

УДК 678.84

*В.Г. Бабашов<sup>1</sup>, Н.М. Варрик<sup>1</sup>, В.Г. Максимов<sup>1</sup>, О.Н. Самородова<sup>1</sup>*

## **ОКСИДНОЕ ВОЛОКНО С ПОКРЫТИЕМ КАРБИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104

*Представлены результаты эксперимента по нанесению покрытия карбида кремния на волокно на основе оксида алюминия и изучению свойств полученных волокон с покрытием. Цель нанесения барьерного покрытия на волокна – защита волокна от деградации при изготовлении керамического композиционного материала. Приведены характеристики барьерных покрытий, такие как толщина, сплошность, структура, термические и термоокислительные свойства. Полученные данные будут полезны при разработке новых видов керамических композиционных материалов, армированных волокнами.*

**Ключевые слова:** непрерывное волокно, оксид алюминия, карбид кремния, барьерное покрытие, керамический композиционный материал, термостойкая керамика, муллит, межфазный слой.

*V.G. Babashov<sup>1</sup>, N.M. Varrik<sup>1</sup>, V.G. Maksimov<sup>1</sup>, O.N. Samorodova<sup>1</sup>*

## **OXIDE FIBER COATED WITH SILICON CARBIDE FOR PRODUCING COMPOSITE MATERIALS**

*The article presents the results of an experiment on the application of a silicon carbide coating on an alumina fiber and studies the properties of the resulting coated fibers. The purpose of applying a barrier coating to the fibers is to protect the fiber from degradation during the manufacturing of a ceramic composite material. The paper gives the characteristics of barrier coatings, such as thickness, continuity, structure, thermal and thermo-oxidative properties. The obtained data will be useful in the development of new types of ceramic composite materials reinforced with fibers.*

**Keywords:** continuous fiber, aluminum oxide, silicon carbide, barrier coating, ceramic composite material, heat-resistant ceramics, mullite, interfacial layer.

---

<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**

В современной технике все большее применение находят композиционные материалы, представляющие собой керамическую или металлическую матрицу, армированную тугоплавкими наполнителями [1–3]. Один из наиболее эффективных видов армирования – введение прочных термостойких волокон в материал матрицы. В керамические материалы волокнистый наполнитель вводят для увеличения их устойчивости к хрупкому разрушению, в металлические – для повышения прочности при высоких температурах. Волокна, как правило, имеют покрытия. В зависимости от целей нанесения покрытия и вида композита различают защитные и барьерные покрытия. Первые служат для предотвращения взаимодействия волокна и матрицы,

вторые – для диссипации энергии развития трещины и ее остановки и, как правило, применяются в керамических композиционных материалах.

Керамические композиционные материалы рассматривают в качестве основы для изготовления элементов конструкций благодаря комплексу их механических, теплофизических, электромагнитных, триботехнических свойств и способности работать в условиях воздействия агрессивных и радиационных сред и высоких температур [4–7]. Монолитная керамика имеет недостаточную стойкость к ударным нагрузкам и перепаду температур и подвержена хрупкому разрушению, что ограничивает возможности ее использования в качестве конструктивных деталей [4]. В частности, отмечено, что монолитная керамика имеет значения вязкости разрушения (трещиностойкости)  $K_{Ic}$  в диапазоне значений от 3,5 до 4,5 МПа $\sqrt{м}$ , а композиционный материал с керамической матрицей, армированной волокнами, – от 10 до 16 МПа $\sqrt{м}$  [5].

Введение армирующих компонентов в виде частиц, а также коротких или непрерывных волокон в керамическую матрицу позволяет получать керамические композиционные материалы с повышенными прочностными свойствами, однако для этого необходимо обеспечить слабые межфазные связи между волокном и матрицей. Межфазный слой должен обеспечивать достаточное сцепление волокна с матрицей для эффективной передачи нагрузки, но при этом не быть слишком прочным, чтобы предотвратить мгновенное разрушение из-за распространения трещин в матрице. Кроме того, покрытия защищают волокна от разрушения во время технологических операций при изготовлении композиционного материала.

Разработано большое количество видов композиционных материалов с керамической матрицей, армированной керамическими волокнами с покрытиями. В качестве армирующих наполнителей используют волокна углерода, карбида кремния, оксидов алюминия, кремния, циркония и другие виды тугоплавких волокон. В качестве керамических матриц можно использовать карбиды, нитриды, оксиды алюминия, магния, кремния и их сочетания. Все компоненты композиционного материала выбирают с учетом условий его эксплуатации. Волокна на основе тугоплавких оксидов при изготовлении композиционного материала склонны к деградации или к химическим реакциям, приводящим к образованию прочных связей с матричным материалом, что не позволяет полностью реализовать механизм упрочнения композита армирующим волокном, поэтому их защищают барьерными покрытиями. В частности, в качестве покрытий оксидных волокон используют монациты ( $LaPO_4$ ), шеелиты ( $CaWO_4$ ) и фосфорсодержащие покрытия  $YPO_4$ ,  $NdPO_4$ ,  $AlPO_4$ . Американская компания COI Ceramics серийно производит ряд материалов, содержащих алюмосиликатную матрицу, армированную волокнистыми материалами фирмы Nextel, марок AS-N312, AS-N610, AS-N720 [6].

При этом большое значение имеют выбор материала покрытия и способ его нанесения. Наиболее часто встречаются такие методы нанесения покрытий, как химическое осаждение из паровой фазы (chemical vapor deposition – CVD) и покрытие погружением [8–11]. Работы по созданию новых композиций продолжаются. Отмечены сообщения о перспективах использования керамических композитов на основе карбидов и оксидов тугоплавких металлов [12, 13]. Высокие теплоизоляционные свойства карбидо-оксидных композитов проявляются вследствие того, что при повышенной температуре в результате взаимодействия оксида и карбида образуется четвертная фаза оксидо-карбидов (оксикарбидов) типа  $MeMeC_xO_y$ , обладающая низкими значениями температурного коэффициента линейного расширения [13].

Ранее сообщалось о получении керамического композиционного материала с оксидной керамической матрицей состава\*  $Al_2O_3-20ZrO_2$ , армированной волокном на основе оксида алюминия с углеродным барьерным покрытием. Эксперимент показал, что использование покрытия из пироуглерода повысило прочность и трещиностойкость композита [14].

В данной работе проведен эксперимент по нанесению покрытия карбида кремния на волокно на основе оксида алюминия и изучены свойства полученных волокон с покрытием. Покрытие SiC представляет собой «шубу» из тонких хаотично закрученных нитей, в результате чего имеет высокую удельную поверхность и большой объем пор по сравнению с плотным равномерным покрытием пироуглерода. Такие волокна могут быть использованы как при получении керамических композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, так и для изготовления высокопористых огнеупорных материалов высокотемпературного назначения. Результаты работы будут полезны при создании новых композиционных материалов, армированных высокотемпературными волокнами.

### Материалы и методы

Для эксперимента выбрано непрерывное волокно состава  $85Al_2O_3-15SiO_2$ , полученное золь-гель методом. Нанесение покрытия карбида кремния на волокна осуществляли осаждением из газовой фазы, которое проводили в трубчатых газонаполненных печах при температуре 1200–1250 °С. Работа выполнена совместно с ГИПХ (Санкт-Петербург).

Изучение морфологии поверхности образцов волокон проводили методом растровой электронной микроскопии. Рентгенофазовый анализ полученных волокон выполнен на рентгеновском дифрактометре. Съемку дифрактограмм проводили в  $Co K_{\alpha}$ -излучении с шагом по углу 0,05 градуса и временем накопления 4 с.

Анализ особенностей микроструктуры оксидных волокон с нанесенными покрытиями карбида кремния проводили методами растровой электронной микроскопии, для изучения поведения образцов при нагреве использовали метод дериватографии. Исследования выполнены совместно с ИНЭП ХФ РАН (Москва).

### Результаты и обсуждение

#### *Исследование исходных образцов волокон системы $Al_2O_3-SiO_2$*

Волокно на основе оксида алюминия получали золь-гель методом на установке, оснащенной многокапиллярной фильерой с диаметром капилляров 0,3 мм. Волокнообразующий раствор расчетного состава  $85Al_2O_3-15ZrO_2$  содержал оксихлорид алюминия, силиказоль и поливиниловый спирт и имел технологическую вязкость 80–90 Па·с. Методом экструзии волокнообразующего раствора через фильеру получали исходное «сырое» волокно, которое в процессе последующей сушки и высокотемпературной термообработки освобождается от органических составляющих и приобретает кристаллическую структуру [15, 16].

Внешний вид волокон состава  $85Al_2O_3-15ZrO_2$  представлен на рис. 1. Волокна имеют цилиндрическую форму и гладкую поверхность. Распределение волокон по величине диаметра приведено на рис. 2. Средний диаметр волокна составил 14 мкм.

---

\*Здесь и далее – состав в % (по массе).

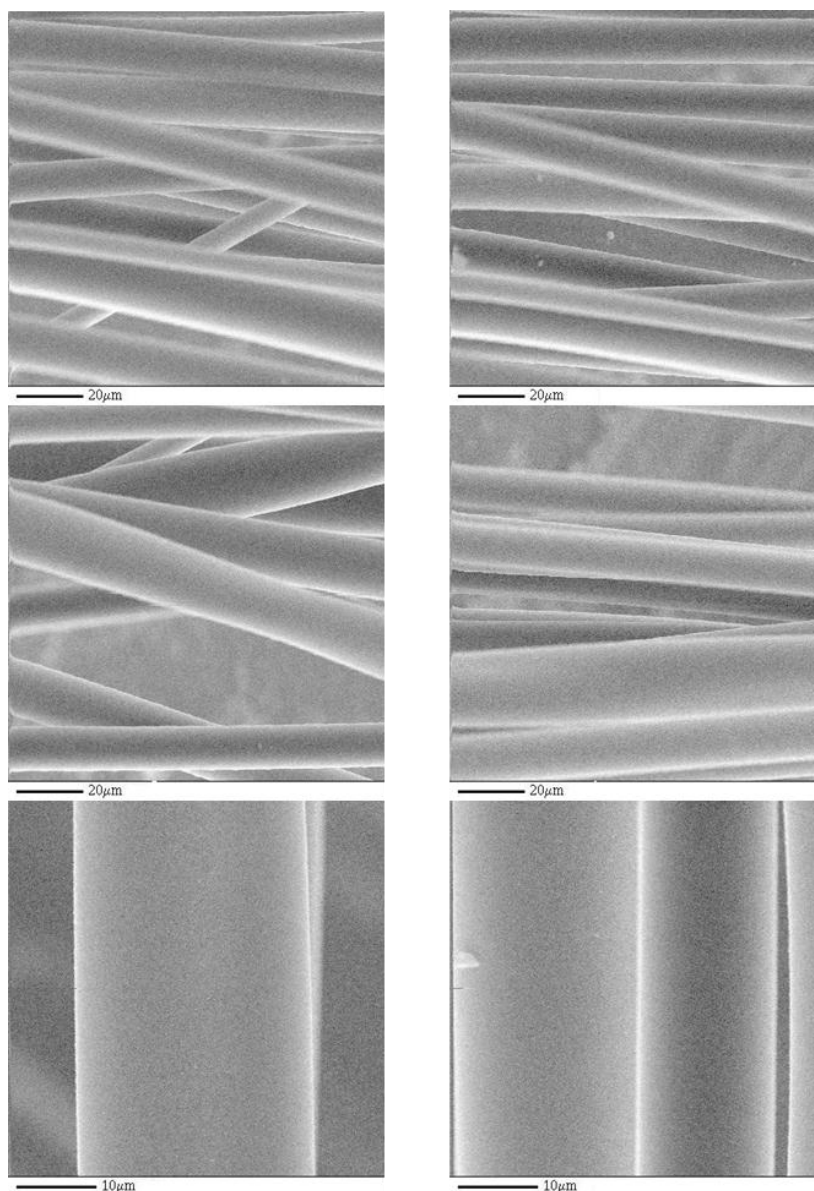


Рис. 1. Внешний вид волокон системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

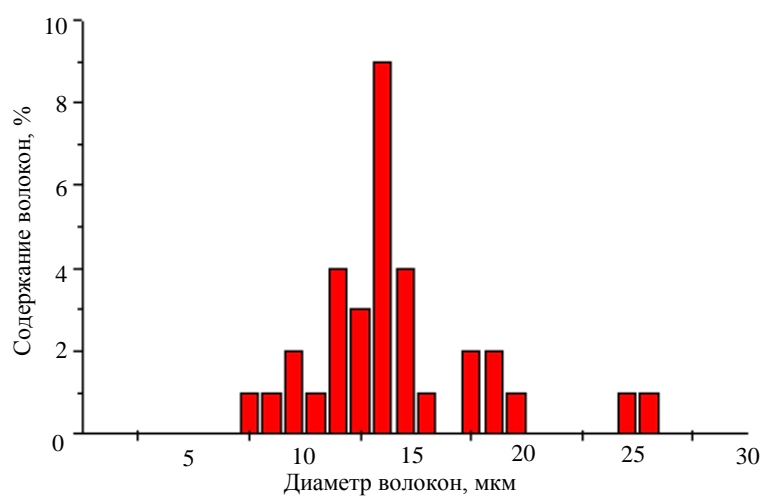


Рис. 2. Гистограмма распределения диаметров волокон системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

Результаты исследований представлены в графическом виде на рис. 3, где по оси ординат отложена интенсивность дифракционной линии, а по оси абсцисс – синус угла дифракции  $\theta$ .

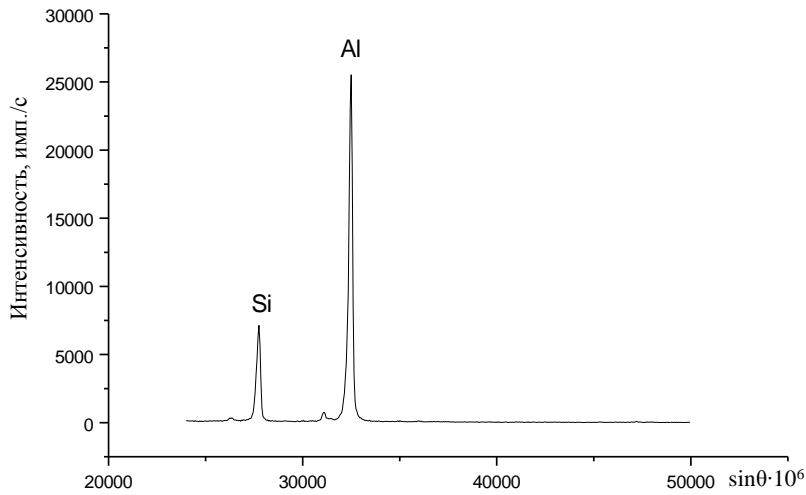


Рис. 3. Рентгенограмма образцов волокон системы  $Al_2O_3-SiO_2$

*Изучение особенностей микроструктуры образцов волокон системы  $Al_2O_3-SiO_2$  с покрытием SiC методом растровой электронной микроскопии*

Исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе – локальном рентгеноспектральном анализаторе САМЕВАХ МВХ-1. Для определения особенностей микроструктуры и топографии поверхности барьерных покрытий волокон различных образцов изучены их боковые поверхности. Толщину барьерных покрытий, их структуру и адгезию к поверхности волокна оценивали с помощью анализа изображения торцов сломанных волокон. При исследовании топографии поверхности волокон изображения получали путем регистрации вторичных электронов, испускаемых образцом, или обратно рассеянных электронов первичного пучка. При исследованиях рельефа поверхности волокон и торцов обломанных волокон на изучаемую поверхность образцов напыляли слой меди.

Средний диаметр образцов волокон с покрытием из карбида кремния составил 18,5 мкм. Гистограмма распределения диаметров волокон с покрытием представлена на рис. 4.

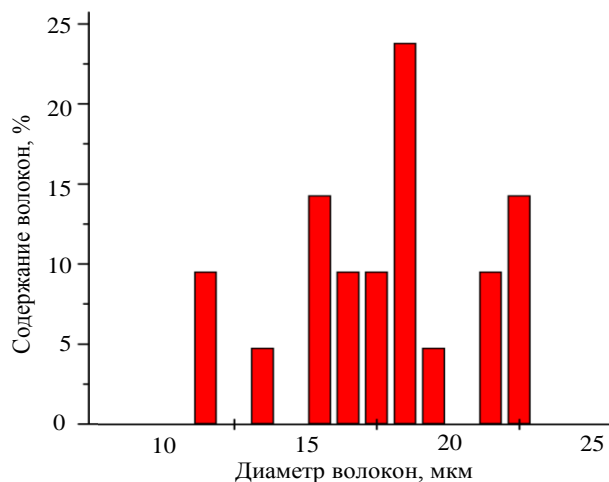


Рис. 4. Распределение по диаметрам волокон системы  $Al_2O_3-SiO_2$  с покрытием SiC

Покрытие представляет собой «шубу» из тонких хаотично закрученных нитей (усов) SiC. Имеются жгуты, состоящие из нескольких волокон, сцепленные между собой нитями, образующими покрытие. Микрофотографии образца, полученные методом растровой электронной микроскопии, показаны на рис. 5. Средний диаметр нитей карбида кремния, образующих покрытие, составляет 0,65 мкм. На нитях имеются утолщения размером от 0,7 до 1,2 мкм. Средний диаметр жгута из волокон с покрытием на рис. 5, *г* составляет ~88 мкм.

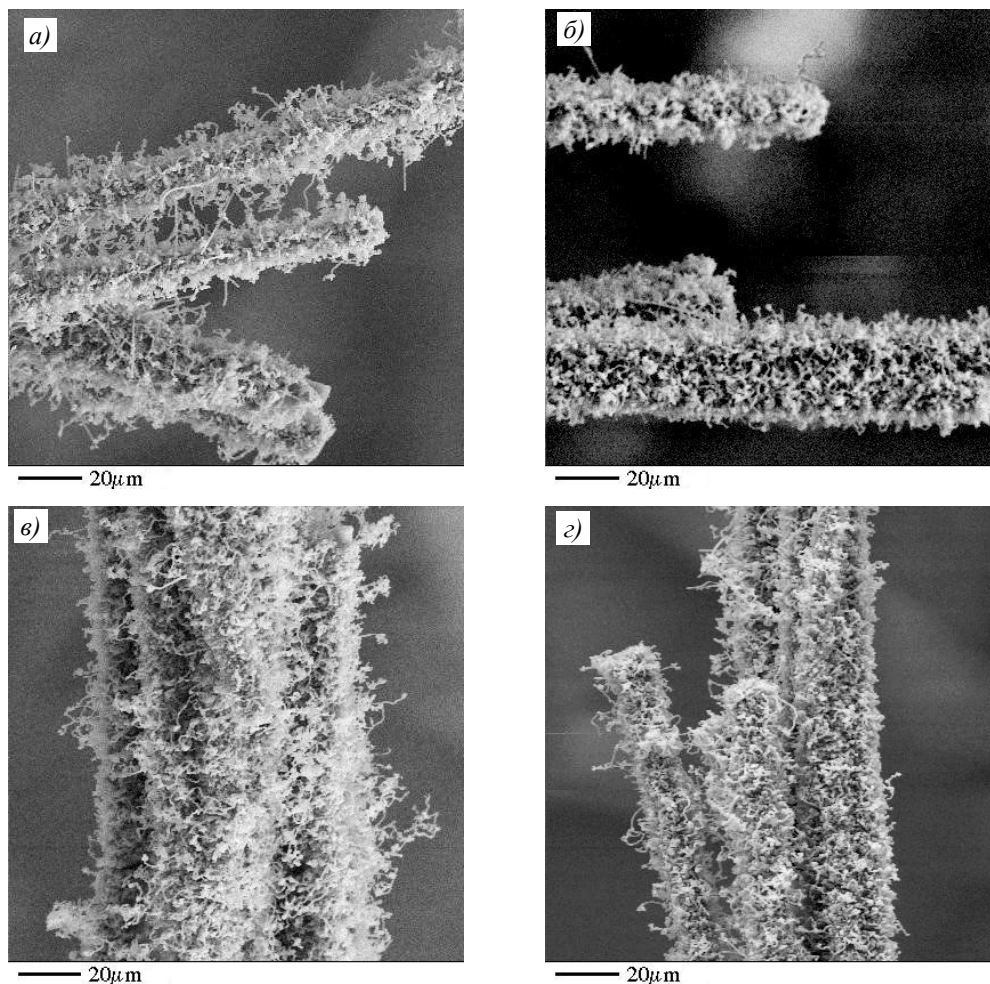


Рис. 5. Общий вид отдельных волокон с покрытием из карбида кремния

Покрытие представляет собой «шубу» из тонких хаотично закрученных длинных нитей и более коротких прямых усиков. Волокна сцепляются между собой за счет скрутки концов нитей из индивидуальных покрытий. На рис. 5, *а* хорошо видны мостики из скрученных нитей между двумя волокнами. На некоторых волокнах «шуба» состоит из коротких закрученных «ворсинок». Волокна удерживаются вместе за счет их сцепления. На рис. 5, *б–г* показаны жгуты из волокон, покрытых «шубой» из длинных и коротких нитей.

Следует отметить, что некоторые жгуты представляли собой отдельные волокна на основе оксида алюминия, соединенные за счет сцепления нитей покрытия SiC, другие – жгуты из нескольких оксидных волокон под общей «шубой» SiC (рис. 6).

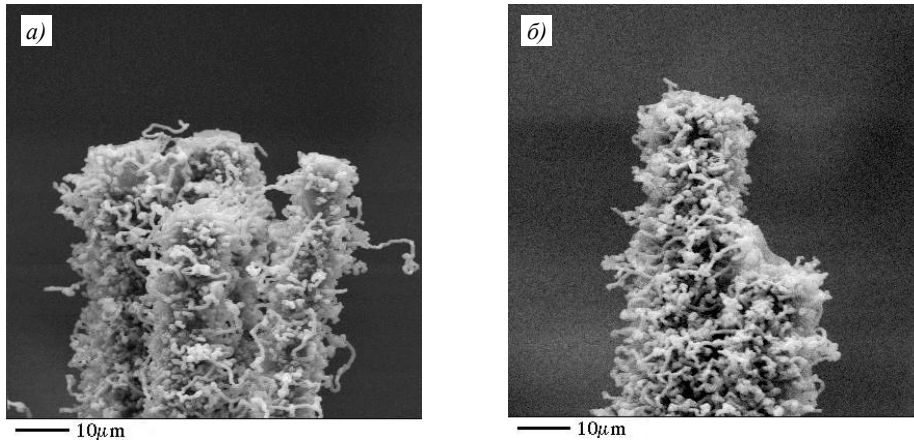


Рис. 6. Вид жгутов из волокон системы  $Al_2O_3-SiO_2$  с покрытием SiC: *a* – жгут волокон, сцепленных нитями покрытия (диаметр жгута  $\sim 48,8$  мкм); *б* – жгут из нескольких волокон под общей шубой (диаметр жгута  $\sim 35$  мкм)

Вид поверхности покрытия из карбида кремния представлен на рис. 7. Нити карбида кремния имеют диаметр от 0,5 до 0,8 мкм. Средний диаметр нитей составляет  $\sim 0,65$  мкм. Нити имеют извилистую форму, некоторые разветвлены. На поверхности нитей имеются «узелки» диаметром от 0,7 до 1,2 мкм.

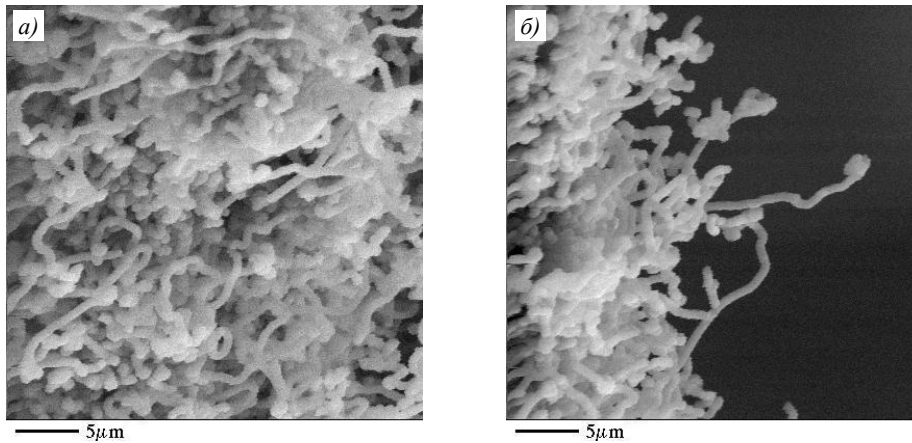


Рис. 7. Вид покрытия SiC на поверхности волокон системы  $Al_2O_3-SiO_2$

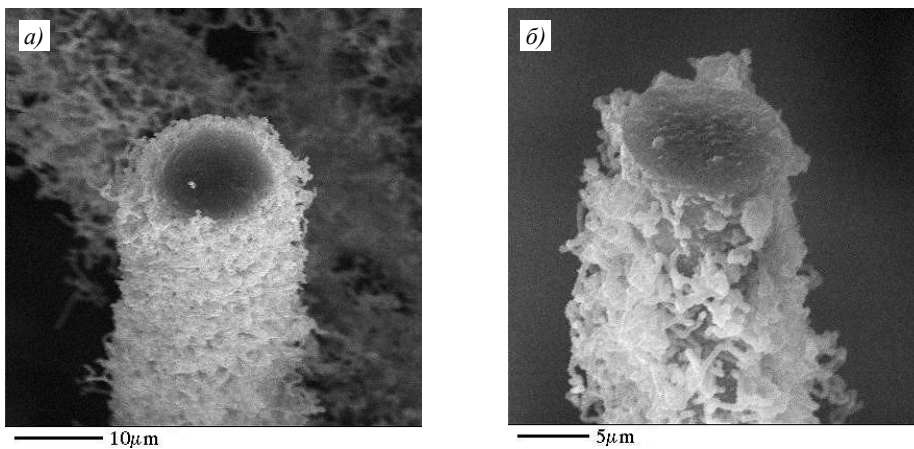


Рис. 8. Вид излома образцов волокон системы  $Al_2O_3-SiO_2$  с покрытием SiC

На рис. 8 представлен вид образцов волокон системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$  с покрытием SiC с торцевой поверхностью излома. На рис. 8, а волокно диаметром  $\sim 15$  мкм плотно покрыто «шубой» толщиной  $\sim 2,5$  мкм. Общий диаметр волокна с «шубой» составляет  $\sim 20$  мкм. На рис. 8, б волокно диаметром  $\sim 12$  мкм покрыто «шубой» толщиной от 1,5 до 2,5 мкм. «Шуба» не создает плотного покрытия, на поверхности волокна видны оголенные участки. Общий диаметр волокна с «шубой» составляет 15–17 мкм. Средний диаметр нитей SiC равен  $\sim 0,4$  мкм.

#### *Изучение поведения образцов при нагреве методом дериватографии*

Метод дериватографии с использованием прибора Derivatograph C позволяет проводить комплексное изучение поведения твердых и жидких образцов при их программируемом нагреве в контролируемой нетоксичной среде при атмосферном давлении. Во время анализа прибор осуществляет непрерывную регистрацию массы образца и дифференциальной температуры (разности температур образца и печи) во время программируемого нагрева образца. Массу образца регистрируют с порогом чувствительности 0,1 %. Изменение дифференциальной температуры производят дифференциальной термопарой с точностью до 0,1 °C.

По результатам измерений можно обнаружить физические и химические процессы, протекающие при изменении температуры образца и его массы и/или с выделением (экзотермические процессы) и поглощением (эндотермические процессы) тепла. К первым относятся процессы, вызывающие обмен массой с окружающей средой, – испарение, сублимация, химические реакции с газовой фазой. Ко вторым относятся химические реакции внутри образца и при взаимодействии с окружающей средой, а также фазовые переходы внутри образца.

Изучение образцов волокон системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$  с барьерными покрытиями SiC проводили при их линейном нагреве до температуры 1200 °C со скоростью 20 °C/мин в потоке атмосферного воздуха с естественной влажностью. Масса исходного образца составила 16,88 мг.

Дериватограмма, представленная на рис. 9, содержит следующие кривые:

$T$  – кривая «температура–время»;

ДТА – дифференциальная кривая изменения температуры;

ТГ – кривая изменения массы;

ДТГ – кривая скорости изменения массы образца.

Анализ кривых ТГ показал, что образцы с нанесенным на них покрытием не подверглись заметной термической и термоокислительной деструкции в условиях эксперимента. Кривая ДТА показывает наличие двух существенных термоэффектов: отрицательного, сопровождаемого небольшим, но заметным падением массы при температуре  $\sim 400$  °C, предположительно связанного с возгонкой и разложением адсорбированного покрытия примесей, и широкого экзотермического максимума при температурах  $> 500$  °C, предположительно вызванного постепенным окислением высокодисперсного покрытия SiC с образованием оксида кремния на поверхности усов, составляющих покрытие.

Однако незначительность относительных привесов (кривая ДТГ) и явное начало затухания эффекта при температуре  $> 1000$  °C (кривая ДТА) указывают на то, что окисление является поверхностным и не вызывает существенного выгорания основной массы усов SiC. Наличие кратковременных возмущений в области температур  $< 100$  °C, вызвавших скачкообразное увеличение массы обеих тиглей, связано, по-видимому, с возгонкой неконтролируемых загрязнений со стенок печи.



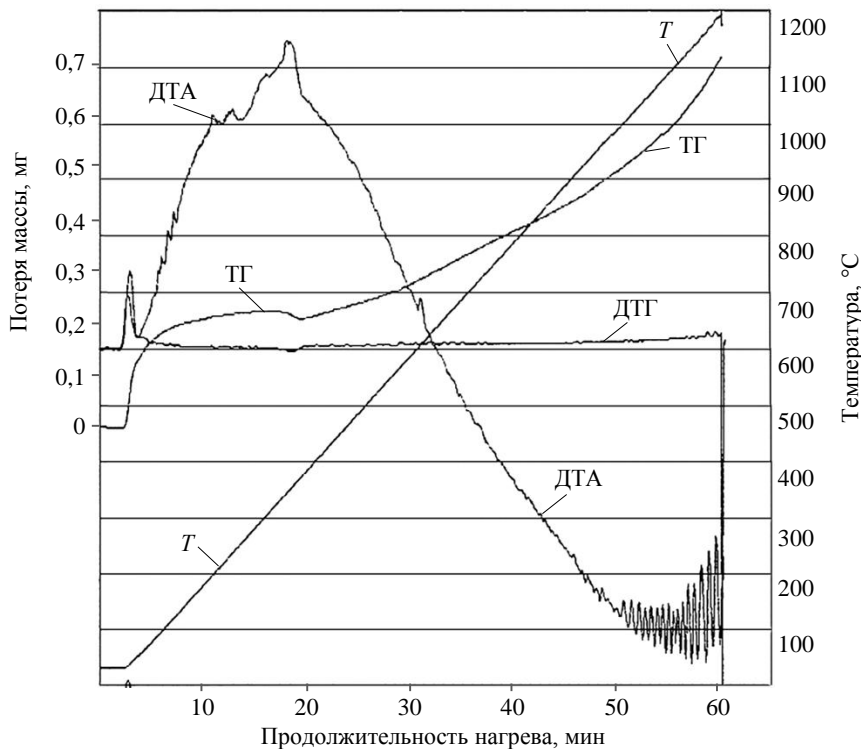


Рис. 9. Дериватографические кривые ТГ, ДТГ, ДТА и температура печи  $T$  для образца волокна системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ , покрытого SiC

Следует отметить, что наличие небольшой окислительной деструкции услов SiC, способной вызывать «окислительное растрескивание» в случае применения карбида кремния в качестве барьерного покрытия, является благоприятным фактором, так как способствует отклонению развивающихся трещин в слой покрытия.

### Заключения

Волокно с подобным покрытием может быть перспективно для создания композиционных материалов с матрицей, имеющей хорошую совместимость с SiC и его нитевидными кристаллами, например с оксидом алюминия. При этом следует ориентироваться на создание многокомпонентного композита, в котором волокна из муллита окружены оболочками из композиции системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiC}$  с пористостью, возрастающей от матрицы к волокну, т. е. композита с «несущим» барьерным слоем. Следует учитывать, что подобный состав барьерного слоя позволит улучшить работу материала при повторных ударных воздействиях и сосредоточенных нагрузках в сравнении с хрупкими покрытиями, подобными моначитовым. Кроме того, такое волокно может служить основой для гибкой теплоизоляции, обладающей способностью к определенному самовосстановлению связей за счет окисления SiC с образованием кварцевого стекла при незначительных механических перемещениях.

Расширение областей применения композиционных керамических материалов обуславливает поиски их новых видов, в том числе с использованием в качестве наполнителей волокон на основе тугоплавких оксидов – в частности, оксидов алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и алюмосиликатов ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ ). При этом возникает проблема оптимизации свойств межфазовой границы «армирующий наполнитель–матрица», которая актуальна как на стадии изготовления композита (введение наполнителя в матрицу, формирование матрицы вокруг предварительно сформированного

трехмерного каркаса-наполнителя), так и в процессе эксплуатации готового конструкционного композиционного материала. Решение этой проблемы достигается с помощью нанесения на поверхность наполнителя барьерных покрытий, имеющих заданный состав и/или структуру поверхности. Такие барьерные покрытия могут не только оптимизировать процесс изготовления композита, но и обеспечивать конструкционному композиционному материалу проявление «интеллектуальных» свойств, когда при изменении условий эксплуатации соответствующим образом будут изменяться свойства, проявляемые материалом.

В данной работе изготовлены и изучены алюмооксидные волокна с нанесенными барьерными покрытиями карбида кремния, предназначенные для создания термостойких конструкционных керамик, а также определены характеристики барьерных покрытий, такие как толщина, сплошность, структура, термические и термоокислительные свойства. Средняя толщина покрытия, представляющего собой «шубу» из усов SiC, составила приблизительно от 1,5 до 2,5 мкм. Средний диаметр образцов волокон с покрытием из карбида кремния составил 18,5 мкм. Нанесение покрытия из газовой фазы обеспечило его достаточно высокую сплошность, хотя на некоторых волокнах отмечены участки без покрытия. Волокна системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  с покрытием SiC показали высокую термостойкость и отсутствие деградации вплоть до температуры 1200 °С, покрытие карбида кремния проявляет некоторую чувствительность к окислению при температурах >500 °С, однако при использовании его в качестве барьерного покрытия данная особенность является благоприятным фактором.

Следует отметить, что покрытие карбида кремния наносили из газовой фазы в трубчатых газонаполненных печах при температуре 1200–1250 °С, а указанный температурный интервал является критическим для данного типа волокна, так как возможен неконтролируемый рост зерна до размера, близкого к диаметру волокна, что может приводить к потере прочности волокна. Однако в данном эксперименте снижение прочностных свойств оказалось незначительным. Исходные волокна, используемые для нанесения покрытий, имели прочность при разрыве 800–1200 МПа, снижение прочности для волокон с покрытием составило 5–10 %.

В результате проведенных исследований установлено, что барьерные покрытия карбида кремния имеют хорошую сплошность и равномерность, а также достаточно высокую стойкость к окислению до температуры 1200 °С. Оксидные волокна с покрытием карбида кремния потенциально возможно использовать как при получении керамических композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, так и для изготовления высокопористых огнеупорных материалов для высокотемпературного применения [17, 18].

#### Библиографический список

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. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
4. Гаршин А.П., Кулик В.И., Матвеев С.А., Нилов А.С. Современные технологии получения волокнисто-армированных композиционных материалов с керамической огнеупорной матрицей (обзор) // Новые огнеупоры. 2017. № 4. С. 20–35.

5. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П., Семенов С.С. *Керамика для машиностроения*. М.: Научтехлитиздат, 2003. С. 243.
6. Kerans R.J., Hay R.S., Parthasarathy T.A., Cinibulk M.K. *Interface Design for Oxidation-Resistant Ceramic Composites // Journal of the American Ceramic Society*. 2002. Vol. 85. No. 11. P. 2599–2632.
7. Бабашов В.Г., Максимов В.Г., Варрик Н.М., Самородова О.Н. Изучение структуры и свойств керамических композиционных материалов на основе муллита // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 54–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-54-63.
8. Silicon Carbide Composite with Coated Fiber Reinforcement: pat. 5552352 US; filed 08.09.95; publ. 03.09.96.
9. Toughened Ceramic Composite Materials, Comprising Coated Ceramic Fibers, in a Ceramic Matrix, wherein the Fibers are Coated with Carbon and an Additional Coating of Ceramic Material and Carbon Mixture: pat. 5480707 US; filed 06.10.93; publ. 02.01.96.
10. Processes for Applying Metal Oxide Coating from a Liquid Phase onto Multifilament Refractory Fiber Tows: pat. 5227199 US; filed 14.01.92; publ. 13.07.93.
11. Mullite-containing Coatings for Inorganic Fibers and Ceramic Matrix Composites: pat. 6022621 US; filed 19.06.96; publ. 08.02.00.
12. Симоненко Е.П., Симоненко Н.П., Шембель Н.Л. и др. Полимерная технология пористой SiC-керамики с использованием измельченных SiO<sub>2</sub>-волокон // *Журнал неорганической химии*. 2018. Т. 63. № 5. С. 539–549.
13. Климов Д.А., Мыктыбеков Б., Низовцев В.Е., Ухов П.А. Перспективы применения наноструктурных композиционных материалов на основе карбидов и оксидов тугоплавких металлов для авиакосмических объектов // *Труды МАИ*. 2011. № 46. Ст. 27. URL: <http://www.trudymai.ru> (дата обращения: 17.03.2021).
14. Бабашов В.Г., Максимов В.Г., Варрик Н.М. Керамический композиционный материал на основе оксидной матрицы, армированной оксидным волокном с углеродным барьерным покрытием // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2020. № 9. С. 15–20.
15. Способ получения высокотемпературного волокна на основе оксида алюминия: пат. 2212388 Рос. Федерация; заявл. 19.11.01; опубл. 20.09.03.
16. Истомин А.В., Колышев С.Г. Электростатический метод формования ультратонких волокон тугоплавких оксидов // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (50). С. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-40-46.
17. Истомин А.В., Колышев С.Г. Переработка отходов производства высокотемпературного теплозащитного материала // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-97-104.
18. Степанова Е.В., Зимичев А.М. Теплоизоляционный материал для шнуров из волокон тугоплавких оксидов // *Труды ВИАМ*. 2020. № 2 (86). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-72-80.