



УДК 677.4

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-5-5

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ШНУРА  
ИЗ ВОЛОКОН «FIBERFRAX»**

Т.М. Щеглова

А.М. Зимичев

*кандидат технических наук*

Н.М. Варрик

**Сентябрь 2014**

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.

Т.М. Щеглова<sup>1</sup>, А.М. Зимичев<sup>1</sup>, Н.М. Варрик<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ШНУРА ИЗ ВОЛОКОН «FIBERFRAX»

*Проведено исследование образцов шнура производства зарубежной компании для высокотемпературного использования. Изучены внешний вид и строение шнура; нити первого и второго типа в составе шнура, а также их структура – с помощью бинокулярного микроскопа, СЭМ и РФА. Определена линейная плотность шнура и его составляющих. Проведен анализ поведения образцов нитей первого и второго типа после обжига при различных температурах (потеря массы, РФА, СЭМ, оптический микроскоп). В результате проведенного исследования выяснено, что для получения шнура диаметром 8 мм линейной плотностью 18 ктекс использовано два типа нитей: в качестве сердечника используют две нити диаметром по 3 мм с основой из стеклонити, а в качестве оплетки – шесть нитей диаметром ~1,5 мм, армированных металлической проволокой. Каждая из нитей – нить первого типа (с проволокой) и нить второго типа (со стеклонитью) – состоит из двух одинаковых переплетенных между собой нитей. Обе нити в качестве волокнистой массы содержат смесь дискретных и штапельных волокон, хаотично расположенных вокруг основы – проволоки и стеклонити.*

**Ключевые слова:** теплоизоляция, шнур, нить, стекловолокно, высокотемпературное уплотнение.

T.M. Shcheglova, A.M. Zimichev, N.M. Varrik

## RESEARCH OF SAMPLES OF THE CORD FROM «FIBERFRAX» FIBERS

*Samples of a cord produced by a foreign company were investigated for high-temperature use. Appearance and cord structure, threads of the first and second type as a part of a cord were investigated. In addition, the structure of threads of the first and second type was studied by binocular microscope, SEM and RFA. The linear density of the cord and its components was determined. The analysis of behavior of samples of threads of the first and second type after calcining at various temperatures was carried out (loss of weight, RFA, SEM, an optical microscope). As a result of the conducted research it was found out that for production of Ø8 mm cord with linear density of 18 ktex, two types of threads were used: two threads of 3 mm in diameter with glass fabric*

*warp were used as the core and six threads of ~1.5 mm diameter, reinforced with metal wire as the braid. Each of threads, i.e. the thread of the first type (with the wire) and the thread of the second type (with glass fabric), consist of two identical threads bound among themselves. As the fibrous mass, both threads contain a mixture of discrete and staple fibers, which are chaotically located around the warp (wire and glass fiber).*

**Keywords:** *heat insulation, cord, thread, glass fiber, high temperature sealing.*

---

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

## Введение

Гибкие высокотемпературные уплотнительные теплоизоляционные материалы, работающие при температурах  $>1000^{\circ}\text{C}$ , – в настоящее время одно из приоритетных направлений для разработчиков материалов [1–12]. Из непрерывных тугоплавких волокон получают гибкие тканые и нетканые теплозащитные и теплоизоляционные материалы, уплотнительные шнуры и композиционные материалы на основе металлических и керамических матриц.

С повышением рабочих температур энергетических установок изменились и требования к уплотнительным шнурам. В передовых гиперзвуковых двигателях необходимы высокотемпературные уплотнения, расположенные по периметру движущихся плоскостей и эффективно работающие в высокоскоростных потоках горячих газов [13–18].

Теплоизоляционные уплотнительные шнуры традиционно производили из асбестовых или базальтовых волокон, они представляли собой цилиндрическое тело из волокнистого или нитевидного материала с обвивкой из нитей или пряжи.

Технологии изготовления 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. Кроме того, при изготовлении уплотнительных шнуров из термостойких оксидных волокон используют вспомогательные материалы, облегчающие обработку хрупкой керамики [19–23].

В данной работе проведено исследование образцов шнура производства зарубежной компании для высокотемпературного использования. Согласно информации с сайта компании Unifrax, образцы шнура представляют собой высокопрочное изделие с низкой сжимаемостью для высокотемпературного применения. Продукт рекомендован

к использованию в сверхмощном оборудовании, в частности – в качестве уплотнений часто открываемых крышек и дверей силовых и нагревательных установок.

## Материалы и методы

### *Строение шнура на основе волокон «Fiberfrax»*

При визуальном осмотре образца установлено, что при изготовлении данного изделия использовано два вида крученых нитей (рис. 1):

– нити диаметром ~1,5 мм на основе дискретных керамических волокон с добавлением штапельных волокон, армированные металлической проволокой – нити *первого типа*;

– нити диаметром ~3 мм на основе дискретных керамических волокон с добавлением штапельных волокон, армированные непрерывными многофиламентными стекловолокнами – нити *второго типа*.

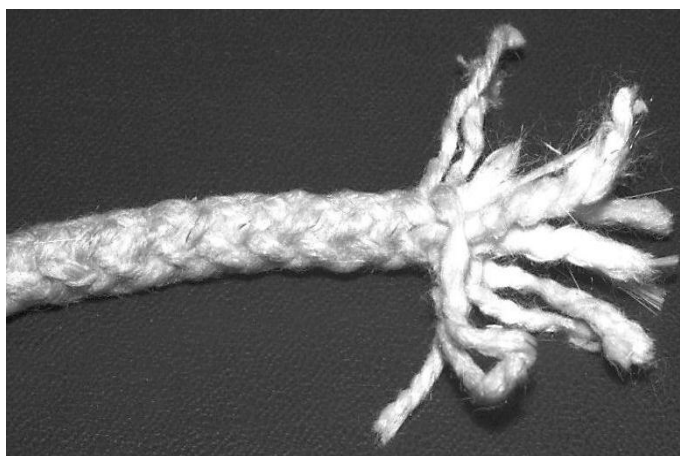


Рисунок 1. Шнур на основе волокон марки «Fiberfrax»

Шнур содержит шесть нитей первого типа в качестве внешней оплетки и две нити второго типа в качестве внутреннего сердечника.

Образцы разделили на отдельные нити, провели измерение линейной плотности нитей, определили их фазовый состав в исходном состоянии, после низкотемпературного (при 400°C в течение 1 ч) и высокотемпературного обжигов (при 1160°C в течение 1 ч), а также изменение массы при термообработке.

### *Строение нитей и их линейная плотность*

*Нити на основе дискретных и штапельных непрерывных волокон,  
армированные металлической проволокой (нити первого типа)*

Нить первого типа скручена из двух нитей, каждая из которых содержит металлическую проволоку и волокнистую массу. Линейная плотность нити определена путем



Нить второго типа состоит из двух скрученных нитей, каждая из которых имеет основу в виде многофиламентного непрерывного стекловолокна и волокнистую массу из смеси дискретных и штапельных волокон (рис. 3).

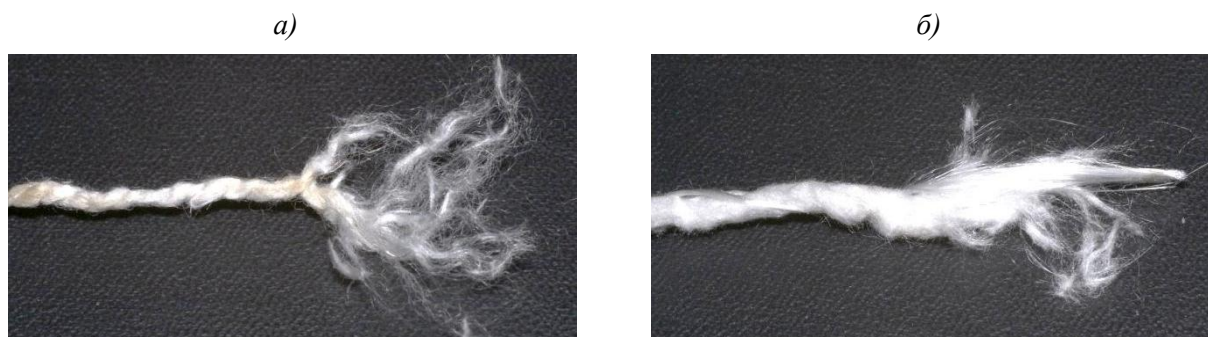


Рисунок 3. Двойная крученая нить с основой из непрерывного стекловолокна (а) и одиночная нить, армированная непрерывным стекловолокном (б)

Число филаментов в стеклонити определяли двумя методами.

По *первому методу* число филаментов  $n$  находили по формуле:

$$n = m_n / m_\phi, \quad (1)$$

где  $m_n$ ,  $m_\phi$  – масса пучка и монофиламента соответственно.

Определили массу пучка ( $m_n = 0,00555$  г), длину нити ( $l = 70$  мм) и диаметр монофиламента ( $d_\phi = 9$  мкм = 0,009 мм). Массу монофиламента вычислили по формуле:

$$m_\phi = V_\phi \rho = [\pi d_\phi^2 / 4 l] \rho, \quad (2)$$

где  $V_\phi$  – объем монофиламента;  $\rho$  – плотность стекла ( $2,45$  г/см<sup>3</sup> =  $2,45 \cdot 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup>).

Подставив все значения в формулу (1), получим число филаментов:

$$n = 0,00555 / [(3,14 \cdot (0,009)^2 / 4) \cdot 70] \cdot 2,45 \cdot 10^{-3} = 509,1.$$

*Второй метод* позволяет оценить число филаментов в пучке приблизительным методом: с помощью СЭМ определяют диаметры нити и одного филамента, а количество филаментов вычисляют путем деления площади поперечного сечения нити на площадь сечения монофиламента и умножения полученного результата на поправочный коэффициент, учитывающий степень заполнения объема пучка. Коэффициент заполнения для рыхлых материалов принят 0,4. Диаметр пучка составил 320 мкм, средний диаметр монофиламента 9 мкм.

По второму методу число филоментов  $n$  находили из выражения:

$$n = 0,4 [(\pi D^2 / 4) / (\pi d^2 / 4)], \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр поперечного сечения многофиламентной нити;  $d$  – диаметр монофиламента.

Подставив все значения в формулу (3), получим число филаментов:

$$n=0,4 [(3,14(320)^2/4)/(3,14(9)^2/4)]=505,7.$$

Таким образом, оба метода дали приблизительно один и тот же результат – многофиламентная стеклонить содержит ~500 филаментов (рис. 4, а). На микрофотографии, полученной с помощью СЭМ (рис. 4, б), видно, что нить второго типа также состоит из смеси дискретных и штапельных волокон.

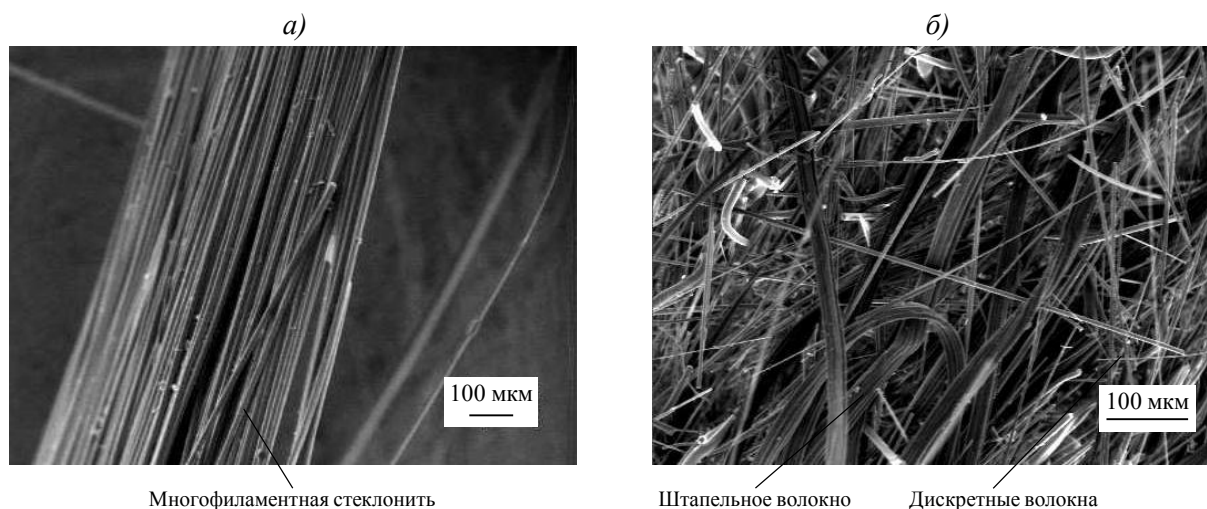


Рисунок 4. Вид нитей второго типа

Линейная плотность нити второго типа составила ~1120 текс, а многофиламентной стеклонити: ~77 текс (табл. 1). Необходимо отметить, что полученные данные следует считать приближенными, так как расчет производился на основании замеров образцов небольшой длины, что увеличивает процент ошибки.

Таблица 1

| Линейная плотность образцов    |               |               |  |
|--------------------------------|---------------|---------------|--|
| Вид образца                    | Длина $L$ , м | Масса $m$ , г | Линейная плотность $m \cdot 1000/L$ , текс |
| Шнур                           | 0,110         | 1,98          | 18000 (18 ктекс)                           |
| Нить оплетки (первого типа)    | 0,060         | 0,07          | 857,1                                      |
| Нить сердечника (второго типа) | 0,107         | 0,12          | 1121,5                                     |
| Многофиламентная стеклонить    | 0,130         | 0,01          | 76,92                                      |

**Рентгенофазовый анализ (РФА) составных элементов шнура: нитей, волокон и проволоки**

Для определения состава нитей проведен рентгенофазовый анализ проволоки и волокнистой массы.

На рис. 5 представлены результаты рентгенофазового анализа проволоки диаметром 100 мкм из нити первого типа. На рентгенограмме присутствуют пики, соответствующие межплоскостным расстояниям 2,087; 1,80 и 1,272. По-видимому, проволока сделана из никелевого сплава (межплоскостные расстояния для Ni составляют соответственно 2,038; 1,766 и 1,250).

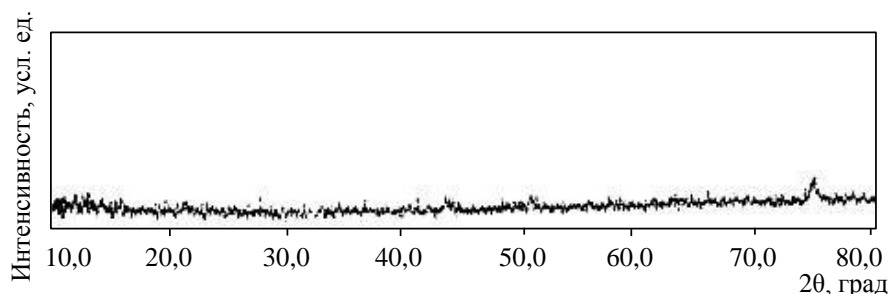


Рисунок 5. Рентгенограмма проволоки из нити первого типа

Волокнистая масса в исходном состоянии – рентгеноаморфна. Для выявления фазового состава волокон проведен двухступенчатый обжиг нитей. На первой стадии образцы подвергли низкотемпературному обжигу при 450°C в течение 1 ч. После обжига определили изменение массы образцов (табл. 2), изучили их микроструктуру с помощью СЭМ и провели рентгенофазовый анализ.

Таблица 2

**Изменение массы образцов после обжига**

| Вид обработки        | Масса образцов, г, из нити               |   |            |
|----------------------|--|---|------------|
|                      | первого типа<br>(армирование проволокой) | второго типа<br>(армирование стеклонитью) | стеклянной |
| В исходном состоянии | 0,09                                     | 0,07                                      | 0,01       |
| Обжиг при 450°C, 1 ч | 0,06                                     | 0,05                                      | 0,01       |
| Изменение массы, г/% | 0,03/33,3                                | 0,02/28,5                                 | –          |

После термообработки при взвешивании выявили снижение массы образца нити первого типа на 33,3%, образца нити второго типа – на 28,5%, а исследование на сканирующем электронном микроскопе показало, что штапельные волокна отсутствуют. Вероятно, штапельные волокна – это целлюлозные волокна, которые выгорели за время термообработки. На рис. 6, а представлена микрофотография (СЭМ) нити второго типа после низкотемпературного обжига. Видно, что штапельные волокна ленточного вида отсутствуют, а остались только дискретные волокна. Рентгено-фазовый анализ оставшихся волокон показал, что они по-прежнему рентгеноаморфны.

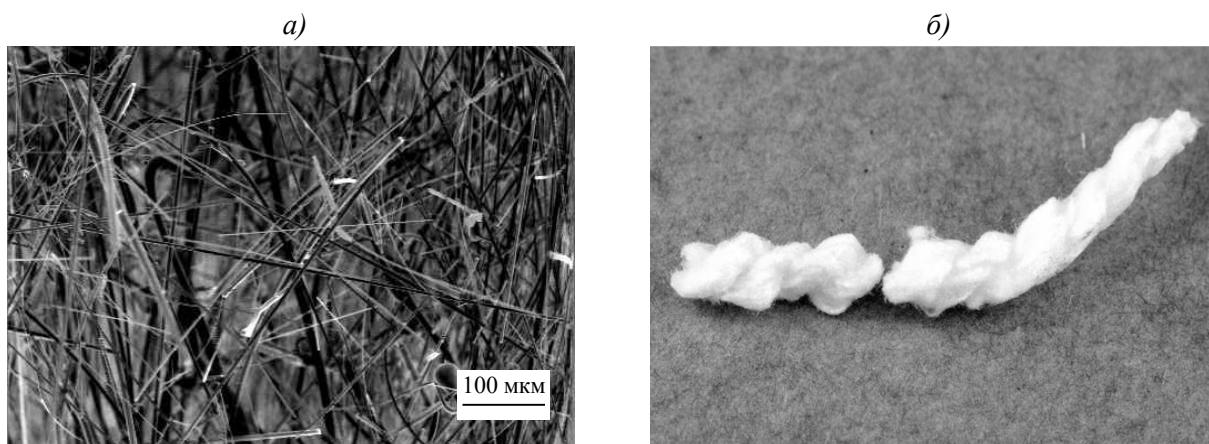


Рисунок 6. Вид нити второго типа после обжига по режимам: 450°C, 1 ч (а) и 1160°C, 1 ч (б)

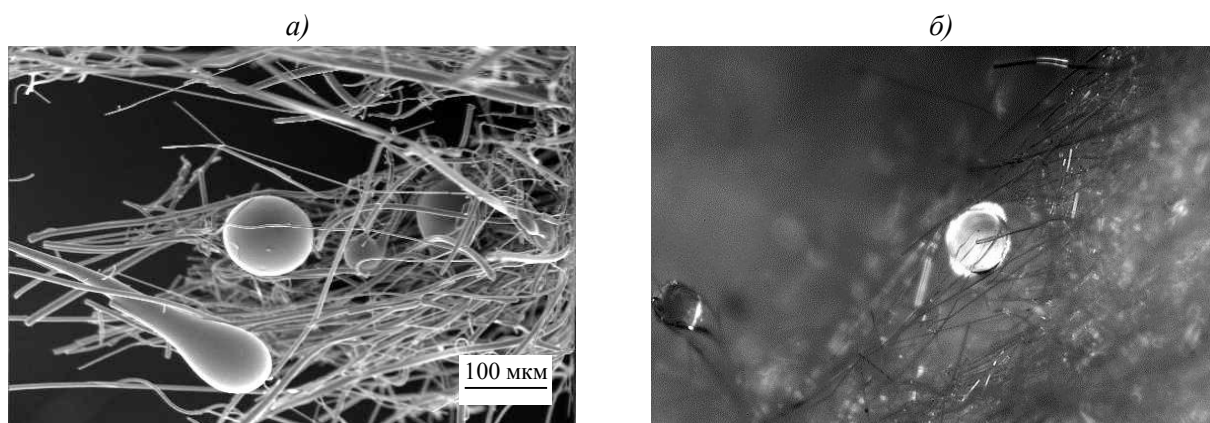


Рисунок 7. Микрофотографии нити второго типа после обжига по режиму 1160°C, 1 ч, полученные с помощью СЭМ (а) и оптического микроскопа (б)

Затем проведена вторая стадия обжига. Образцы подвергли высокотемпературному обжигу при 1160°C в течение 1 ч. Исследование образца нити после обжига показало, что масса его не изменилась, но многофиламентное непрерывное стекловолокно исчезло (рис. 6, б). Изучение образца на сканирующем электронном микроскопе выявило наличие стеклянных шариков в волокнистой массе (рис. 7).

На рис. 8 представлена рентгенограмма нити второго типа в исходном состоянии и после высокотемпературного обжига при 1160°C. На рентгенограмме 1, соответствующей исходному состоянию нити, пики отсутствуют, это свидетельствует о том, что нить рентгеноаморфна. На рентгенограмме 2, соответствующей нити после обжига, присутствуют пики, характерные для муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), и гало, соответствующее аморфному  $\text{SiO}_2$ , что свидетельствует об образовании при обжиге муллита с избытком

оксида кремния. На основании полученных данных можно сделать вывод, что нить содержит муллитокремнеземные волокна.

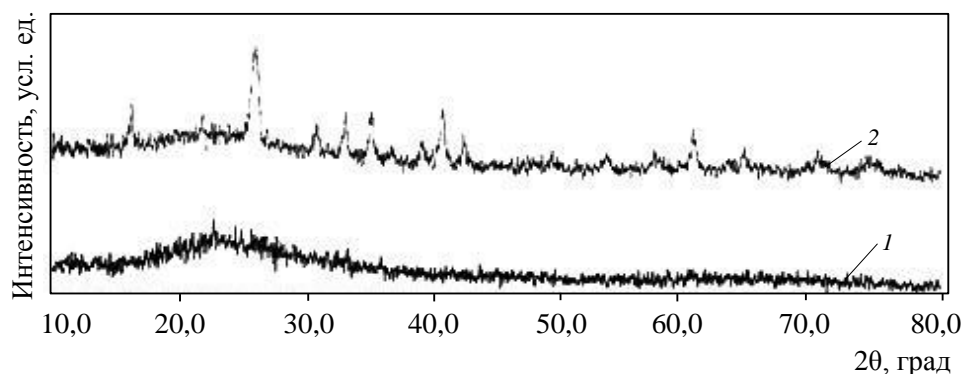


Рисунок 8. Рентгенограмма нити второго типа в исходном состоянии (1) и после высокотемпературного обжига при 1160°C (2)

На оптическом микроскопе провели исследование диаметра непрерывных стекловолокон многофиламентной нити – основы нити второго типа (табл. 3).

Таблица 3

**Измерение диаметра непрерывного стекловолокна**

| Условный номер образца<br>(стекловолокно) | Диаметр волокна | Среднее значение диаметра |
|---|-----------------|---------------------------|
|   | мкм             |                           |
| 1   | 10,44           | 7,925                     |
| 2   | 7,46            |                           |
| 3   | 6,70            |                           |
| 4   | 6,34            |                           |
| 5   | 7,46            |                           |
| 6   | 9,70            |                           |
| 7   | 8,21            |                           |
| 8   | 7,09            |                           |

### Обсуждение и заключения

В результате проведенного исследования выяснено, что для получения шнура диаметром 8 мм линейной плотностью 18 ктекс использовано два типа нитей: в качестве сердечника – две нити диаметром по 3 мм с основой из стеклонити, а в качестве оплетки – шесть нитей диаметром ~1,5 мм, армированных металлической проволокой (рис. 9).



Рисунок 9. Шнур из волокон марки «Fiberfrax», содержащий две нити сердечника и шесть нитей оплетки

Каждая из нитей – нить первого типа (с проволокой) и нить второго типа (со стеклонитью) – состоит из двух одинаковых переплетенных между собой нитей (рис. 10). Обе нити в качестве волокнистой массы содержат смесь дискретных и штапельных волокон, хаотично расположенных вокруг основы (проволоки или стеклонити).

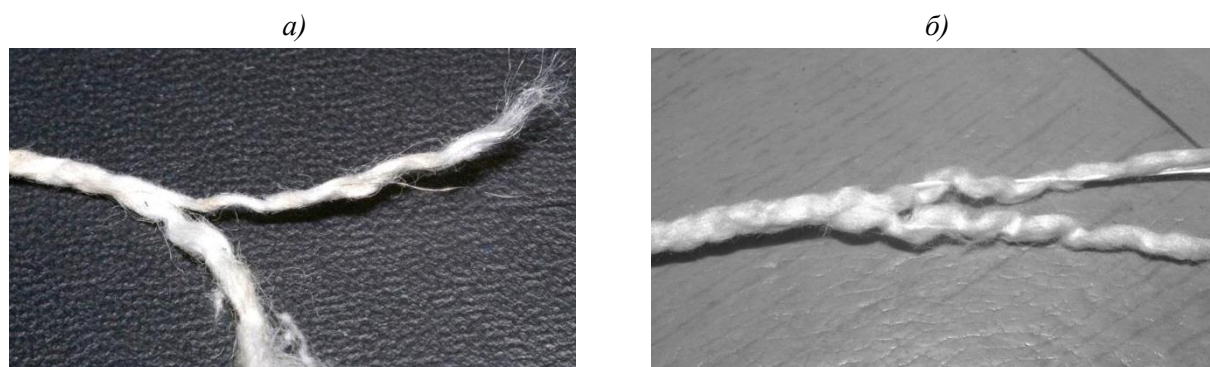


Рисунок 10. Нити оплетки (первого типа; а) и сердечника (второго типа; б) шнура из волокон марки «Fiberfrax»

Проволока выполнена из сплава на основе никеля. По информации, содержащейся на сайте компании Unifrax, нити армированы проволокой сплава Инконель – жаропрочного сплава Ni–15%Cr–9%Fe, который может быть легирован также Ti, Al, Mo.

Стеклонить – многофиламентная нить из непрерывных стекловолокон со средним диаметром ~8 мкм. При температуре >600°C нить расплавляется и превращается в стекло в виде шариков диаметром ~100 мкм, которые остаются в массе дискретных волокон.

Нити обоих типов содержат смесь дискретных и штапельных волокон. Дискретные волокна диаметром 2–5 мкм, вероятно муллитокремнеземные, сохраняются до 1160°C, а штапельные волокна, имеющие вид ленты шириной до 30 мкм, скорее всего – целлюлозные, выгорают при 400°C. Содержание целлюлозных волокон в нити ~30% (по массе), что в пересчете на объемную долю составляет до 90%, так как плотность муллита в 3 раза выше плотности целлюлозы. Вводятся целлюлозные волокна, очевидно, как вспомогательное средство, облегчающее прядение нити. После выдержки нити второго типа (со стеклонитью) при 1160°C в течение 1 ч остается дискретное муллитокремнеземное волокно, содержащее стеклянные шарики, которое практически не сохраняет целостность нити.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г., Зимичев А.М., Тинякова Е.В. Высокотемпературные теплоизоляционные и теплозащитные материалы на основе волокон тугоплавких соединений //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 380–385.
3. Тинякова Е.В., Гращенков Д.В. Теплоизоляционный материал на основе муллитокорундовых и кварцевых волокон //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 43–46.
4. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Абузин Ю.А., Ивахненко Ю.А. Металлические и керамические композиционные материалы /В сб. материалов Международной науч.-практич. конф. «Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения». Т. 1. Казань. 2008. С. 181–188.
5. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
6. 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).
7. Гращенков Д.В., Щетанов Б.В., Тинякова Е.В., Щеглова Т.М. О возможности использования кварцевого волокна в качестве связующего при получении легковесного теплозащитного материала на основе волокон  $Al_2O_3$  //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 8–14.
8. Зимичев А.М., Варрик Н.М., Далин М.А. Измерение модуля упругости волокон из тугоплавких оксидов //Труды ВИАМ. 2014. №6. Ст. 05 (viam-works.ru).
9. Зимичев А.М., Варрик Н.М. Термогравиметрические исследования нитей на основе оксида алюминия //Труды ВИАМ. 2014. №6. Ст. 06 (viam-works.ru).
10. Варрик Н.М. Термостойкие волокна и теплозвукоизоляционные огнезащитные материалы //Труды ВИАМ. 2014. №6. Ст. 07 (viam-works.ru).
11. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
12. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.

13. Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г. Теплозащитные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 12–20.
14. Arambakam R., Vahedi Tafreshi H. A simple simulation method for designing fibrous insulation materials //Materials & Design. 2013. V. 44. №2. P. 99–106.
15. Ning Du, Weiwei Sun. Optimal porosity distribution of fibrous insulation International //Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. V. 52. №19–20. P. 4350–4357.
16. Krenkel W., Lamon J. High-Temperature Ceramic Materials and Composites /In: 7-th International Conference on Ceramic Matrix Composites (HT-CMC 7). 2010. 938 p.
17. Ceramic Fibers and Coatings. Advanced Materials for the Twenty-First Century Committee on Advanced Fibers for High-Temperature Ceramic Composites. Washington: National Academy Press. 1998. 95 p.
18. Wilson D.M., Visser L.R. High performance oxide fibers for metal and ceramic composites /In: Processing of fibers & Composites. Barga. 2000. 31 p.
19. Parlier M., Ritti M.-H., Jankowiak A. Potential and Perspectives for Oxide-Oxide Composites //Journal Aerospace. 2011. №3. P. 1–12.
20. Веб-сайт компании Johns Manville (США) [www.jm.com](http://www.jm.com).
21. Веб-сайт компании VitCas (Великобритания) [www.vitcas.com](http://www.vitcas.com).
22. Веб-сайт международного холдинга Unifrax [www.unifrax.com](http://www.unifrax.com).
23. Bunsell A.R. Oxide fibers for high-temperature reinforcement and insulation //JOM. 2005. V. 57. №2. P. 48–51.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace Materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2008. №3. S. 2–14.
2. Ivahnenko Ju.A., Babashov V.G., Zimichev A.M., Tinjakova E.V. Vysokotemperaturnye tep-loizoljacionnye i teplozashhitnye materialy na osnove volokon tugoplavkih soedinenij [High-temperature and heat-insulating materials based on fibers of refractory compounds] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 380–385.
3. Tinjakova E.V., Grashhenkov D.V. Teploizoljacionnyj material na osnove mullitokorundovyh i kvarcevyh volokon [Thermal insulation material on the basis of mullite-corundum and quartz fibers] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 43–46.
4. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Abuzin Ju.A., Ivahnenko Ju.A. Metallicheskie i keramicheskie kompozicionnye materialy [Metal and ceramic composite materials] /V sb. ma-

- terialov Mezhdunarodnoj nauch.-praktich. konf. «Sovremennye tehnologii – kljuchevoe zveno v vozrozhdenii otechestvennogo aviastroenija». T. 1. Kazan'. 2008. S. 181–188.
5. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Solncev S.S. Perspektivnye vysokotemperaturnye keramicheskie kompozicionnye materialy [Promising high-temperature ceramic composites] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 20–24.
  6. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A. Perspektivnye armirujushhie vysokotemperaturnye volokna dlja metallicheskih i keramicheskikh kompozicionnyh materialov [Prospective reinforcing fibers for high temperature ceramic composites and metal materials] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 05 (viam-works.ru).
  7. Grashhenkov D.V., Shhetanov B.V., Tinjakova E.V., Shheglova T.M. O vozmozhnosti ispol'zovanija kvarcevogo volokna v kachestve svjazujushhego pri poluchenii legkovesnogo teplozashhitnogo materiala na osnove volokon  $Al_2O_3$  [The possibility of using a silica fiber as a binder in the preparation of a lightweight heat-fiber-based material  $Al_2O_3$ ] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 8–14.
  8. Zimichev A.M., Varrik N.M., Dalin M.A. Izmerenie modulja uprugosti volokon iz tugoplavkih oksidov [Measurement of modulus fibers of refractory oxides] //Trudy VIAM. 2014. №6. St. 05 (viam-works.ru).
  9. Zimichev A.M., Varrik N.M. Termogravimetricheskie issledovanija nitej na osnove oksida aljuminija [Thermogravimetric studies yarns based on alumina] //Trudy VIAM. 2014. №6. St. 06 (viam-works.ru).
  10. Varrik N.M. Termostojkie volokna i teplozvukoizoljacionnye ognезashhitnye materialy [Heat and sound insulation, heat-resistant fiber and fire-retardant materials] //Trudy VIAM. 2014. №6. St. 07 (viam-works.ru).
  11. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions forming the sixth technological order] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 3–9.
  12. Dosephi dlja «Burana». Materialy i tehnologii VIAM dlja MKS «Jenergija–Buran» [Armor for the «Buran». Materials and technologies for VIAM ISS «Energia–Buran»] /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: Fond «Nauka i zhizn'». 2013. 128 s.
  13. Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Babashov V.G. Teplozashhitnye materialy [Heat-proof materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 12–20.
  14. Arambakam R., Vahedi Tafreshi H. A simple simulation method for designing fibrous insulation materials //Materials & Design. 2013. V. 44. №2. P. 99–106.

15. Ning Du, Weiwei Sun. Optimal porosity distribution of fibrous insulation *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. V. 52. №19–20. P. 4350–4357.
16. Krenkel W., Lamon J. High-Temperature Ceramic Materials and Composites /In: 7-th International Conference on Ceramic Matrix Composites (HT-CMC 7). 2010. 938 p.
17. Ceramic Fibers and Coatings. Advanced Materials for the Twenty-First Century Committee on Advanced Fibers for High-Temperature Ceramic Composites. Washington: National Academy Press. 1998. 95 p.
18. Wilson D.M., Visser L.R. High performance oxide fibers for metal and ceramic composites /In: Processing of fibers & Composites. Barga. 2000. 31 p.
19. Parlier M., Ritti M.-H., Jankowiak A. Potential and Perspectives for Oxide-Oxide Composites //Journal *Aerospacelab*. 2011. №3. P. 1–12.
20. Веб-сайт компании Johns Manville (США) [www.jm.com](http://www.jm.com).
21. Веб-сайт компании VitCas (Великобритания) [www.vitcas.com](http://www.vitcas.com).
22. Веб-сайт международного холдинга Unifrax [www.unifrax.com](http://www.unifrax.com).
23. Bunsell A.R. Oxide fibers for high-temperature reinforcement and insulation //JOM. 2005. V. 57. №2. P. 48–51.