

ВИАМ/2015-Тр-06-02



УДК 62-762

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-2-2

**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
УПЛОТНЕНИЙ (обзор)**

Ю.А. Ивахненко

Н.М. Варрик

Июнь 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 62-762

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-2-2

Ю.А. Ивахненко¹, Н.М. Варрик¹

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УПЛОТНЕНИЙ (обзор)

Приведен обзор материалов для высокотемпературных уплотнений. Для обеспечения герметичности в местах расположения открывающихся дверей и люков, а также органов управления летательных аппаратов необходимы высокотемпературные подвижные уплотнения, обладающие приемлемой износостойкостью, химической стойкостью в агрессивных средах и высокими упругими свойствами. В основном в качестве подвижных уплотнений используют торцевые уплотнения и/или сальниковые набивки. Материалы для уплотнений включают широкий круг органических, металлических, керамических и комбинированных материалов, выбор которых зависит от условий эксплуатации.

Ключевые слова: *высокотемпературные уплотнения, торцевые уплотнения, сальниковая набивка.*

Yu.A. Ivakhnenko, N.M. Varrik

MATERIALS FOR HIGH-TEMPERATURE SEALANTS (REVIEW)

Materials for high-temperature sealants are reviewed in the article. High-temperature movable sealants with acceptable wear resistance, chemical resistance in aggressive environment and high elastic properties are used for sealing of flap doors and hatches and control means of flying vehicles. Generally, butt end sealants and/or stuffing box sealants are used as movable sealants. A wide range of organic, metal, ceramic and combined materials can be used as sealing materials; their choice depends on service conditions.

Keywords: *high-temperature sealants, butt end sealants, stuffing box sealants.*

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

Для обеспечения герметичности в местах расположения открывающихся дверей и люков, а также органов управления летательных аппаратов необходимы высокотемпературные подвижные уплотнения, обладающие приемлемой износостойкостью, хи-

мической стойкостью в агрессивных средах и высокими упругими свойствами. В основном в качестве подвижных уплотнений используют торцевые уплотнения и/или сальниковые набивки.

Торцевым уплотнением называют герметизирующее устройство машины между ее корпусом и валом для разделения полостей высокого и низкого давлений, выполненное в виде пары трения торцовых поверхностей двух деталей, одна из которых закреплена на валу, а вторая – в корпусе машины. В общем случае торцевое уплотнение содержит два кольца: неподвижное кольцо, расположенное в корпусе, и вращающееся кольцо, расположенное на валу машины. Кроме того, обязательными элементами узла торцевого уплотнения являются вспомогательные уплотнения между вращающимся блоком и ротором, между статорным блоком и корпусом, а также устройства фиксации уплотняющих колец. Сальниковая набивка проще в установке и дешевле, чем торцевое уплотнение, однако ее уплотнительные характеристики могут допускать небольшие утечки жидкостей и газов.

Материалы для уплотнений, включающие широкий круг органических, металлических, керамических и комбинированных материалов (например – медь, алюминий, свинец, бронза, сухой асбест, паронит, резина, оксидная и неоксидная керамика и др.), подбирают в зависимости от температуры, давления и рабочей среды.

Прокладочные уплотнения из различных минеральных, органических и синтетических волокон с применением связующих материалов (эластомеров) имеют невысокие рабочие температуры – от 200 до 350°C, обусловленные низкой температурой разложения органических связующих, поэтому уплотнения на основе органических материалов, в большом количестве предлагаемые на рынке уплотнений, в данный обзор не включены.

Резина – эластичный материал, получаемый вулканизацией каучука. Как правило, армируется синтетической или натуральной тканью. Обладает высокими упругими свойствами. Однако у резины есть ряд недостатков, таких как низкая температура эксплуатации, низкая химическая стойкость, низкая прочность, склонность к старению и др., поэтому в отраслях, где предъявляются высокие требования к уплотнительным материалам, резина как самостоятельное уплотнение практически не используется. Паронит – листовый прокладочный материал, изготавливаемый прессованием асбокаучуковой массы, состоящей из асбеста, каучука и порошковых ингредиентов (рис. 1). Хотя паронит является резиновой смесью с высоким содержанием наполнителей, тем не менее его принято выделять в отдельную группу. Как прокладочный материал паронит

применяется более 40 лет. Область применения паронита достаточно широка: его применяют в нефтехимической и химической промышленности, в машиностроении, металлообработке, металлургии, электротехнике и электроэнергетике. В промышленности чаще всего применяют листовой паронит толщиной от 0,4 до 6 мм. Плотность паронита составляет от 1,5 до 1,8 г/см³. Эксплуатационные свойства паронита сохраняются при воздействии температуры окружающей среды от -50 до +500°С.



Рис. 1. Листовой прокладочный материал паронит

В эту же группу уплотнительных материалов входят картоны на основе целлюлозы и асбеста – более дешевые и простые материалы, однако их температуры эксплуатации еще ниже, чем у паронита.

Широко используемые в химической промышленности графитовые уплотнения выполнены, как правило, из графитового листового материала (рис. 2), возможно армированного нитями из натуральных, стеклянных, керамических, синтетических, углеродных волокон и металлической проволокой, с целью придания изделию дополнительной механической прочности и химической стойкости.



Рис. 2. Производство графитовой фольги

Рабочие температуры таких уплотнений зависят от рабочей среды: в инертной атмосфере они могут работать при температуре до 3000°C, в атмосфере пара – до 560°C, на воздухе – лишь до 400°C. Графит химически устойчив в бескислородной среде, а на воздухе склонен к окислению и горению при нагреве.

Для более высоких температур эксплуатации используют металлические и керамические уплотнения.

Металлические уплотнения способны выдерживать более высокие температуры и нести механические нагрузки (рис. 3). Материалами, чаще всего используемыми для изготовления металлических уплотнений, являются нержавеющие и углеродистые стали, никель и его сплавы, медь, алюминий, индий, а в некоторых случаях серебро и золото. Золото, серебро и индий обычно применяются в виде проволочных уплотнений. К металлическим уплотнениям предъявляются особые требования по чистоте поверхности и геометрическим размерам. Для герметизации разъёмных соединений используют также зубчатые уплотнения, состоящие из металлической зубчатой прокладки и плакировочного слоя графита. За счет упругости концентрических зубцов уплотнение воспринимает действующую нагрузку, а плакировочный слой графита уплотняет возможные раковины на поверхности фланца. Используют такие уплотнения в теплоэнергетике, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, т. е. в установках и аппаратах, трубопроводной арматуре, предназначенных для высоких давлений и температур с горючими, токсичными и химически опасными средами.



Рис. 3. Варианты металлических уплотнительных прокладок

Недостатками металлических уплотнений являются приваривание их в процессе эксплуатации при высоких температурах и окисление. Кроме того, рабочие температуры металлических уплотнений составляют от ~200 (для алюминия) и до 800°C (для сталей), что также ограничивает область их применения.

Для экстремальных условий эксплуатации используют ряд изделий из высоко-температурной и химически стойкой технической керамики – карбидов кремния и вольфрама, оксида алюминия, диоксида циркония (рис. 4). Преимущество данных материалов состоит в том, что они способны длительное время эксплуатироваться при температурах до 1850°С в различных агрессивных газовых и жидких средах.



Рис. 4. Уплотнительное кольцо карбон/керамика (ООО НПП «ПромГрафит»)

Карбидокремниевые подшипники скольжения торцевого и радиального типа используются вместо обычных стальных, когда необходимо эксплуатировать насосы и другие агрегаты, контактирующие с агрессивными и абразивосодержащими средами. В настоящее время подшипники из реакционноспеченного карбида кремния широко используются в нефтедобывающей и химической отраслях промышленности, их износостойкость и коррозионная стойкость определяются высокой плотностью (минимальной пористостью и содержанием свободного кремния) и мелкозернистой структурой материала. Благодаря отсутствию в составе материала спекающих оксидных добавок материал обладает исключительной химической стойкостью, обеспечивая практическое отсутствие взаимодействия с щелочами и кислотами при температурах до 1200°С в течение 20000 ч. Однако использование этих материалов в кислородсодержащих средах, в том числе и в высокоскоростных воздушных потоках, существенно ограничено их склонностью к окислению и деградации.

Комбинированные уплотнительные кольца могут содержать комбинацию металлической основы и неметаллического уплотняющего слоя. В частности, часто используют уплотнительные кольца для вращающихся валов, называемые также симмерингами, уплотнительными манжетами или манжетными уплотнениями. Эти материалы разрабатывают для создания уплотнения, которое объединит прочность и термостойкость металла и эластичность и упругость полимера. Как правило, используются пары мате-

риалов, например – металл–полимер, металл–графит, резина–полимер и др., но есть и более сложные изделия.

Однако комбинированные уплотнения объединяют не только достоинства входящих в их состав материалов, но и их недостатки. Так, фторэластомерные прокладки, такие как витон, при нагреве $>400^{\circ}\text{C}$ начинают разлагаться с образованием плавиковой кислоты, а при контакте с парообразными или легкими растворами щелочей могут разбухнуть и прийти в негодность. При использовании резиновых компонентов необходимо помнить, что они непригодны для длительного хранения в нерабочем состоянии, так как высыхают при нагревах и воздействии солнечных лучей.

Одним из материалов, используемых для высокотемпературных уплотнителей, 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, хорошие 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 [1–9]. Рабочая температура таких изделий может достигать 1800°C .

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к износостойким высокотемпературным материалам на основе оксидной керамики, такой как оксид алюминия, муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), а также к композиционным материалам на их основе с добавлением оксида циркония [10]. Например, предложено на поверхность цветных и черных металлов наносить электролитическим методом керамические оксидные покрытия, состоящие из кристаллов нитевидной формы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с поперечным размером ~ 100 нм, находящихся в мелкокристаллической матрице $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, и муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$, для использования в парах трения машин и механизмов [11, 12].

Для работы в условиях повышенных температур используют также такие технические решения, как охлаждение уплотнений. В патенте [13] описано торцевое уплотнение для герметизации вращающихся валов насосов, перекачивающих высокотемпературные, взрыво- и пожароопасные, токсичные жидкости. Торцевое уплотнение вращающегося вала состоит из вращающегося уплотнительного элемента, закрепленного на валу, и невращающегося уплотнительного элемента, установленного в корпусе. Для охлаждения элементов торцевого уплотнения используется охлажденная перекачиваемая среда. Подача охлажденной среды осуществляется через каналы, выполненные во

фланце, закрепленном на корпусе уплотнения, затем охлажденная среда попадает в полость, образованную проточкой во фланце и опорным кольцом.

Большой раздел уплотнений представляют сальниковые набивки – плетеные шнуры квадратного или круглого сечения из различного типа волокон, таких как натуральные, асбестовые, синтетические и комбинированные. В качестве примера можно привести набивки из арамидных и графитовых волокон, пропитанных фторопластовой суспензией. Набивки 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. На рис. 5 представлена сальниковая набивка из арамидного волокна, поставляемая ООО «ПромИндустрия» (г. Москва). Рабочие температуры таких уплотнительных шнуров не превышают 450–500°C.



Рис. 5. Сальниковая набивка из арамидного волокна

Для достижения более высоких температур эксплуатации при изготовлении уплотнительных шнуров используют термостойкие волокна, такие как асбестовые, базальтовые, стеклянные, кварцевые, муллитокремнеземные и др.

Большой ассортимент сальниковых асбестовых набивок (рис. 6) выпускает китайская компания IFI Technical Production Corporation Group (Industry Future Innovations Technical Production – IFI TP). На российском рынке официальным представителем этой компании является группа Рус-Кит.



Рис. 6. Асбестовые сальниковые набивки компании IFI TP (Китай)

Уплотнительные шнуры, выполненные из хризотилового асбеста, могут иметь армирование, 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.

Кроме того, IFI Technical Production производит широкий ассортимент уплотнительных, прокладочных и изоляционных керамических шнуров. Керамические шнуры разделяют на два вида: крученые и плетеные. В свою очередь, плетеный керамический шнур может быть выполнен как с круглой, так и с прямоугольной формой поперечного сечения (рис. 7). Керамические шнуры широко применяются в качестве сальниковых уплотнений (сальниковые набивки), предназначенных для уплотнений клапанов и статических соединений при высоких температурах в химической, энергетической, нефтеперерабатывающей, строительной, стекольной, металлургической и машиностроительной промышленности.



Рис. 7. Керамические уплотнительные шнуры компании IFI TP (Китай)

Польская компания Spetech (официальный дистрибьютор в России ООО «БизнесПром») также производит аналогичные уплотнительные материалы. В частности, фирма производит большой ассортимент шнуров из стекловолокна различных типов, пропитанного политетрафторэтиленом, рабочие температуры которых достигают 1200°C.

Большой ассортимент набивок и уплотнений также выпускает компания Garlock Sealing Technologies, входящая в группу Enpro Industries Inc. (США), ведущего производителя изделий для производственных процессов.

Компания Keratech (Чехия) производит ассортимент теплоизоляционных материалов для различных областей промышленности (рис. 8). В частности, компания производит ряд уплотнительных шнуров на рабочие температуры от 600 до 1200°C.

Аналогичную продукцию выпускает ряд других компаний – например, Isotek (рис. 9), Insulation Ningbo Gongyao Industrial (Китай), Alfatec (Австрия), Mangalam (Индия) и др.

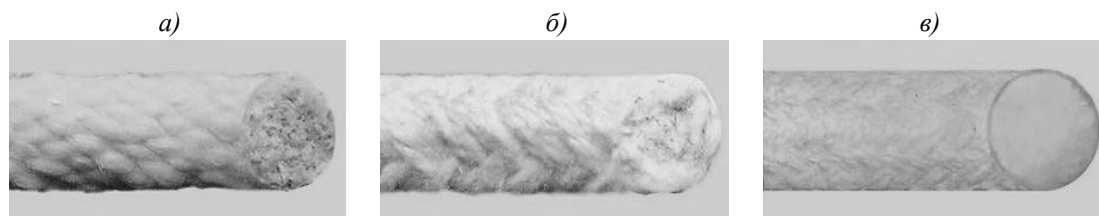


Рис. 8. Шнуры компании Keratech (Чехия) с керамическими наполнителями:
a – крученный двухрядный; *б* – некрученный с керамической оплеткой; *в* – с оплеткой, усиленной проволокой Inconel

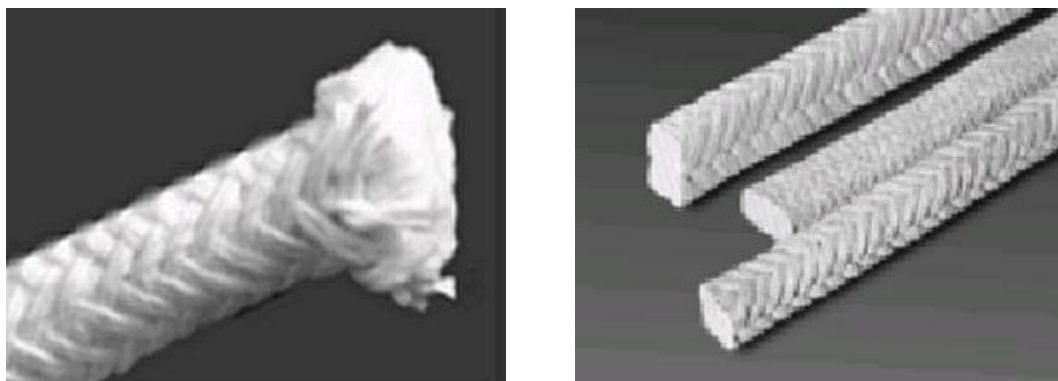


Рис. 9. Шнуры из керамических оксидных волокон китайской компании Isotek

Однако максимальные температуры эксплуатации перечисленных уплотнительных шнуров не превышают 1400°C. Для повышения температур эксплуатации такого типа уплотнений необходимо использовать волокна с повышенной термостойкостью. Керамические оксидные волокна, такие как волокна муллита, оксида алюминия, оксида циркония, выдерживают достаточно высокие температуры (>1500°C), они стойки к окислению, однако природная хрупкость керамики ограничивает их прочностные свойства. 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 [14–16].

Еще одно решение для достижения высокой температуры эксплуатации уплотнения – использование теплоизоляционного материала в конструкции уплотнения. Например, прокладка фланцевого соединения (ООО «Силур», Россия) состоит из двух

частей: внутренняя составляющая прокладки является теплоизолирующей и сделана из нескольких слоев теплоизоляции, заключенных в obtюраторы из жаропрочного сплава. В этом элементе прокладки температура падает с 1200 до 500–400°C, что позволяет защитить наружную уплотняющую составляющую прокладки от высокой температуры. Наружная составляющая прокладки выполнена из терморасширенного графита (ТРГ), который позволяет загерметизировать фланцы с наличием перекосов, выбоин и прочих дефектов (рис. 10).

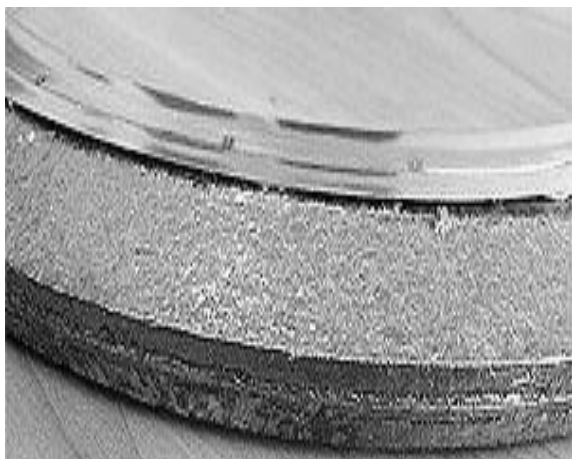


Рис. 10. Высокотемпературное фланцевое уплотнение с теплоизоляцией

В результате анализа технической литературы можно сделать следующие выводы. В настоящее время производится большое количество различных видов уплотнений, рассчитанных на использование в самых разных условиях, в частности уплотнения, производимые компаниями John Crane (США), Aesseal (Великобритания), Wilo, Burgmann (Германия), Grundfos (Дания), Roten, Lowara, Calpeda, DAB (Италия), Ebara (Япония), ООО НПП «ПромГрафит», ООО «Силур», «Новые Технологии» (Россия), ООО «Шанхай Трисун» (Китай) и др. Материалы, используемые для уплотнений различных видов, их температуры эксплуатации, основные достоинства и недостатки приведены в таблице.

Из приведенных данных видно, что уплотнения с температурой эксплуатации до 500°C изготовлены из материалов, содержащих асбестовые волокна, пропитанные связующим на основе каучука или эластомерной смолы, а также из металлических (стальных) и металломатричных (графитовая фольга) материалов. В настоящее время наблюдается тенденция замены асбестовых волокон на другие минеральные волокна, такие как кварцевые, стеклянные, муллитокремнеземные.

Графитовые материалы имеют высокие температуры эксплуатации в химических жидкостях, однако склонны к окислению на воздухе, поэтому находят применение в химической и нефтехимической отраслях промышленности.

Материалы, используемые для уплотнений различных видов

Материал уплотнения, источник информации	Температура эксплуатации, °С	Преимущества	Недостатки
<i>Полимерные уплотнения</i>			
Полиуретан [17]	-60÷+110	Высокая эластичность, упругость и низкая хрупкость, химическая стойкость	Низкая термостойкость, недостаточные механические свойства
Фторопласт [17]	-200÷+320		
<i>Уплотнения на основе волокон и эластомерных матриц</i>			
Паронит – смесь асбестовых волокон, наполнителей и каучука [18]	-50÷+500	Стойкость к воздействию агрессивных сред, высоких температур и давления	Склонность к старению из-за наличия резиновой матрицы, охрупчивание
Углепластики – углеродное волокно+фторопластовая матрица (типа GYLON) [19]	-210÷+260	Высокая гибкость, прочность, химическая стойкость в химических жидких средах и инертных газах	Невысокая температура эксплуатации, окисление в воздушных потоках
Картон на основе асбестовых волокон, пропитанных пластической массой (бакелитом) [17]	До 500	Низкая цена, огнестойкость	Невысокие температуры эксплуатации, низкая прочность
<i>Металлические и металломатричные композиционные уплотнения</i>			
Графитовая фольга (углеродное волокно+перфорированная фольга из нержавеющей стали) [18]	-50÷+500	Прочность, высокая химическая стойкость уплотнений для нефтяной и газовой промышленности	Возможно окисление в воздушных потоках
Карбид вольфрама [20]	-75÷+400	Высокие износостойкость и химическая стойкость	Окисление в кислородсодержащих средах
Стали: низкоуглеродистая, 410, 347 [21]	-200÷+750	Возможность работы при высоких давлениях	Вероятность приварки материала уплотнения к материалу вала
<i>Керамические уплотнения</i>			
Карбид кремния SiC [22]	До 1200	Низкий коэффициент трения, высокая износостойкость	Высокая хрупкость, окисление на воздухе
Оксид алюминия Al ₂ O ₃ [23]	До 1800	Высокая твердость, низкая теплопроводность, стойкость к окислению и коррозии, низкая плотность, термостойкость	Хрупкость при резких перепадах температур

Максимальной температурой эксплуатации (до 1800°С) обладают керамические материалы на основе оксида алюминия. То же самое можно сказать про сальниковые набивки. Шнуры, изготовленные из волокон на основе оксида алюминия, в настоящее время имеют наиболее привлекательный набор свойств – высокую термостойкость, низкую плотность, низкую теплопроводность, стойкость к окислению и коррозии [13–16]. Недостатком керамики на основе Al₂O₃ является ее природная хрупкость, этот недостаток разработчики материалов пытаются преодолеть путем введения модифицирующих добавок. Плотная керамика [24, 25] по сравнению со шнурами имеет возможности изготовления более сложных геометрических форм, более высоких скоростей скольжения, а также неограниченное время хранения в нерабочем состоянии, тогда как сальниковые набивки (шнуры со смазкой) со временем теряют свойства.

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. Krenkel W., Lamon J. High-Temperature Ceramic Materials and Composites /In: 7-th International Conference on High-Temperature Ceramic Matrix Composites (HT-CMC 7). Bayreuth. 2010. P. 938.
3. Grashchenkov D.V., Balinova Yu.A., Tinyakova E.V. Aluminum Oxide Ceramic Fibers and Materials Based on them //Glass and Ceramics. 2012. V. 69. №3–4. P. 130–133.
4. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 05 (viam-works.ru).
5. Щетанов Б.В., Балинова Ю.А., Люлюкина Г.Ю., Соловьева Е.П. Структура и свойства непрерывных поликристаллических волокон α -Al₂O₃ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 13–17.
6. Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г. Теплозащитные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 12–19.
7. Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г., Зимичев А.М., Тинякова Е.В. Высокотемпературные теплоизоляционные и теплозащитные материалы на основе тугоплавких соединений //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 380–386.
8. Бабашов В.Г., Ивахненко Ю.А., Юдин А.В., Зимичев А.М. Керамический материал для деталей установок непрерывной разливки цветных сплавов //Труды ВИАМ. 2014. №12. Ст. 05 (viam-works.ru).
9. Зимичев А.М., Варрик Н.М. К вопросу применения дискретных волокон из тугоплавких оксидов для формирования сердечника термостойких уплотнительных шнуров //Труды ВИАМ. 2015. №2. Ст. 07 (viam-works.ru).
10. Максимов В.Г., Басаргин О.В., Щеглова Т.М., Никитина В.Ю. О проявлении сверхпластичности в полидисперсной керамике муллит–оксид циркония с размером кристаллов более 10 мкм //Труды ВИАМ. 2013. №6. Ст. 04 (viam-works.ru).
11. Тонкослойное керамическое покрытие, способ его получения, поверхность трения на основе тонкослойного керамического покрытия и способ ее получения: пат. №2165484 Рос. Федерация; опубл. 20.04.2001.

12. Тонкослойное керамическое покрытие, способ его получения, поверхность трения на основе тонкослойного керамического покрытия и способ ее получения: пат. №2453640 Рос. Федерация; опубл. 20.10.2011.
13. Торцевое уплотнение вращающегося вала: пат. №2168086 Рос. Федерация; опубл. 27.05.2001.
14. Варрик Н.М., Ивахненко Ю.А., Максимов В.Г. Оксид-оксидные композиционные материалы для газотурбинных двигателей (обзор) //Труды ВИАМ. 2014. №8. Ст. 03 (viam-works.ru).
15. Зимичев А.М., Варрик Н.М., Щеглова Т.М., Никитина В.Ю. Исследование прочностных свойств ровинга из волокон состава $85\%Al_2O_3-15\%SiO_2$ при температуре $1000^{\circ}C$ //Все материалы. Энциклопедический справочник с Приложением «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». 2015. №1. С. 30–35.
16. Бутаков В.В., Басаргин О.В., Бабашов В.Г., Ивахненко Ю.А. Модель поведения волокнистого материала при изгибе //Труды ВИАМ. 2014. №12. Ст. 06 (viam-works.ru).
17. <http://sealing.su/>
18. <http://uplotnenia.ru>
19. <http://garlock.kz/services/catalog/>
20. www.pgn.su
21. <http://technomixcenter.by/>
22. <http://www.seals.highexpert.ru/materials.html>
23. <http://chemindtec.ru/catalogue/2/29/>
24. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 7–11.
25. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and

- technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
2. Krenkel W., Lamon J. High-Temperature Ceramic Materials and Composites /In: 7-th International Conference on High-Temperature Ceramic Matrix Composites (HT-CMC 7). Bayreuth. 2010. P. 938.
 3. Grashchenkov D.V., Balinova Yu.A., Tinyakova E.V. Aluminum Oxide Ceramic Fibers and Materials Based on them //Glass and Ceramics. 2012. V. 69. №3–4. P. 130–133.
 4. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A. Perspektivnye armirujushhie vysokotemperaturnye volokna dlja metallicheskih i keramicheskikh kompozicionnyh materialov [Perspective reinforcing high-temperature fibers for metal and ceramic composite materials] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 05 (viam-works.ru).
 5. Shhetanov B.V., Balinova Ju.A., Ljuljukina G.Ju., Solov'eva E.P. Struktura i svojstva nepreryvnyh polikristallicheskih volokon α -Al₂O₃ [Structure and properties of continuous polycrystalline fibers α -Al₂O₃] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 13–17.
 6. Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Babashov V.G. Teplozashhitnye materialy [Heat-protective materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 12–19.
 7. Ivahnenko Ju.A., Babashov V.G., Zimichev A.M., Tinjakova E.V. Vysokotemperaturnye teploizoljacionnye i teplozashhitnye materialy na osnove tugoplavkih soedinenij [High-temperature heatinsulating and heat-protective materials on the basis of high-melting connections] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 380–386.
 8. Babashov V.G., Ivahnenko Ju.A., Judin A.V., Zimichev A.M. Keramicheskij material dlja detalej ustanovok nepreryvnoj razlivki cvetnyh splavov [Ceramic material for details of installations of continuous razlivka of color alloys] //Trudy VIAM. 2014. №12. St. 05 (viam-works.ru).
 9. Zimichev A.M., Varrik N.M. K voprosu primenenija diskretnykh volokon iz tugoplavkih oksidov dlja formirovanija serdechnika termostojkih uplotnitel'nyh shnurov [To question of application of discrete fibers from high-melting oxides for forming of the core of heat-resistant sealing cords] //Trudy VIAM. 2015. №2. St. 07 (viam-works.ru).
 10. Maksimov V.G., Basargin O.V., Shheglova T.M., Nikitina V.Ju. O projavlenii sverhplastichno-sti v polidispersnoj keramike mullit–oksid cirkonija s razmerom kristallov bolee 10 mkm [About superplasticity manifestation in unequigranular ceramics mullit-zirconium oxide with size of crystals more than 10 microns] //Trudy VIAM. 2013. №6. St. 04 (viam-works.ru).

11. Tonkoslojnoe keramicheskoe pokrytie, sposob ego poluchenija, poverhnost' trenija na osnove tonkoslojnogo keramicheskogo pokrytija i sposob ee poluchenija [Tonkoslojnoye ceramic coating, way of its receiving, friction surface on the basis of tonkoslojny ceramic coating and way of its receiving]: pat. №2165484 Ros. Federacija; opubl. 20.04.2001.
12. Tonkoslojnoe keramicheskoe pokrytie, sposob ego poluchenija, poverhnost' trenija na osnove tonkoslojnogo keramicheskogo pokrytija i sposob ee poluchenija [Tonkoslojnoye ceramic coating, way of its receiving, friction surface on the basis of tonkoslojny ceramic coating and way of its receiving]: pat. №2453640 Ros. Federacija; opubl. 20.10.2011.
13. Torcevoe uplotnenie vrashhajushhegosja vala [Face seal of rotating shaft]: pat. №2168086 Ros. Federacija; opubl. 27.05.2001.
14. Varrik N.M., Ivahnenko Ju.A., Maksimov V.G. Oksid-oksidnye kompozicionnye materialy dlja gazoturbinnih dvigatelej (obzor) [Oksid-oksidnye composite materials for gas turbine engines (review)] //Trudy VIAM. 2014. №8. St. 03 (viam-works.ru).
15. Zimichev A.M., Varrik N.M., Shhegl'ova T.M., Nikitina V.Ju. Issledovanie prochnostnyh svojstv rovinga iz volokon sostava 85%Al₂O₃–15%SiO₂ pri temperature 1000°C [Research of strength properties of roving from structure fibers 85%Al₂O₃–15%SiO₂ at temperature 1000°C] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik s Prilozheniem «Kommentarii k standartam, TU, sertifikatam». 2015. №1. S. 30–35.
16. Butakov V.V., Basargin O.V., Babashov V.G., Ivahnenko Ju.A. Model' povedenija voloknistogo materiala pri izgibe [Model of behavior of fibrous material at bend] //Trudy VIAM. 2014. №12. St. 06 (viam-works.ru).
17. <http://sealing.su/>
18. <http://uplotnenia.ru>
19. <http://garlock.kz/services/catalog/>
20. www.pgn.su
21. <http://technomixcenter.by/>
22. <http://www.seals.highexpert.ru/materials.html>
23. <http://chemindtec.ru/catalogue/2/29/>
24. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Solncev S.S., Sevast'janov V.G. Vysokotemperaturnye konstrukcionnye kompozicionnye materialy na osnove stekla i keramiki dlja perspektivnyh izdelij aviacionnoj tehniki [High-temperature constructional composite materials on the basis of glass and ceramics for perspective products of aviation engineering] //Steklo i keramika. 2012. №4. S. 7–11.

25. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Solncev S.S., Sevast'janov V.G. Perspektivnye vysokotemperaturnye keramicheskie kompozicionnye materialy [Perspective high-temperature ceramic composite materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 20–24.