

УДК 629.7.023.222

Э.К. Кондрашов, В.В. Кузьмин, В.Т. Минаков, Е.А. Пономарева

НЕТКАНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН И МЕЖПЛИТОЧНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

С самого начала работы над материалами для тепловой защиты многоразового космического корабля было ясно, что плитку из кварцевого волокна невозможно крепить непосредственно на металлический корпус изделия. Требовались демпфирующие подложки. Требовались также разнообразные прокладочные материалы, в том числе термостойкие вкладыши для защиты зазоров между плитками покрытия. В ВИАМ были предложены и разработаны нетканые материалы из полимерных волокон, обладающие всеми необходимыми свойствами, – начиная от термостойкости и заканчивая высокой надежностью в условиях работы космического корабля.

Приводятся основные свойства термостойких полимерных волокон, физико-механические показатели созданных на их основе нетканых материалов АТМ-15, АТМ-16 и АТМ-19 в исходном состоянии и пропитанных гидрофобизирующей эмульсией, с нанесением на поверхность дополнительного эрозионностойкого покрытия. В результате материалам АТМ-16 и АТМ-19 были присвоены марки соответственно АТМ-16ПКП и АТМ-19ПКП. Для создания монолитной поверхности теплозащиты, межплиточные зазоры заполняли термостойким материалом в виде вкладыша (марка МТУ). Приведены свойства материалов АТМ-16ПКП и АТМ-19ПКП.

Ключевые слова: температурный коэффициент расширения, демпфирующий материал, термостойкие волокна, иглопробивной материал, физико-механические свойства, гидрофобизация материалов, эрозионностойкое покрытие, межплиточные зазоры.

From the very beginning of the development of materials for thermal protection of the reusable spaceship, it was obvious that the silica fiber tiles could not be attached directly on the metal casing of the spaceship. That is why the damping substrates were required. In addition, a variety of materials, including heat-resistant inserts for protection of gaps between the covering tiles was needed. VIAM developed a number of non-woven materials from polymer fibers, which had all necessary properties, starting from the thermal stability and up to a high reliability of operation under space conditions.

The paper describes the main properties of heat-resistant polymer fibers and physical and mechanical properties of АТМ-15, АТМ-16 and АТМ-19 non-woven materials based on these fibers in initial state, after impregnation with waterproofing emulsion and after application of an additional erosion-resistant coating. As a result, АТМ-16 and АТМ-19 materials were marked as АТМ-16PKP and АТМ-19PKP respectively. Intertiled gaps were filled with inserts from fire resistant material (marked as MTU) to provide a monolithic surface of the heat-resistant layer. The article presents properties of АТМ-16PKP and АТМ-19PKP materials.

Key words: thermal expansion coefficient, damping material, heat resistant fibers, needled felt, physical and mechanical properties, waterproofing of materials, erosion resistant coating, intertiled gaps.

Основным материалом теплозащиты при температурах до 1600°C является очень легкая плитка из супертонкого кварцевого волокна (ТЗМК), обладающая комплексом уникальных теплофизических свойств. Однако из-за большой разницы в температурном коэффициенте расширения (ТКР) алюминиевого сплава обшивки и плитки из ТЗМК, нельзя было крепить плитку на внешнюю поверхность «Бурана», – это могло бы привести к растрескиванию плитки при перепаде температур. Поэтому была поставлена задача разработать демпфирующий материал (компенсатор) для установки его между плиткой из ТЗМК и внешней поверхностью планера «Бурана».

Такой материал, приклеенный как к обшивке, так и к плитке, должен нивелировать различие ТКР между керамической плиткой и металлической поверхностью, при этом иметь низкую плот-

ность (0,15–0,20 г/см³) и термостойкость до 300°C. Схема крепления плитки к обшивке представлена на рис. 1.

С учетом этих требований и имеющихся литературных данных наиболее подходящим решением представлялось создание нетканого материала типа войлока или фетра на основе термостойких полимерных волокон, изготавливаемого иглопробивным способом. Для исследований были выбраны наиболее термостойкие волокна: фенилон (ароматический полиамид), терлон (ароматический полиамид), аримид (полиимидное волокно) и лола (волокно на основе лестничных и полулестничных полимеров).

В результате проведенных исследований и испытаний для демпфирующей подложки был разработан иглопробивной материал на основе синтетических волокон фенилон и терлон, получивший марку АТМ-15.

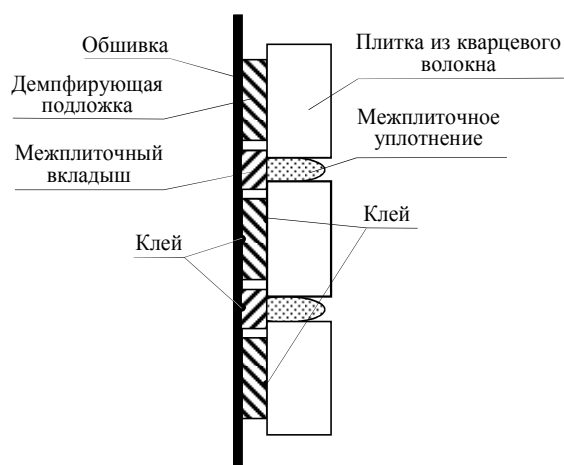


Рис. 1. Схема крепления плиток (ТЗМК) к обшивке из алюминиевого сплава

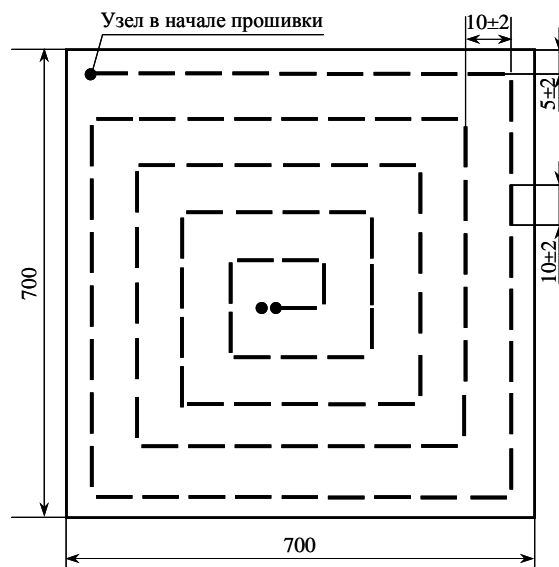


Рис. 2. Схема прошивки материала АТМ-19

Таблица 1

Основные свойства термостойких полимерных волокон

Свойства	Показатели свойств волокон				
	фенилон	сульфон-Т	терлон	аримид	лола
Прочность при разрыве, Н/текс	–	0,35–0,4	0,8–1	0,45–0,5	0,15–0,2
Удлинение при разрыве, %	20–25	16–18	8–10	6–8	15–25
Плотность, кг/м ³	1380	1450	1460	1410–1460	1450
Равновесное влагопоглощение, %	4–5	5–6	2	1–1,5	8
Усадка в воде, %	1,5	1,0	1,0	–	–
Кислородный индекс, %	28–29	28–32	29–30	38	54
Температура разложения, °С	330–370	430	500	700	>700

Таблица 2

Физико-механические свойства материалов

Наименование характеристик	Показатели характеристик материалов		
	АТМ-15	АТМ-16	АТМ-19
Толщина, мм	5,3±0,2	5,2±0,5	6–20
Поверхностная плотность, г/м ²	610±15	600±30	3000±30 (при толщине 20 мм)
Разрывная нагрузка, Н:	250 300	120 200	– –
Влажность, %	6,0	6,0	6,0
Неравномерность поверхностной плотности, %	7,0	7,0	–
Предел прочности при отрыве, МПа	0,25	0,23	0,28
Рабочий диапазон температур, °С	-130÷+300	-130÷+400	-130÷+430

Таблица 3

Свойства материала АТМ-15ПК

Наименование характеристик	Показатели характеристик
Толщина, мм	4±0,1
Объемная масса, г/см ³	0,15±0,01
Прочность при растяжении, МПа: по длине по ширине	2,2 2,03
Прочность при отрыве, МПа	0,13
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), при температуре, °С: 20 300	0,067 0,086
Гигроскопичность, % (при φ=98%)	0,5
Горючесть	Трудногорающий
Температура эксплуатации, °С	-130÷+300

Таблица 4

Свойства материалов АТМ-16ПКП и АТМ-19ПКП

Наименование характеристик	Показатели характеристик материалов	
	АТМ-16ПКП	АТМ-19ПКП
Толщина, мм	4±0,1	6÷21
Объемная масса, г/см ³	0,26–0,28	0,25–0,28
Прочность при растяжении, МПа: по длине по ширине	2 1	1,65 1,05
Прочность при отрыве, МПа	0,22	0,28
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), при 20°С	0,05	0,06
Влагопоглощение за 24 ч, % (при φ=98%)	0,5	0,5
Водопоглощение, %: флотационный контакт с водой за 15 мин за 24 ч метод принудительного погружения за 15 мин за 24 ч	-1,5 2,5 7 20	1,6 3 8 20
Горючесть	Трудногорающий	Трудногорающий
Температура эксплуатации, °С	-130÷+430	-130÷+430



Рис. 3. Лазерная установка для раскроя материала АТМ-15ПК

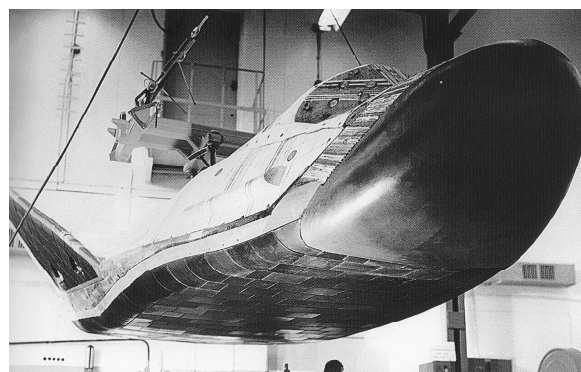


Рис. 4. Модель «Бор-4»

Положительные результаты при создании иглопробивного материала АТМ-15 позволили разработать материалы такого же типа, но на основе более термостойких полимерных синтетических волокон аримид и лолы (табл. 1).

Такие материалы были необходимы для использования в качестве межплиточных вкладышей и самостоятельной теплозащиты – на участках изделия с температурой разогрева до 400°C – вместо трудоемкой и дорогостоящей плитки ТЗМК для части крыла и боковых поверхностей фюзеляжа.

Разработанным материалам присвоены марки АТМ-16 и АТМ-19.

Материал АТМ-16 предназначен для использования в качестве межплиточного вкладыша и устанавливается по периметру плиток. Материал АТМ-19 использовался в качестве самостоятельной теплозащиты боковых поверхностей изделия.

Физико-механические свойства нетканых материалов АТМ-15, АТМ-16 и АТМ-19 приведены в табл. 2.

Материалы АТМ-15, АТМ-16, АТМ-19 соответствовали предъявленным требованиям по физико-механическим свойствам.

Однако, учитывая особенности изготовления и применения материала АТМ-19 как отдельного элемента теплозащиты, с целью повышения прочности при отрыве по толщине необходимо было осуществить прошивку полотна АТМ-19, для чего его раскраивали и разрезали на заготовки размером 700×700 мм. Прошивку проводили по прилагаемой схеме (рис. 2) технической нитью марки Аримид Т-160 с линейной плотностью 100 текс. Толщина материала АТМ-19 может быть в пределах 13–26 мм, прочность при разрыве в поперечном направлении не менее 19,6 Н/см².

Иглопробивные материалы имеют пористую структуру, поэтому интенсивно впитывают влагу (до 600%), что увеличивает их объемную массу и снижает теплоизоляционные свойства, т. е. они не отвечают требованиям по влагопоглощению при условиях эксплуатации в открытой атмосфере. Поэтому возникла необходимость гидрофобизации материалов АТМ-15, АТМ-16, АТМ-19. Проведенные исследования целого ряда гидрофобизаторов позволили сделать выбор – лучшие результаты были получены при использовании эмульсии КЭ-37-18. Одновременно с этим возникла необходимость стабилизировать рыхловолокнистую структуру иглопробивных материалов по толщине, для чего был применен метод калибровки: исходные материалы АТМ-15, АТМ-16 и АТМ-19, пропитанные эмульсией КЭ-37-18, помещали под плиты пресса, снабженного металлическими ограничителями заданной толщины, и создавалось давление, при котором плиты плотно зажимались между ограничителями.

После стабилизации давления проводили термофиксацию заготовки. В результате материалу АТМ-15 была присвоена марка АТМ-15ПК – пропитанный калиброванный. Свойства материала

АТМ-15ПК приведены в табл. 3.

Для раскроя материала АТМ-15ПК с целью получения демпфирующих подложек требуемого размера была изготовлена лазерная установка специальной конструкции (рис. 3).

Материал АТМ-16 предназначен для использования в качестве межплиточного вкладыша, а материал АТМ-19 – в качестве боковой теплозащиты, поэтому, кроме пропитки для защиты от аэродинамического нагрева и дополнительной защиты от увлажнения, на поверхность этих материалов наносили эрозионностойкое покрытие – герметик УФ-11-21. В результате материалам АТМ-16 и АТМ-19 были присвоены марки соответственно АТМ-16ПКП и АТМ-19ПКП (пропитанный, калиброванный с покрытием). Свойства этих материалов приведены в табл. 4.

Конструктивно плитки ТЗМК крепятся на поверхности металлического силового каркаса изделия с зазором до 4 мм. Для создания монолитной поверхности теплозащиты, устойчивой к аэродинамическому нагреву, межплиточные зазоры должны быть заполнены термостойким (до 1200°C) материалом в виде вкладыша. Такой материал тоже был разработан – он представляет собой формованную пластину из кварцевого волокна и неорганического связующего (марка материала МТУ с размером пластины 150×25×35 мм, где 150 – длина; 25 – ширина уплотнительной части; 35 – ширина крепежного хвостовика).

Свойства материала МТУ контролируются по размерно-весовым характеристикам. Разработанные материалы АТМ-15ПК, АТМ-16ПКП, АТМ-19ПКП и МТУ прошли тепловые испытания в ЛИИ в условиях лучистого нагрева и в аэродинамической трубе. Были получены положительные результаты, и материалы рекомендованы для комплектации на изделия.

Плиточная теплозащита (см. рис. 1) корабля «Буран» была испытана при условиях, имитирующих вход в атмосферу с орбиты ИСЗ (искусственного спутника Земли), на специально созданных моделях «Бор-4» (рис. 4).

После приводнения модели в акватории Индийского океана, его подъема на борт боевого корабля ВМФ и осмотра было установлено, что вся плиточная теплозащита находится в отличном состоянии и выбранная схема крепления плиток (см. рис. 1) с использованием материалов АТМ-15ПК и АТМ-16ПКП может быть применена для летных вариантов МКС «Буран» [13].

Статья подготовлена по результатам работ, проведенных под руководством д.т.н. Э.К. Кондрашова, к.т.н. В.Т. Минакова и начальников лаборатории к.т.н. В.Г. Набатова, а в последующем д.т.н. Б.Н. Морина. В исследовании принимали участие: К.К. Борисова, к.т.н. Е.Г. Сурнин, Н.А. Полепкина, Н.К. Грибкова, Е.А. Пономарева, А.С. Семенова, Е.Е. Муханова, И.В. Тихонова и Л.Л. Полстянко.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
3. Тинякова Е.В., Гращенков Д.В. Теплоизоляционный материал на основе муллито-корундовых и кварцевых волокон //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 43–47.
4. Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых космических аппаратов. М.: ЗАО ТФ Мир. 2003. 671 с.
5. Авиационные материалы: Справочник в 12-ти томах. Т. 9. Теплозащитные, теплоизоляционные и композиционные материалы, высокотемпературные неметаллические покрытия. М.: ВИАМ. 2011. С. 31.
6. Гусева А.И. Комплексные исследования теплофизических характеристик теплозащитно-теплоизоляционных материалов длительного и многоразового применения: Автореф. дис. к.т.н. М. 1981. С. 20.
7. Исследование гибкой многоразовой теплозащиты: Обзор № 611. М.: ЦАГИ. 1982. С. 44–49.
8. Усовершенствование свойств фетра АТМ-15 с целью повышения качества: Технич. отчет. М.: ВИАМ. 1984. С. 28.
9. Масленников К.Н. Химические волокна: Словарь-справочник. М.: Химия. 1973. 192 с.
10. Разработка фетра из синтетических волокон: Технический отчет. М. 1977. С. 45.
11. Савенкова А.В., Тихонова И.В., Требукова Е.А. Тепломорозостойкие герметики /В сб.: Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков: науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 1994. С. 432–439.
12. Волокнистый войлок – конструкционный материал низкой плотности //Р.Ж. Машиностроение. М: ВИНТИ. 1983. С. 168.
13. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. акад. РАН Е.Н. Каблова. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.