

УДК 678.6:62-762

Ю.А. Ивахненко¹, Б.В. Баруздин¹, Н.М. Варрик¹, В.Г. Максимов¹

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЛОКНИСТЫЕ УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-272-289

В настоящее время одним из востребованных типов материалов являются уплотнительные материалы для работы при высоких температурах. Представлены материалы для высокотемпературных уплотнений, разработанные как за рубежом, так и в России – в частности во ФГУП «ВИАМ». Рассмотрены свойства материалов, методы их получения и области применения.

Ключевые слова: уплотнения, керамические волокна, шнуры, тугоплавкие оксиды.

Yu. A. Ivakhnenko, B.V. Baruzdin, N.M. Varrik, V.G. Maksimov

High-temperature fibrous sealing materials

Now one of demanded types of materials is sealing materials for work at high temperatures. The materials for high-temperature seals developed both abroad and in Russia, in particular in Federal State Unitary Enterprise VIAM are presented in the article. Properties of materials, methods of their manufacturing and a scope of use are considered.

Keywords: seals, ceramic fibers, cords, refractory oxides.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 14.3. «Многофункциональные теплозащитные и теплоизоляционные материалы» [1].

В настоящее время одним из востребованных высокотемпературных материалов является химически и термически стойкий материал для подвижных и неподвижных уплотнений, используемых для герметизации разного рода стыков, подвижных люков и дверей в изделиях авиационной, космической, химической, автомобильной, энергетической отраслей промышленности.

Существуют три основных способа уплотнения в подвижных и неподвижных зазорах. *Первый способ* предусматривает использование мягкого упругого материала, работающего как за счет собственной упругости (резиновые манжеты, кольца, уплотнительные шнуры), так и за счет давления

¹ 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

специальных конструктивных элементов (сальниковые уплотнения). Основным преимуществом подобных конструкций является простота монтажа и способность сохранять целостность при значительных изменениях величины уплотняемого зазора. При использовании в неподвижных узлах подобные уплотнения (упруго либо пластически деформируемые элементы) являются основным средством для обеспечения герметичности и вполне надежной работы.

Второй вариант – уплотнения с гарантированным зазором (лабиринтные), применяемые в подвижных узлах при весьма высоких скоростях скольжения и (или) высоких требованиях к надежности, связанных с умеренными перепадами давлений. Для замедления перетока уплотняемой среды, в подобных узлах, как правило, применяют гидродинамическую профилировку, затрудняющую перетекание. Недостатком подобного способа являются высокие требования к точности взаимного положения уплотняемых поверхностей и наличие неизбежного остаточного просачивания уплотняемой среды.

Третий способ обеспечения герметизации – уплотнения с плотно соприкасающимися жесткими поверхностями. Кинематические ограничения для формы точных поверхностей, способных сохранять контакт в процессе износа, приводят к тому, что подобные конструкции могут быть выполнены только в виде дисков, сфер либо конусов. Из-за технологических и эксплуатационных ограничений подавляющее число подобных узлов имеют форму соприкасающихся дисков, с чем связано их общепринятое техническое название – торцевые.

Сальниковые набивки представляют собой плетеные шнуры квадратного или круглого сечения из волокон различного состава, таких как натуральные, асбестовые, синтетические и комбинированные. В ряде случаев сальниковые набивки имеют преимущества перед уплотнительными кольцами. Как правило, набивка проще в установке, дешевле, чем торцевое и, тем более, лабиринтное уплотнение, а также менее требовательна к осевым смещениям вала.

В передовых гиперзвуковых двигателях необходимы высокотемпературные динамические конструкционные уплотнения, чтобы уплотнить периметры движущихся наклонных плоскостей, эффективно работающие в высокоскоростных потоках газов при температурах от 1000 до 1200°С [2–6]. Для предотвращения образования взрывоопасных смесей уплотнения двигателей должны ограничивать утечку горячих сжатых газов и несгоревшего топлива в задних полостях. Уплотнения должны работать в атмосфере кислород/пар и сопротивляться водородному охрупчиванию, если в качестве топлива используется водород. Конструкционные и термические нагрузки на стенки двигателя могут вызывать дисторсию,

которую уплотнения должны аккомодировать. Для того чтобы оставаться в контакте со стенками, уплотнения должны сохранять упругость и гибкость при многократных термоциклах. В связи с этим разработчики уплотнительных шнуров используют для их получения тугоплавкие оксидные волокна, которые, помимо высокой термостойкости, обладают химической инертностью в агрессивных средах. К недостаткам этих материалов следует отнести невысокую прочность, являющуюся следствием хрупкой природы керамики. Разработчики ищут способы преодоления этого недостатка путем разработки новых составов волокон и совершенствования конструкции уплотнительных шнуров.

Технологии получения уплотнительных шнуров на основе термостойких волокон, как правило, включают получение волокнистого термостойкого наполнителя и его оплетку непрерывными волокнами или нитями, либо трощение и плетение комплексных нитей.

Теплоизоляционные уплотнительные шнуры традиционно производят из асбестовых или базальтовых волокон и представляют собой цилиндрическое тело из волокнистого или нитевидного материала с обивкой из нитей или пряжи. Асбестовые шнуры и сальниковые набивки изготавливают на асбестовой основе, некоторые из них пропитаны всевозможными жировыми добавками на основе нефтяных экстрактов, а некоторые типы армированы металлической проволокой. Для прочности в состав асбестового шнура также могут быть введены хлопковые и химические волокна [7].

Большой ассортимент уплотнительных шнуров выпускает китайская компания IFI Technical Production Company [8]. На российском рынке официальным представителем этой компании является группа «Рус-Кит» (рис. 1). Уплотнительные шнуры, выполненные из хризотилового асбеста, минеральных или керамических волокон, могут иметь армирование и пропитку графитовой или фторопластовой суспензией, а также ингибитором коррозии. Рабочие температуры таких шнуров не превышают 600°C, поэтому области их использования ограничены строительной, энергетической, производственной и транспортной отраслями.

Набивки из арамидных и графитовых волокон, пропитанных фторопластовой суспензией, обладают высокой механической прочностью и стойкостью к абразивным средам. Они рекомендуются к применению в нефтеперерабатывающей, химической, целлюлозно-бумажной промышленности. Диаметр их может составлять от 3 до 50 мм. Однако рабочие температуры таких уплотнительных шнуров также невысоки — не превышают 450–500°C.

Более высокие температуры эксплуатации могут обеспечить тугоплавкие оксидные волокна, которые, помимо высокой термостойкости, обладают



Рис. 1. Керамические шнуры компании IFI Technical Production Company (Китай)

химической инертностью в агрессивных средах. Однако для повышения прочности и износостойкости хрупких от природы керамических оксидных волокон необходимо использовать вспомогательные материалы, обладающие запасом прочности и гибкости, способные выдерживать высокие температуры.

Разработчики высокотемпературных теплоизоляционных уплотнительных материалов (в частности, шнуров и оплеток) используют керамические нити в сочетании с более прочными вспомогательными волокнами и нитями, такими как стеклянные, кварцевые, металлические.

Компания Carbofundum (в настоящее время Unifrax, США) разработала в 1963 г. способ получения нитей из короткого (до 4 см) керамического волокна состава $51,5\%SiO_2-45,3\%Al_2O_3-3,4\%ZrO_2$ торговой марки Fiberfrax [9]. Согласно данному способу, смесь керамических оксидных и упрочняющих волокон, таких как волокна акрила, нейлона, хлопка, ацетатной целлюлозы, вискозы или хризотилового асбеста, подвергают кардочесанию и кручению с получением нитей, которые дополнительно упрочняют непрерывными стеклонитями либо хромоникелевой проволокой [10]. Из полученных таким образом нитей можно производить ткани, ленты, шнуры, оплетки и другие изделия (рис. 2).

Подобный способ получения крученой нити из коротких стекловолокон предложен в патенте [12] (Франция). В предпочтительном варианте осуществления данного изобретения используют стеклянные волокна типа *E*, *C*, *A*, *R* или *S*. Короткие волокна получают путем резки

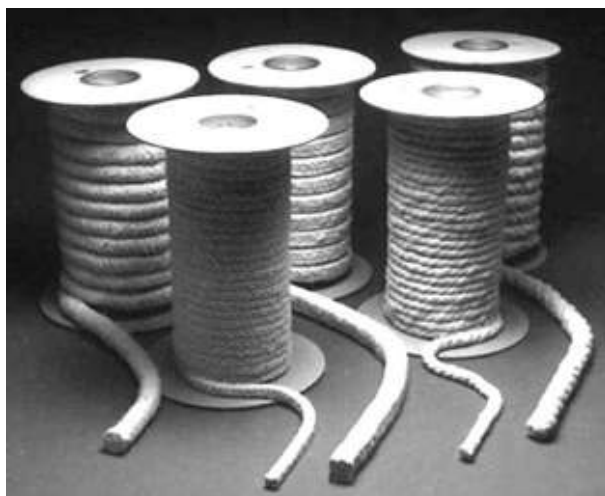


Рис. 2. Уплотнительные шнуры компании Unifrax (США) [11]

или рубки непрерывных стеклянных волокон, изготовленных обычным образом серийными производителями стекловолокон. Короткие стекловолокна смешивают со вспомогательными (предпочтительно гибкими) волокнами, такими как вискозные штапельные, акриловые, полиимидные, полиэфирные, огнеупорные акрилнитрильные, хлопковые, шерстяные и другие волокна. Производство нити включает следующие стадии: вскрытие клубков исходных волокон, их перемешивание, кардочесание и прядение с получением нити. Полученную таким образом нить затем перерабатывают в шнур.

К этой же технологической группе относится метод, описанный в патенте [13] (Италия–Китай), включающий изготовление первичных нитей из смеси оксидных и органических волокон, их (нитей) упрочнение многофиламентной стеклонитью или металлической нитью и изготовление из полученных первичных нитей шнуров, лент или тканей. Оксидные волокна содержат от 40 до 55% Al_2O_3 ; температуры эксплуатации материала, в зависимости от состава волокна, составляют от 980 до 1370°C.

Охранный документ компании Imperial Chemical Industries (Великобритания) описывает способ получения условно непрерывных керамических нитей и изделий из них [14]. Целью изобретения является получение однонаправленного волокнистого продукта, состоящего из массы оксидных волокон длиной не менее 0,5 м и диаметром <10 мкм, которые могут быть получены в уже выровненном виде, так как хрупкие керамические волокна плохо поддаются кардочесанию. Понятие «условно непрерывное волокно» означает, что отдельные волокна могут и не быть реально непрерывными в смысле бесконечной длины или пролегания на всю длину продукта, но

каждое волокно имеет достаточно протяженную длину и однонаправленность, так что общее впечатление таково, что продукт состоит из непрерывных волокон. Выровненный волокнистый продукт получают по раздувной технологии, формообразование происходит во множестве струй прекурсора, которые вовлекаются в потоки воздуха и проходят через сходящийся поток к намоточному барабану. Описаны примеры получения выровненного волокнистого продукта на основе оксида алюминия или оксида циркония, из которых нарезают ленты, пропускали их через оплеточную машину и соединяли с восемью вискозными нитями линейной плотностью по 167 дтекс. Из полученных нитей можно получать шнуры и оплетки для высокотемпературного использования.

Волокна состава $97\%Al_2O_3-3\%SiO_2$ и нетканый материал из них выпускает компания Saffil Ltd, входившая в качестве отдельного подразделения в состав Imperial Chemical Industries (ICI) до 1999 г., которая затем была выкуплена у ICI английской компанией Dyson Group plc, а в 2011 г. приобретена крупным международным холдингом Unifrax – ведущим производителем высокотемпературной волокнистой теплоизоляции, предназначенной для применения в различных отраслях промышленности.

Аналогичные технологии используют в настоящее время многие компании – производители высокотемпературной теплоизоляции стран Европы (Австрия, Германия, Великобритания, Франция), а также юго-восточной Азии (Китай, Индия, Япония и др.).

Для придания износостойкости уплотнительному шнуру используют гибридные конструкции, включающие термостойкие волокна, полые сферы, металлическую оплетку и пружину для придания упругости. В частности, ряд запатентованных решений по разработке высокотермостойких уплотнений для двигателей нового поколения предложен NASA. Разработано несколько видов уплотнений – как полностью керамических, так и гибридных, содержащих керамический сердечник и оплетку из суперсплавов. Сердечник может быть выполнен из полых микросфер [15] или из волокон. Уплотнения (рис. 3) могут содержать пружину из высокотемпературных сплавов внутри оплетки из тугоплавких волокон [16], сердечник из пучка однонаправленных волокон 1, пружину 2, окружающую этот сердечник, и оплетку из непрерывных волокон 3 [17].

Во ФГУП «ВИАМ» налажен выпуск дискретных и непрерывных волокон на основе тугоплавких оксидов – в частности, волокон на основе оксида алюминия, муллита и оксида циркония. Эти волокна используют при изготовлении различных материалов теплозащитного и теплоизоляционного назначения, в том числе высокотемпературных материалов для уплотнений.

В частности, разработаны и изготовлены образцы нескольких видов уплотнительных материалов: шнуры с оплеткой из кварцевого волокна и

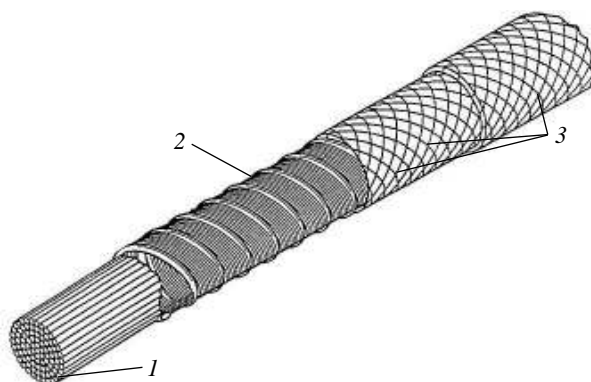


Рис. 3. Уплотнительный шнур [17] (США):
1 – однонаправленное волокно; 2 – пружина;
3 – оплетка из непрерывных волокон

сердцевинной из дискретного кварцевого волокна и волокна на основе оксида алюминия; шнуры с дополнительной металлизированной оплеткой и уплотнительные кольца из композиционного материала, содержащего матрицу из гибкого органического материала, упрочненную непрерывным волокном на основе оксида алюминия, а также износостойкие керамические кольца.

Процесс получения дискретного поликристаллического волокна на основе оксида алюминия состоит из следующих стадий:

- входной контроль исходных компонентов – оксихлорида алюминия (полиалюминийгидрохлорида) и силиказоля (кремнезоля);
- приготовление исходного формовочного раствора;
- упаривание исходного формовочного раствора с целью удаления части растворителя до достижения требуемой для формования волокна вязкости;
- формование волокна методом форсуночного распыления;
- низкотемпературная термообработка сырого волокна с целью удаления летучих компонентов волокна и перевода его в оксидную форму;
- высокотемпературная термообработка волокна с целью получения требуемой кристаллической фазы волокна для снижения усадки материала при рабочей температуре.

Формование волокна проводится на установке получения дискретных волокон с горизонтально расположенной камерой волокноосаждения, оборудованной сетчатым фильтром с размером ячейки 1–2 мм, находящимся в нижней части камеры с целью предотвращения изгибов и ломки волокна.

После процесса формования необходима термообработка волокон, обеспечивающая превращение исходных прекурсоров, составляющих волокнообразующий раствор, в оксид алюминия. Термообработку волокон проводят в сушильном шкафу. Для предотвращения ломки при термообработке волокна должны быть уложены свободно. Микрофотография полученного волокна представлена на рис. 4, гистограмма распределения волокна по диаметрам – на рис. 5.

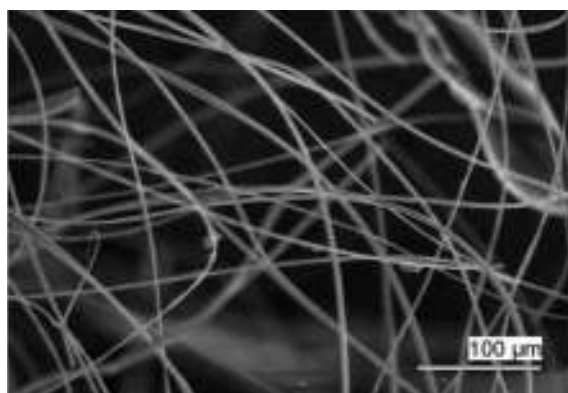


Рис. 4. Микрофотография дискретного волокна на основе оксида алюминия

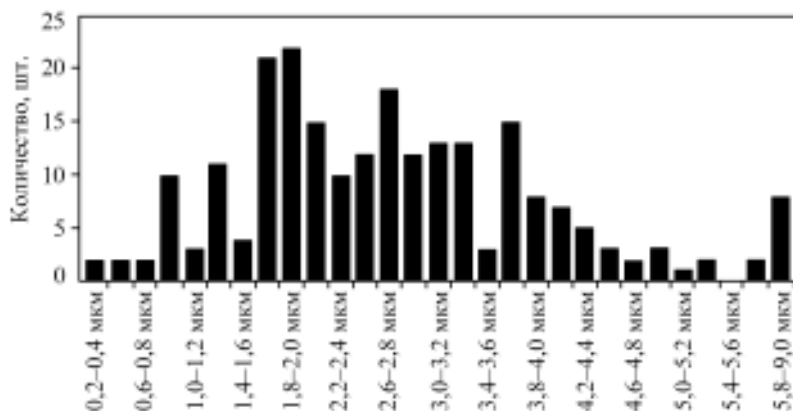


Рис. 5. Гистограмма распределения диаметров дискретного волокна на основе оксида алюминия

Полученные волокна на основе оксида алюминия использовали для получения нетканого волокнистого мата, из которого нарезали сердцевину шнура. В основу технологии получения гибкого волокнистого мата положена технология вакуумного формования из водной волокнистой пульпы, получаемой путем разведения волокна в воде совместно

с органическим водорастворимым связующим, после чего отформованный волокнистый мат подвергают низкотемпературной термообработке.

Полученный таким образом материал из дискретного волокна на основе оксида алюминия (рис. 6) использовали для изготовления сердцевины шнура с технологической оболочкой из кварцевого холста.



Рис. 6. Волокнистый мат из дискретного волокна на основе оксида алюминия

На полоску из кварцевого холста марки ХКВ-0,05 укладывали полоску расчетного количества формованного мата и в зависимости от требуемого диаметра шнура создавали оболочку из холста на нетканом волокнистом материале из дискретного волокна.

Для оплетки шнуров использовали кварцевую нить линейной плотностью 136 текс. На изготовленную сердцевину шнура на 48-веретенной шнуроплетельной машине наносили оплетку из кварцевых нитей, предварительно смотанных в три сложения на перемоточном станке, и получали образцы шнуров диаметром 10; 15; 20 и 30 мм по типовому технологическому процессу (рис. 7).

Для оплетки металлической проволокой кварцевого шнура на этом этапе выбрана окалиностойкая стальная проволока диаметром 0,1 мм. Оплетку из металлической проволоки нанесли на шнур с кварцевой оплеткой.

Полученным шнурам присвоены марки: ВШТ-1 – с оплеткой из кварцевых нитей и ВШТ-2 – с оплеткой из металлической проволоки. На рис. 8 представлен внешний вид шнура марки ВШТ-1.

Основные свойства шнуров представлены в табл. 1.

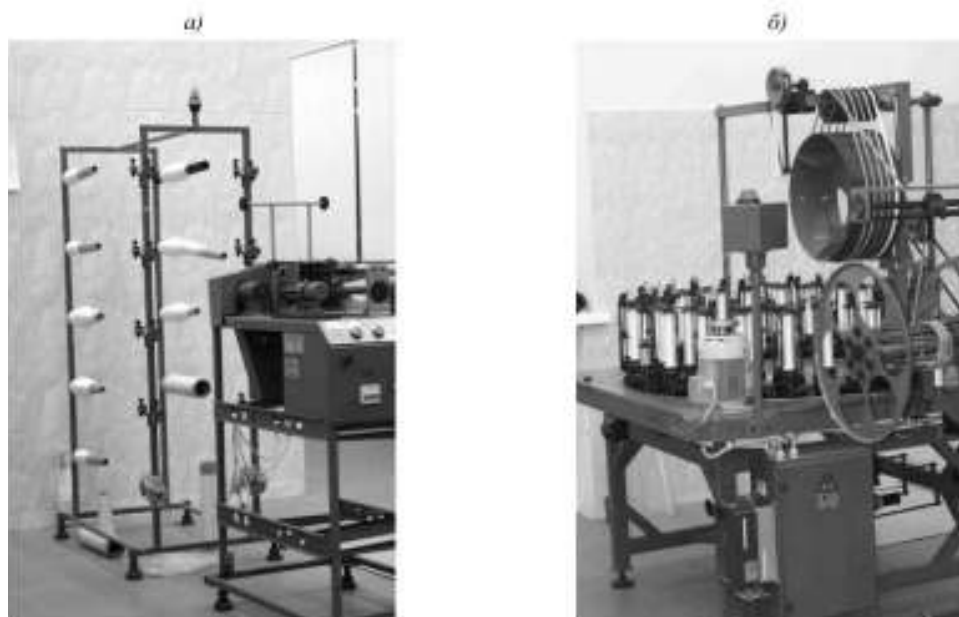


Рис. 7. Оборудование для получения шнуров:
а – перемоточный станок; *б* – шнуроплетельная машина



Рис. 8. Внешний вид шнура марки ВШТ-1

Таблица 1

Свойства уплотнительных шнуров ВШТ-1 и ВШТ-2

Свойства	Значения свойств шнуров марок	
	ВШТ-1	ВШТ-2
Внешний вид	Белого цвета	Серебристого цвета
Диаметр шнура, мм	10±2	10±2
Линейная плотность, ктекс (не более)	100	110
Удельное напряжение сжатия при 20%-ной деформации, МПа	(11±2)·10 ⁻³	(17±2)·10 ⁻³
Плотность плетения – количество плетений на 100 мм	40±3	50±10

Данный тип уплотнений предназначен для работы при температурах до 1400°С. Для работы при температурах не выше 1100°С во ФГУП «ВИАМ» производят уплотнительные шнуры аналогичной структуры с сердцевинной из более доступного и дешевого кварцевого волокна марок ШТКВ-10 и ШТКВМ-10.

Шнур марки ШТКВ-10 изготавливают путем нанесения оплетки из кварцевых нитей марки КС 11-17×2×2-39 (по ТУ 6-48-05786904-166–97) на теплоизоляционную сердцевину из иглопробивного кремнеземного материала марки «Суперсил» (по ТУ 5952-156-057-86-904–2000). Шнур марки ШТКВМ-10 изготавливают путем нанесения на теплоизоляционный шнур марки ШТКВ-10 оплетки из комплексной стальной проволоки диаметром 0,07 мм в 8 сложений. Свойства уплотнительных шнуров данного вида представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства уплотнительных шнуров марок ШТКВ-10 и ШТКВМ-10

Свойства	Значения свойств шнуров марок	
	ШТКВ-10	ШТКВМ-10
Внешний вид	Белого цвета	Серебристого цвета
Диаметр шнура, мм	10±2	10±2
Масса 1 пог. м. шнура, г (не более)	50	100
Усилие, разрывающее сердцевину шнура, кгс (не менее)	1,0	3,0
Длина шнура в мотке, м	5–50	5–50
Плотность плетения – количество плетений на 100 мм	55±3	50±10

Еще один вид уплотнения для работы при высоких температурах изготавливали в виде кольца, содержащего непрерывное волокно (на основе оксида алюминия в виде ровницы) и органическую матрицу.

Ровницу формировали из непрерывных волокон оксида алюминия, полученных по золь-гель технологии методом сухого формования. Для приготовления формовочного раствора использовали те же компоненты, что и для получения дискретного волокна на основе оксида алюминия. Для изготовления ровницы получены волокна на основе оксида алюминия. Из исходных компонентов (силиказоля, оксихлорида алюминия и раствора поливинилового спирта) готовили волокнообразующий раствор расчетного состава: 85% оксида алюминия и 15% оксида кремния.

Раствор упаривали до вязкости формования 40 Па·с. В ходе отработки режимов формования волокон опробована многоканальная фильера на 312 капилляров. Определен оптимальный режим формования: давление – от 0,3 до 2 ат (~0,03–0,2 МПа), влажность – от 55 до 60%, температура $40 \pm 2^\circ\text{C}$, скорость вытягивания волокна 0,3 м/с. В результате получено исходное волокно для изготовления партии ровницы [18–21].

В качестве матрицы для изготовления уплотнения выбран высокотемпературный герметик ВИКСИНТ У-10-80 (ТУ38.103610–86).

Процесс изготовления уплотнения данным методом проводили по следующей технологии: пропитанную герметиком ровницу наматывали в специально изготовленную форму, заполненную форму выдерживали в течение 6 ч при температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$ для полимеризации герметика, после чего снимали прижимное устройство с формы и извлекали уплотнение. Форма и полученное уплотнительное кольцо представлены на рис. 9.



Рис. 9. Форма в разобранном виде с полученным уплотнительным кольцом

Основные свойства полученного уплотнения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства уплотнительного кольца из волокон на основе оксида алюминия

Свойства	Значения свойств
Средняя плотность, кг/м ³	1729
Среднее значение прочности на сжатие при 10%-ной линейной деформации, МПа	7

Проведены температурные испытания: образец уплотнения помещали в печь, сверху на него помещали корундовую плиту массой 1,5 кг, обеспечивающую давление; печь нагревали до 1500°C и выдерживали при этой

температуре в течение 2 мин. На рис. 10 представлены образцы уплотнений до и после нагрева.



Рис. 10. Образец уплотнительного кольца до (а) и после нагрева (б)

В процессе высокотемпературного нагрева образца происходит постепенное расплавление и выгорание герметика, служащего связующим для тугоплавкого волокна на основе оксида алюминия, однако волокно сохраняет целостность и остается в форме кольца. На рис. 10 видно, что образец уплотнения после температурного воздействия и выгорания герметика практически не утратил свои форму и размеры, что связано, по-видимому, с высоким содержанием в нем волокна, которое после выгорания герметика должно обеспечить сопротивление тепловому потоку.

Исследованы теплофизические характеристики экспериментальных образцов высокотемпературных уплотнений:

- удельная теплоемкость в диапазоне температур от 20 до 350°С увеличивается соответственно с 1,07 до 1,36 кДж/(кг·К);

- объемная теплоемкость в диапазоне температур от 20 до 350°С увеличивается соответственно с 1850 до 2351 кДж/(м³·К); по ТЗ – $c_p \geq 1200$ кДж/(м³·К);

- теплопроводность в диапазоне температур от 25 до 300°С уменьшается соответственно с 0,67 до 0,52 Вт/(м·К); по ТЗ – $\lambda \leq 1,0$ Вт/(м·К);

- температуропроводность в диапазоне температур от 25 до 300°С уменьшается соответственно с $0,3 \cdot 10^{-6}$ до $0,19 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Определены также теплофизические характеристики образцов уплотнений после выжигания герметика:

- удельная теплоемкость в диапазоне температур от 20 до 1500°С увеличивается соответственно с 601 до 2704 Дж/(кг·К);

- коэффициент теплопроводности в диапазоне температур от 20 до 1500°С увеличивается соответственно с 0,22 до 0,74 Вт/(м·К) – рис. 11.

Видно (рис. 11), что коэффициент теплопроводности уплотнения, содержащего волокно и герметик, при повышении температуры от 100 до 300°С уменьшается соответственно с 0,72 до 0,52 Вт/(м·К). После выгорания герметика, начиная с температур 600–700°С, коэффициент теплопроводности уплотнений, состоящих только из волокна, в диапазоне температур от 700 до 1500°С увеличивается соответственно с 0,32 до 0,74 Вт/(м·К).

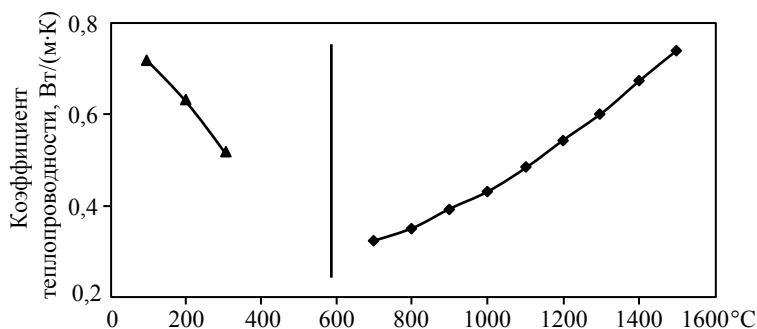


Рис. 11. Температурная зависимость теплопроводности уплотнений, содержащих волокно и герметик (▲), и уплотнений после выгорания герметика (◆)

Проведенные исследования теплопроводности уплотнений в диапазоне температур от 100 до 1500°С показали, что коэффициент теплопроводности не превышает 1,0 Вт/(м·К). Данные материалы находятся на стадии экспериментальных разработок, поэтому будут исследованы другие варианты сочетаний «волокно–матрица».

Созданные во ФГУП «ВИАМ» уплотнительные шнуры не уступают по эксплуатационным свойствам зарубежным аналогам [11, 22]. Однако существуют условия эксплуатации, в которых уплотнения (помимо высокой термостойкости и стойкости к агрессивным средам) должны обладать высокой износостойкостью. Уплотнительные шнуры не обладают достаточной прочностью при работе на истирание.

Для экстремальных условий эксплуатации используют ряд изделий из высокотемпературной и химически стойкой технической керамики – карбидов кремния и вольфрама, оксида алюминия, диоксида циркония. Преимущество данных материалов состоит в том, что они способны длительное время эксплуатироваться при температурах до 1850°С в различных агрессивных газовых и жидких средах. Однако карбидная керамика (SiC, WC) химически стойка только лишь в бескислородных средах, тогда как оксидная керамика (Al₂O₃, ZrO₂) обладает стойкостью и в окислительных средах.

Одним из материалов, используемых для высокотемпературных торцевых уплотнений, является керамика на основе оксида алюминия.

Оксид алюминия (Al_2O_3) обладает исключительным набором свойств, таких как высокая твердость, низкая теплопроводность, стойкость к окислению и коррозии, низкая плотность, термостойкость, электроизоляционные свойства. Сочетание этих свойств делает материал незаменимым при изготовлении коррозионностойких, износостойких, электроизоляционных и термостойких изделий для самых различных отраслей промышленности, в том числе в качестве колец торцевых уплотнений.

Как правило, торцевые уплотнения хорошо работают в следующих условиях:

– при использовании классической пары трения «твердое–мягкое» – этот вариант применим лишь в условиях безабразивной среды, а также температуры и условий смазки, обеспечивающих нормальную работу диска с меньшей твердостью;

– при использовании одного или обоих дисков из жестких материалов, обладающих твердосмазочными свойствами, – например, пары «твердый металл–графит» (используют для авиационных газовых турбин) и «силицированный графит–силицированный графит»;

– при использовании пары трения из высокотвердых материалов.

Для работы при высоких температурах в окислительной среде практически приемлемыми являются только уплотнения типа «твердое по твердому», выполненные из оксидной керамики. Узлы с трением жаростойких металлов и бескислородных керамик становятся неработоспособными из-за окислительного износа при температурах выше температуры образования оксидных защитных пленок ($400–800^{\circ}C$), а металлические – также вследствие резкого повышения склонности к задиру и схватыванию при высоких температурах. В настоящее время для изготовления подобных узлов используется в основном керамика на основе корунда и оксида циркония. Однако циркониевая керамика, кроме общеизвестного резкого ухудшения механических характеристик (вплоть до возникновения сверхпластичности) в диапазоне температур $800–1200^{\circ}C$, имеет чрезвычайно хорошую спекаемость и, как следствие, достаточно сильно выраженную склонность к схватыванию в моменты нахождения узла в неподвижном положении. Керамика на основе корунда, хотя и более термически стабильна и существенно дешевле, обладает в ряде случаев худшими фрикционными свойствами, а при высоких механических нагрузках склонна к усталостному износу с «выколом» с рабочей поверхности фрагментов материала, вызывающим вторичный износ.

Во ФГУП «ВИАМ» для использования в таких условиях разработана плотная керамика на основе муллита, которая (в отличие от корундовой) имеет более благоприятный характер износа вследствие сдвига мелких частиц, обеспечивающего возникновение эффекта твердой смазки

и качественную приработку узла трения с образованием зеркально гладких соприкасающихся поверхностей. Следует также отметить низкий для керамик (и быстро уменьшающийся с увеличением давления) коэффициент сухого трения подобных материалов – не более 0,25. Чрезвычайно низкая активность муллита к спеканию и его термомеханическая стабильность при высоких температурах также является в данном случае положительным фактором, снижающим склонность к схватыванию соприкасающихся поверхностей и их деформацию при высоких температурах.

Специфической особенностью технологии с применением муллитовой керамики является сложность получения плотносспекшегося материала, возникающая вследствие низкой активности муллита к спеканию. В производстве это преодолевается либо путем использования горячего прессования, что обеспечивает наилучшие свойства материала, либо применением спекающих добавок, наилучшим комплексом свойств среди которых обладает оксид циркония. Однако горячее прессование вызывает многократный рост затрат на оборудование, особенно в малосерийном производстве. Спекающие добавки, обеспечивая возможность изготовления плотного муллитового материала традиционными способами получения керамики, существенно снижают высокотемпературные свойства муллита. В частности, появляется нетипичная для чистого муллита существенная ползучесть при температурах <1350°С. В результате проведенных работ найдены возможности преодоления ползучести модифицированного муллита при умеренно высоких температурах, что существенно расширило сферу применения недорогого модифицированного муллита и позволило в ряде случаев использовать его вместо горячепрессованного. Благодаря этим разработкам возможно также изготовление прочных износостойких керамических торцевых уплотнений из оксидной керамики на основе муллита, способной работать в окислительной среде при температурах 1200–1350°С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
3. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.

4. Тинякова Е.В., Гращенков Д.В. Теплоизоляционный материал на основе муллитно-корундовых и кварцевых волокон // Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 43–46.
5. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2016).
6. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В. Волокнистые теплоизоляционные и теплозащитные материалы: свойства, области применения // Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений: сб. тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф. Жуковский, 2004. С. 95–96.
7. Шнур: пат. 2233356 Рос. Федерация; заявл. 31.10.02; опубл. 27.04.04, Бюл. №21. 4 с.
8. Компании IFI Technical Production Company: офиц. сайт. URL: <http://www.ifi-techproduction.cn> (дата обращения: 07.10.2016).
9. Method and apparatus for blending ceramic fibers with carrier fibers: pat. 3012289 US; publ. 12.12.61. 7 p.
10. Heat resistant fibrous products containing ceramic fibers and method of making the: pat. 3090103 US; publ. 21.05.63. 5 p.
11. Компании Unifrax: офиц. сайт. URL: <http://www.unifrax.com> (дата обращения: 07.10.2016).
12. Glass fibre yarn: pat. 2497239 FR; publ. 02.07.82. 6 p.
13. Ceramic fibre yarn with high thermal resistance, mechanical strength and chemical inertia, corresponding production process and manufactured articles manufactured using the said yarn: pat. 1278097 IT; publ. 17.11.97. 34 p.
14. Inorganic oxide fibres and their production: pat. 4792478 US; publ. 20.12.88. 14 p.
15. High-temperature, flexible, thermal barrier seal: pat. 5014917 US; publ. 14.05.91. 7 p.
16. High-temperature, bellows hybrid seal: pat. 5332239 US; publ. 26.06.94. 8 p.
17. Resilient braided gore seal: pat. 6039325 US; publ. 21.03.00. 12 p.
18. Максимов В.Г., Варрик Н.М. Высокотемпературная керамическая теплоизоляция (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №6. Ст. 09. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 07.10.2016).
19. Ивахненко Ю.А., Варрик Н.М. Материалы для высокотемпературных уплотнений (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №6. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-2-2.

20. Зимичев А.М., Варрик Н.М., Сумин А.В. Нити из тугоплавких оксидов для уплотнительной теплоизоляции // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №6. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-5-5.
21. Зимичев А.М., Варрик Н.М. К вопросу применения дискретных волокон из тугоплавких оксидов для формирования сердечника термостойких уплотнительных шнуров // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-7-7.
22. Щеглова Т.М., Зимичев А.М., Варрик Н.М. Исследование образцов шнура из волокон Fiberfrax // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-5-5.