

УДК 677.523

Е.В. Степанова¹, В.Г. Максимов¹, Д.В. Баруздин¹

ВЛИЯНИЕ ЗАМАСЛИВАТЕЛЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСНЫХ НИТЕЙ ИЗ ОКСИДНЫХ ТУГОПЛАВКИХ ВОЛОКОН

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-56-65

Опробованы различные способы нанесения замасливателей на поверхность керамических оксидных волокон после обжига. Показано, что бесконтактный способ нанесения замасливателя уменьшает обрывность волокон при перематывании. Проведены выбор и опробование композиций замасливателей, улучшающих технологические свойства при операциях текстильной переработки. Проведены сравнительные испытания на разрывную нагрузку и гибкость комплексных нитей с различными составами замасливателей. Дана оценка жесткости, склеивания и обрывности нитей при размотке с паковки.

Ключевые слова: оксидные керамические волокна, замасливатель, удельная разрывная нагрузка, обрывность, гибкость, текстильная переработка.

E.V. Stepanova¹, V.G. Maximov¹, D.V. Baruzdin¹

INFLUENCE OF THE LUBRICANT ON THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF COMPLEX FILAMENTS FROM OXIDE REFRACTORY FIBERS

Various methods of applying lubricants to the surface of ceramic oxide fibers after firing have been tested. It is shown that the contactless method of applying the lubricant reduces the breakage of fibers during rewinding. The selection and testing of lubricant compositions that improve technological properties during textile processing operations have been carried out. Comparative tests for breaking load and flexibility of multifilament yarns oiled with different compositions have been carried out. Rigidity, adhesion and breakage during unwinding from the package are assessed.

Keywords: oxide ceramic fibers, lubricant, specific breaking load, breakage, flexibility, textile processing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время повышенной востребованностью в качестве теплозащитных и теплоизоляционных материалов с рабочей температурой >1200 °С пользуются волокнистые высокотемпературные материалы из тугоплавких оксидов [1–5]. По сравнению с органическими и другими видами неорганических волокон, муллитовые, корундовые и отчасти кварцевые волокна имеют преимущества по таким свойствам, как высокотемпературная прочность, термическая и химическая стабильность, низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) и сохранение диэлектрических свойств при высоких температурах. Для изготовления высокотемпературных теплоизоляционных и радиопрозрачных материалов используют дискретные волокна и непрерывные нити из оксидов алюминия и кремния, а также других тугоплавких оксидов [6–13]. Из дискретных волокон для тепловой защиты поверхностей выпускают гибкие или жесткие маты низкой плотности. Непрерывные волокна в виде многофиламентных

нитей различной линейной плотности применяют для производства текстильных теплоизоляционных изделий: ровницы, лент, тканей и шнуров. Текстильные изделия применяются для теплозащиты и теплоизоляции кабелей, оплетки термопар и огнезащитных экранов. Материалы из этих волокон обладают не только высокой тугоплавкостью, но также имеют низкие значения удельной плотности, отличаются низкой теплопроводностью и высокой химической стойкостью в агрессивных средах.

При производстве текстильных изделий на основе тугоплавких оксидов непрерывная нить проходит ряд операций: трощение, кручение, перематывание, ткачество. Механические свойства волокон из тугоплавких оксидов отличаются от свойств большинства органических волокон практически полным отсутствием эластичности, что связано с низкими пластическими свойствами и чрезвычайно высоким модулем упругости материала волокон. В связи с этим переработка оксидных волокон в текстильные нити и изделия ограничивается их хрупким разрушением при изгибе и растяжении. Одним из приемов повышающим гибкость оксидных волокон (как и других хрупких материалов) является уменьшение диаметра волокна. Поэтому при получении волокна для нитей текстильного назначения в процессе изготовления необходимо обеспечить условия формирования волокон диаметром не более 10 мкм. Однако в узлах трения оборудования линии переработки нитей в текстильные изделия даже тонкие керамические волокна часто не выдерживают нагрузок. Обрывы волокон вызывают ухудшение качества продукции, снижение производительности текстильных машин и сопровождаются образованием пыли, которая ухудшает экологическую обстановку на участке изготовления изделий и приводит к быстрому абразивному износу оборудования.

В текстильном производстве нитей и тканей из растительного сырья для защиты волокон от многократных переменных растягивающих нагрузок применяют специальные операции – шлихтование и эмульсирование [14–16]. При шлихтовании первичную нить в основном из растительных волокон или ткань покрывают слоем клеящего вещества (шлихты). Часть шлихты проникает внутрь нити и склеивает волокна между собой. Обработанная нить становится более компактной и это повышает ее прочность и уменьшает коэффициент трения.

При производстве химических и стеклянных волокон применяют замасливание (эмульсирование) волокна [17–20]. Процесс замасливания является важнейшей операцией при изготовлении нитей, обеспечивающей склеивание (слипание) элементарных волокон путем нанесения на поверхность специально подобранного состава. Состав и технология нанесения замасливателя, обеспечивающие получение нити с улучшенными технологическими свойствами, как правило, полностью не раскрываются. Основные требования при выборе состава следующие:

- замасливатель должен улучшить гибкость нити;
- замасливатель придает гладкость и способствует снижению трения нити, уменьшает ее истираемость при прохождении через нитенаправители и соприкосновении с поверхностями при переработке;
- замасливатель не должен склеивать витки при намотке нити на паковку и не затруднять перемотку;
- после завершения текстильной переработки при необходимости замасливатель можно полностью удалить из изделия.

Для дополнительной защиты нитей из керамических волокон от разрушения (при контакте с технологическим оборудованием) иногда используют вспомогательные органические волокна, которые добавляют к первичным многофиламентным оксидным нитям. Вспомогательные органические нити воспринимают на себя значительную часть растягивающих и изгибающих напряжений и поэтому позволяют сохранить неразрушенной основную часть оксидных волокон при перемотке, трощении, кручении, а затем могут быть удалены или сохранены в зависимости от последующего применения.

Цель данной работы – опробование известных замасливателей, применяемых для синтетических и стеклянных нитей, и выбор составов для работы с первичными многофиламентными нитями из волокон тугоплавких оксидов.

Материалы и методы

Исследования проводили на ровингах, полученных объединением первичных многофиламентных непрерывных нитей из волокон на основе оксида алюминия и муллита с общим содержанием оксида алюминия (в том числе в составе муллита) – не менее 80 %. Волокно получали золь-гель методом из волокнообразующего раствора путем экструзии через фильеру (рис. 1) с последующей термообработкой [21–23].

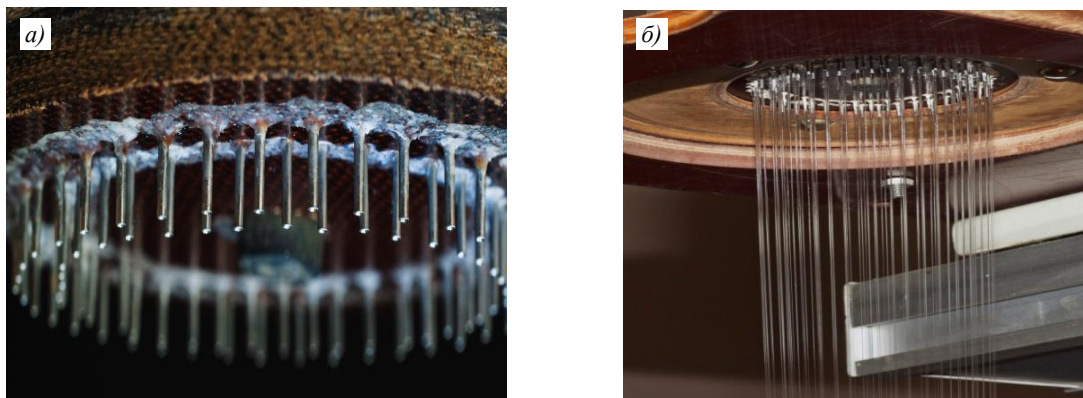


Рис. 1. Многокапиллярная фильера с 80 капиллярами (а) и процесс экструдирования через фильеру (б)

В качестве исходного раствора применяли раствор прекурсоров оксидов алюминия и кремния. Для придания раствору прядильных свойств в раствор вводили поливиниловый спирт. Получение непрерывных волокон осуществляли по методу сухого формования через многокапиллярные фильеры с вытяжкой волокон на вращающийся барабан. Сушку волокон проводили подачей подогретого воздуха в пространство между фильерой и узлом вытяжки. В процессе формования изменением скорости вращения барабана добивались вытяжки гелированных волокон диаметром не более 10 мкм (рис. 2). Видно, что поверхность волокон практически не имеет дефектов, диаметр волокна одинаков по его длине, разброс диаметров от волокна к волокну незначителен. Затем волокна обжигали для удаления растворителя с органических составляющих и получения поликристаллической структуры оксидной фазы.

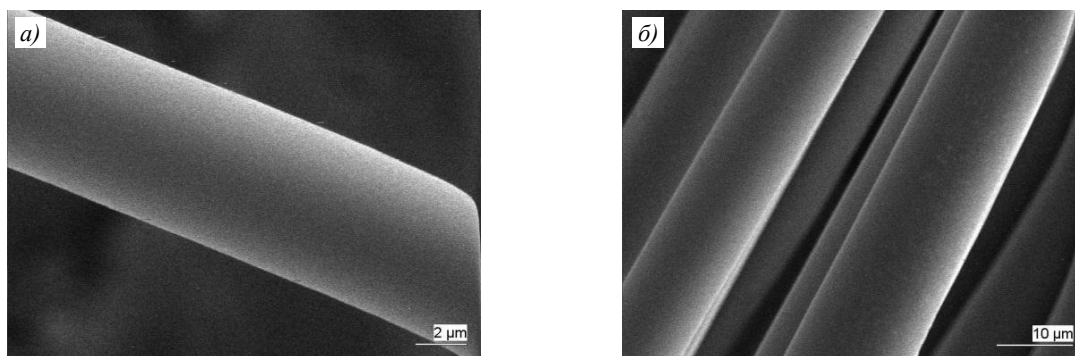


Рис. 2. Внешний вид моноволокна (а) и волокна (б)

Оптические исследования образцов волокна проводили на оптическом микроскопе Olympus BX51 и методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе S 405A. Испытания на разрывную нагрузку первичных нитей проведены на машине Instron на образцах при скорости растяжения 10 мм/мин при базе испытаний 25 мм.

При испытании оксидных нитей на гибкость их прочность оценивали по величине минимального радиуса изгиба без разрушения волокон вокруг цилиндрических оправок диаметром от 0,7 до 10 мм. Оценку влияния замасливателя на технологическую прочность исследовали на макете (рис. 3) нитепровода шнуроплетельной машины при двукратном перегибе вокруг оправки диаметром 6 мм при протягивании нитей с постоянным натяжением величиной 20 г.

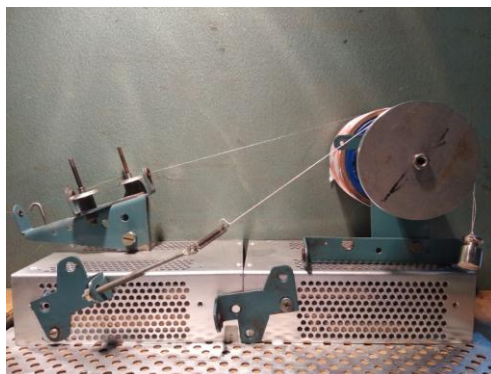


Рис. 3. Макет нитепровода шнуроплетельной машины с двукратным перегибом

Оценку влияния замасливателя на поведение волокон при плетении проводили при протягивании нити через веретено промышленной шнуроплетельной машины с различным натяжением (рис. 4).



Рис. 4. Макет веретена шнуроплетельной машины

Результаты и обсуждение

Исследование влияния замасливателя проводили на многофиламентных нитях линейной плотности 10 текс. Для замасливания нитей из оксида алюминия после высокотемпературного обжига выбран метод нанесения замасливателя (рис. 5) путем ее погружения в раствор при непрерывном протягивании нити при перемотке. Этот метод

показал хорошие показатели смачивания, равномерности нанесения замасливателя и низкую обрывность нити при перемотке по сравнению с методом нанесения раствора роликом, погруженным в ванну с замасливателем.



Рис. 5. Устройство для замасливания нитей путем погружения



Рис. 6. Авиважная обработка нити

В работе [24] проведено опробование способа бесконтактного нанесения замасливателя при прохождении нити через вспененный раствор. Опробование этой авиважной обработки нити с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ) позволило не только значительно уменьшить распушенность нити, а также существенно сократить образование ворсовой пыли в процессе ее перемотки и кручения (рис. 6).

Внешний вид оксидной нити после нанесения замасливателей представлен на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид оксидной нити в исходном состоянии (а) и после обработки замасливателем (б)

На оксидную нить из тугоплавких волокон целесообразно наносить замасливатели в процессе перемотки, при этом нить обрабатывают прямыми или текстильными замасливателями. В состав прямых замасливателей входят клеящие вещества, пластификаторы, эмульгаторы и вода или растворитель. К текстильным замасливателям можно отнести парафиновую эмульсию, препарат ОС-20, стеарин, вазелин и др. Текстильные замасливатели предохраняют волокна от разрушения, но вместе с тем имеют плохую адгезию к полимерным связующим, поэтому их использование ограничено текстильной переработкой с последующем удалением из волокна. Прямые замасливатели, в состав которых входят кремнийорганические соединения (аппреты – например, АГМ-9 и ГВС-9), имеющие функциональные группы, способные к образованию химических связей как с волокном, так и с полимерными связующими, имеют преимущество для замасливания нитей из неорганических волокон, перерабатываемых в полимерные композиты.

В качестве клеящих веществ применяют различные смолы (эпоксидные, полиэфирные), органические соединения каучуков (силиконового, пропиленового, бутилового, фторкаучука), поливинилацетатную эмульсию, поливиниловый спирт, крахмальные смеси и др. В качестве пластификаторов применяют растительные и минеральные масла, кислоты и др. Для образования устойчивых эмульсий пластификаторов в воде применяют эмульгаторы – например, препарат ОС-20. Эмульгаторы могут не применяться, если замасливатель приготовлен в виде раствора в органических растворителях. В качестве аппретирующих веществ используют Волан, ряд этоксисиланов (например, продукт ГВС-9), кремнийорганические амины (например, продукт АГМ-9).

В качестве составов опробованы различные варианты замасливателя: водная дисперсия ПАВ, водная дисперсия ПАВ+растительное масло, крахмал+минеральное масло, гидролизированный продукт АГМ-9, раствор силиконового масла низкой вязкости.

Для оценки эффективности замасливателей различных составов при текстильной переработке в гибкие теплоизоляционные изделия проводили замасливание на одной и той же партии первичной многофиламентной нити линейной плотностью 10 текс. Первичные нити подвергали обжигу при температуре 1000 °С. Замасливатель наносили методом погружения нити в раствор. Применение метода бесконтактной обработки для сравнительных испытаний оказалось невозможным по причине невозможности вспенивания некоторых составов. Результаты испытаний влияния замасливания на свойства нитей из оксидных волокон приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты испытания первичной оксидной нити из тугоплавких волокон
после нанесения замасливателей**

Условный номер нити	Условный номер замасливателя (состав)	Среднее значение удельной разрывной нагрузки, г/текс
1	Без замасливателя (исходное состояние)	20,8
2	С замасливателем 1 (водная дисперсия ПАВ)	17,6
3	С замасливателем 2 (водная дисперсия ПАВ+растительное масло)	19,6
4	С замасливателем 3 (крахмал+минеральное масло)	47,3
5	С замасливателем 4 (гидролизированный продукт АГМ-9)	7,1
6	С замасливателем 5 (раствор силиконового масла)	21,5

В результате проведенных исследований установлено, что применение замасливателя 3 приводит к повышению удельной разрывной нагрузки в 2 раза по сравнению с исходным состоянием. Применение замасливателей 1 и 2 практически не повлияло на прочностные характеристики, хотя при визуальном осмотре видно (рис. 7, б), что после нанесения замасливателей происходит сплочение филаментов между собой и уменьшается общая распушенность нити. Применение в качестве текстильного стандартного адгезионного замасливателя 4 (аппрет АГМ-9) вызвало существенное снижение прочностных свойств нити после обработки замасливателем.

Оценку устойчивости нити к технологическим изгибам оценивали по величине диаметра оправки, при котором начинается визуально заметное разрушение волокон оксида алюминия в составе навитой на оправку комплексной нити. Влияние замасливания на свойства нити из оксидных волокон, определенное в результате испытаний, представлено в табл. 2–7.

Таблица 2

**Результаты испытания на технологическую прочность на изгиб
первичной оксидной нити без замасливателя**

Условный номер образца	Диаметр цилиндра, мм	Состояние поверхности нитей
1	10	Разрывов и расслоений не обнаружено
2	8	
3	6	
4	4	
5	2	
6	1,2	Частичное разрушение нити
7	0,8	Нить порвалась

Таблица 3

**Результаты испытания на технологическую прочность на изгиб
первичной оксидной нити с замасливателем 1 (водная дисперсия ПАВ)**

Условный номер образца	Диаметр цилиндра, мм	Состояние поверхности нитей
1	10	Разрывов и расслоений не обнаружено
2	8	
3	6	
4	4	
5	2	
6	1,2	Частичное разрушение нити
7	0,8	

Таблица 4

**Результаты испытания на технологическую прочность на изгиб первичной
оксидной нити с замасливателем 2 (водная дисперсия ПАВ+растительное масло)**

Условный номер образца	Диаметр цилиндра, мм	Состояние поверхности нитей
1	10	Разрывов и расслоений не обнаружено
2	8	
3	6	
4	4	
5	2	
6	1,2	Минимальное разрушение нити
7	0,8	Частичное (половина) разрушение нити

Таблица 5

**Результаты испытания на технологическую прочность на изгиб
первичной оксидной нити с замасливателем 3 (крахмал+минеральное масло)**

Условный номер образца	Диаметр цилиндра, мм	Состояние поверхности нитей
1	10	Разрывов и расслоений не обнаружено
2	8	
3	6	
4	4	
5	2	
6	1,2	Частичное разрушение нити
7	0,8	Разрушение нити

Таблица 6

**Результаты испытаний на технологическую прочность на изгиб
первичной оксидной нити с замасливателем 4 (гидролизованный аппрет АГМ-9)**

Условный номер образца	Диаметр цилиндра, мм	Состояние поверхности нитей
1	10	Разрывов и расслоений не обнаружено
2	8	
3	6	
4	4	
5	2	Частичное разрушение нити
6	1,2	
7	0,8	Разрушение нити

Таблица 7

**Результаты испытаний на технологическую прочность на изгиб
первичной оксидной нити с замасливателем 5 (раствор силиконового масла)**

Условный номер образца	Диаметр цилиндра, мм	Состояние поверхности нитей
1	10	Разрывов и расслоений не обнаружено
2	8	
3	6	
4	4	
5	2	
6	1,2	
7	0,8	Минимальное разрушение нити

Наилучшие результаты прочности на изгиб получены с применением замасливателя 5 (раствор силиконового масла), которая важна для текстильной переработки. Нить, обработанная этим замасливателем, выдержала изгиб вокруг оправки диаметром 0,8 мм с разрушением не более 10 % элементарных волокон.

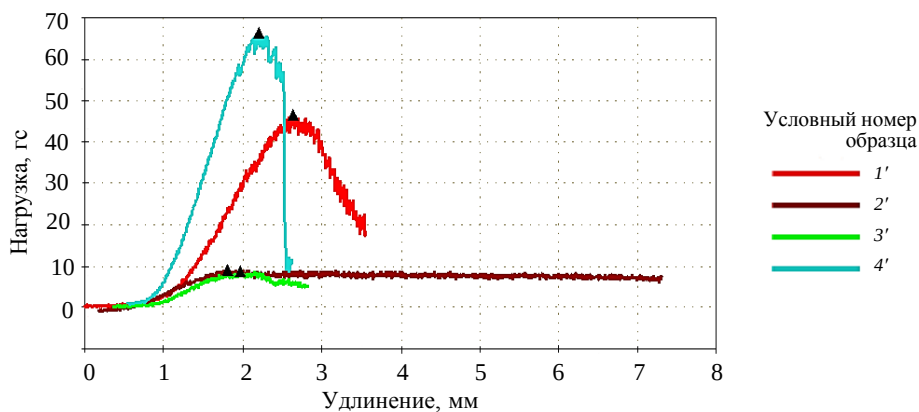


Рис. 8. Влияние замасливания на удельную разрывную нагрузку ровингов из исследованных оксидных волокон (образцы 2' и 3' – без замасливателя (исходное состояние); 1' и 4' – после обработки замасливателем)

Анализ диаграмм растяжения (рис. 8) показал, что характер разрыва замасленных и исходных нитей различен. Для исходных оксидных нитей диаграмма растяжения имеет выраженную площадку «псевдотекучести», вызванную поочередным разрушением неоднородных высокомолекулярных волокон, в то время как для образцов, обработанных замасливателем, эффект поочередного разрушения вследствие неоднородности выражен существенно слабее [25]. Это свидетельствует о том, что слой замасливателя

частично склеивает элементарные моноволокна в нити между собой, в то же время обеспечивая их взаимное скольжение с частичным перераспределением нагрузки между первичными нитями в составе ровинга. Кроме того, защитный слой замасливателя в процессе растяжения предупреждает повреждение элементарных волокон при их взаимном проскальзывании.

Кроме определения прочностных характеристик, проводили визуальную качественную оценку нитей, обработанных замасливателями, на жесткость, склеивание и обрывность при размотке. Анализ показал, что в большинстве случаев замасливатели хорошо склеивают элементарные нити в комплексную нить, которая не ворсится, а обрывность при намотке уменьшается.

Нанесение замасливателя на основе крахмала после высыхания приводит к повышенной жесткости нити. При дальнейшей текстильной переработке, несмотря на высокую удельную разрывную нагрузку, нити имели повышенную обрывность.

Замасливатели с ПАВ (водно-эмульсионные) дают кратковременный эффект склеивания нити, который после сушки значительно ослабевает. Судя по внешнему виду, нити после обработки и сушки не дают достаточной склейки филаментов. Увеличение ворсистости приводит к увеличению обрывности при намотке.

С применением замасливателя 5 (раствор силиконового масла) трощением в 5–10 первичных нитей изготовлена партия комплексных нитей для опробования возможности переработки на стандартной (неадаптированной к керамическому волокну) шнуроплетельной машине. Эффективность влияния использованных замасливателей на технологические свойства партии комплексных нитей оценена при плетении оболочки шнура. При плетении происходит не только размотка нити с подающих веретен, но и многократные перегибы нитей под значительным натяжением с трением вокруг роликов и направляющих. Исследованиями при регулировке возможных режимов работы установлено, что даже при самых малых скоростях и минимальных натяжениях, несмотря на замасливание, в нитях наблюдается значительное количество обрывов волокон в местах их перегибов и трения о нитеводители.

В результате проведенных исследований выявлено, что в большинстве случаев повышаются прочностные характеристики обработанных замасливателями оксидных нитей из тугоплавких волокон, хотя они продолжают оставаться малотехнологичными для переработки на стандартном текстильном оборудовании.

Заключения

Установлено, что обрывность нитей при перемотке после обжига можно значительно уменьшить при бесконтактном способе нанесения замасливателя. После его нанесения распушенная нить, как правило, становится более уплотненной и равномерной по линейной плотности. Показано, что в результате замасливания уменьшается обрывность нити при испытаниях на изгиб и растяжение, а также образование пыли после механического взаимодействия с элементами текстильного оборудования.

Исследование влияния замасливателей на основе водных растворов, в состав которых входит ПАВ, показало кратковременный эффект действия в пределах времени испарения растворителя. Применение этих замасливателей целесообразно при операциях перемотки нити. Замасливатель на основе силиконового масла позволил улучшить механическую прочность оксидных нитей при изгибах.

Опробование оксидных нитей при работе на промышленной шнуроплетельной машине показало недостаточную эффективность применения использованных замасливателей. Для более существенного уменьшения обрывности нитей, по-видимому, необходимо ввести в состав комплексной нити вспомогательные органические нити, что характерно для многих промышленных нитей подобного типа, а также доработать шнуроплетельную машину для работы с оксидными волокнами.

Благодарности

Авторы выражают особую благодарность к.т.н. А.М. Зимичеву за оказанную помощь при проведении исследования и написании данной статьи.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
3. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
4. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
5. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
6. Балинова Ю.А. Непрерывные поликристаллические волокна оксида алюминия для композиционных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2012. 19 с.
7. Балинова Ю.А., Кириенко Т.А. Непрерывные высокотемпературные оксидные волокна для теплозащитных, теплоизоляционных и композиционных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 4. С. 24–29.
8. Preparation of inorganic oxide monofilaments: pat. US 3311689A; filed. 17.01.63; publ. 28.03.68.
9. Alumina fiber: pat. 3808015A; filed. 12.05.72; publ. 30.04.74.
10. Волокна из оксидной керамики: пат. 2396388 Рос. Федерация; заявл. 10.02.10; опубл. 10.08.10.
11. Афанасов И.М., Лазорьяк Б.И. Высокотемпературные керамические волокна. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 51 с.
12. Ивахненко Ю.А., Баруздин Б.В., Варрик Н.М., Максимов В.Г. Высокотемпературные волокнистые уплотнительные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 272–289. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-272-289.
13. Шавнев А.А., Бабашов В.Г., Варрик Н.М. Непрерывные волокна оксида алюминия (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 27–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-27-34.
14. Сурнина Н.Ф., Мартынова А.А. Технология и оборудование ткацкого производства. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. С. 44–67.
15. Гинзбург Л.Н., Комаров В.Г., Забелин В.А. Прядение лубяных и химических волокон и производство крученых изделий. М.: Легкая индустрия, 1971. С. 81–82.
16. Липенков Я.Я. Прядение шерсти. М.: Легкая индустрия, 1979. С. 98–105.
17. Черняк М.Г. Непрерывное стеклянное волокно. Основы технологии и свойства. М.: Химия, 1965. 320 с.
18. Роговин З.А. Основы химии и технологии химических волокон: в 2 т. М.: Ленинград, 1964. Т. 1. 518 с.
19. Макаров М.С., Казанков Ю.В. Производство изделий из стеклопластиков. Л.: Химия, 1973. С. 11.
20. Пакшвер А.Б. Физико-химические основы технологии химических волокон. М.: Химия, 1972. 432 с.
21. Зябицкий А. Теоретические основы формирования волокон. М.: Химия, 1979. С. 479–494.
22. Способ получения высокотемпературного волокна на основе оксида алюминия: пат. 2212388 Рос. Федерация; заявл. 19.11.01; опубл. 20.09.03.
23. Зимичев А.М., Варрик Н.М., Сумин А.В. Исследование процесса экструзии непрерывных тугоплавких волокон // Труды ВИАМ. 2017. № 1 (49). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-6-6.
24. Шварц А., Перри Дж., Берч Дж. Поверхностно-активные вещества и моющие средства. М.: Иностранная литература, 1960. С. 420–556.
25. Зимичев А.М., Варрик Н.М., Сумин А.В. Нити из тугоплавких оксидов для уплотнительной теплоизоляции // Труды ВИАМ. 2015. № 6. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-5-5.