal materials for sound-absorbing and sealing designs] /V sb.: 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 270–275.
7. Serov M.M., Borisov B.V. Poluchenie metallicheskih volokon i poristyh materialov iz nih metodom jekstrakcii visjashhej kapli rasplava [Receiving metal fibers and porous materials from them a method of extraction of a hanging drop of fusion] //Tehnologija legkih splavov. 2007. №3. S. 62–65.
8. Borisov B.V. Razrabotka tehnologii poluchenija volokon i poristyh materialov iz zharostojkih splavov metodom jekstrakcii visjashhej kapli rasplava [Development of technology of receiving fibers and porous materials from heat-resistant alloys a method of extraction of a hanging drop of fusion]: Avtoref. dis. k.t.n. M.: MATI–RGTU im. K.Je. Ciolkovskogo. 2011. 19 s.
9. Migunov V.P., Farafonov D.P., Degovec M.L. Poristovoloknistyj material sverhnizkoj plotnosti na osnove metallicheskih volokon [Porous-fibrous a material of ultralow density on the basis of metal fibers] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 38–41.
10. Zhengping X., Jilei Z., Huiping T., Qingbo A., Hao Z., Jianyong W., Cheng L. Progress of application researches of porous fiber metals //Materials. 2011. №4. R. 816–824.
11. Antipov V.V. Strategija razvitija titanovyh, magnievyh, berillievyh i aljuminievyh splavov [Strategy of development of titanic, magnesian, beryllium and aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 157–167.
12. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.