

Научная статья

УДК 677.523

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4- 42-51

## ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ОКСИДНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРЕВОВ

Е.В. Степанова<sup>1</sup>, В.Г. Максимов<sup>1</sup>, Ю.А. Ивахненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** С применением метода просвечивающей оптической микроскопии в поляризованном свете исследованы изменения внутренней структуры различных оксидных керамических волокон при воздействии высокотемпературных нагревов. Выявлена полная перестройка структуры всех исследованных волокон в процессе высокотемпературных выдержек. Установлены существенные отличия в ходе рекристаллизации между волокнами разного типа. У муллитовых составов обнаружена стабилизация структуры рекристаллизации на стадии образования умеренно крупных зерен, разделенных стабильными большеугловыми (до 90 градусов) границами.

**Ключевые слова:** оксидные керамические волокна, структура, золь-гель метод, температура, оптическая микроскопия, рекристаллизация

**Для цитирования:** Степанова Е.В., Максимов В.Г., Ивахненко Ю.А. Изменения структуры оксидных керамических волокон при воздействии высокотемпературных нагревов // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-42-51.

Scientific article

## CHANGES IN THE STRUCTURE OF OXIDE CERAMIC FIBERS WHEN EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE HEATS

E.V. Stepanova<sup>1</sup>, V.G. Maksimov<sup>1</sup>, Yu.A. Ivakhnenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Using the method of transmission optical microscopy in polarized light, changes in the internal structure of various oxide ceramic fibers under the influence of high-temperature heats were investigated. Complete restructuring of the structure of all examined fibers in the process of high-temperature exposure was revealed. Significant differences were established during recrystallization between fibers of different types. Mullite compositions showed stabilization of the recrystallization structure at the stage of formation of moderately large grains separated by stable large-angle (up to 90°) borders.

**Keywords:** oxide ceramic fibers, structure, sol-gel method, temperature, optical microscopy, recrystallization

**For citation:** Stepanova E.V., Maksimov V.G., Ivakhnenko Yu.A. Changes in the structure of oxide ceramic fibers when exposed to high temperature heats. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-42-51.

### Введение

С развитием научно-технического прогресса в различных отраслях промышленности, таких как нефтехимическая, металлургическая, автомобильная и ряде других, требуются новые материалы [1–3], способные при воздействии высокотемпературных эксплуатационных нагревов сохранять свою работоспособность. Одними из востребованных и перспективных являются оксидные керамические волокнистые материалы [4–8], которые нашли широкое применение в качестве керамических фильтров для очистки и фильтрования газов, расплавов металлов, а также в качестве огнеупоров, нагревательных печей и др., поскольку надежно работают при воздействии агрессивных сред, высокого давления, имеют низкую теплопроводность, обладают высокой химической и термостойкостью [9–11].

Высокотемпературные оксидные керамические волокна (рис. 1; обзорные фото сделаны на сканирующем электронном микроскопе – СЭМ), к которым можно отнести волокна на основе оксидов кремния, кальция, магния, алюминия, тория и др., являются одним из основных компонентов для создания высокотемпературных материалов, имеющих высокую прочность и температуру эксплуатации  $>1000$  °С, а также для изготовления материалов на основе металлических и неметаллических матриц [12–20].

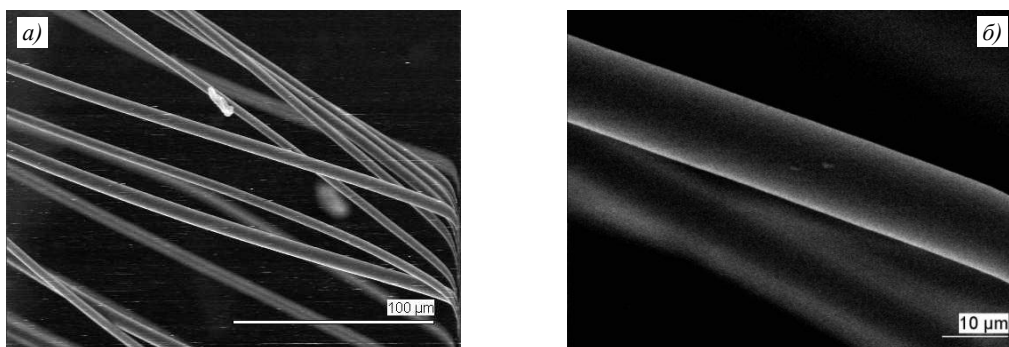


Рис. 1. Микрофотографии (СЭМ) комплекса (а) и единичного оксидного керамического волокна (б), полученных золь-гель методом

Основным полуфабрикатом для изготовления керамического оксидного волокнистого материала являются оксидные волокна, полученные золь-гель методом из растворов или вытяжкой из расплавов. С использованием данных технологий волокна требуемого состава производят пиролизом ксерогеля, полученного путем гелирования и сушки заготовки, отформованной из раствора, приготовленного на основе золь-прекурсоров. Исходные золи, используемые для приготовления растворов, получают на основе водных растворов прекурсоров, модифицированных органическими полимерами. Альтернативой золь-гель технологии является получение волокон вытяжкой из расплавов неорганических оксидов [21, 22].

Преимуществами золь-гель метода являются высокая степень гомогенизации исходных компонентов и протекание основных процессов при низких температурах, что улучшает технологичность, фондоемкость и энергоэффективность процесса.

Высокая термическая и химическая стабильность конечного керамического материала, а также его механические и физические свойства обусловлены его структурой. Внутреннее строение керамических волокон многообразно, но может быть сведено к нескольким наиболее типичным структурам:

1. Структура, когда материал выглядит оптически однородным, но имеет существенную анизотропию. При этом рентгенофазовый анализ (РФА) показывает наличие

в нем чрезвычайно мелких кристаллов основных фаз, которые из-за своих малых размеров неразличимы в оптический микроскоп.

2. Мелкодисперсная, с равномерно распределенными субмикронными зёрнами двух фаз, достаточно стабильная при низких температурах структура, где зёрна одной фазы препятствуют ускоренному росту другой.

3. Умеренно крупнозернистая структура с достаточно высокой степенью монодисперсности [23–27], где размер зёрна составляет существенную долю от поперечного размера волокон.

4. Аналогичная предыдущей структура, но с зёрнами, существенно различающимися размером.

5. Крупнозернистая структура с зёрном размером, заметно превосходящим диаметр волокна, т. е. разбивающая его на отдельные монокристаллические блоки.

Кроме того, имеет значение не только размер зёрен, но и взаимная ориентация осей образующих их кристаллов, т. е. наличие в материале кристаллической текстуры. В волокнах наиболее часто наблюдают следующие разновидности текстур:

– одноосная, при которой оси всех кристаллов ориентированы в одном направлении (рис. 2);

– двухосная, когда оси большинства кристаллов ориентированы в двух направлениях. Такая текстура, в свою очередь, может быть разделена на дисперсную, с равномерным чередованием кристаллов различных ориентаций, и блочную, в которой явно наблюдаются группы из кристаллов одной ориентации.

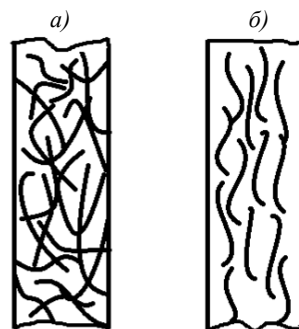


Рис. 2. Беспорядочное (а) и одноосное (упорядоченное) расположение кристаллов (б) в структуре керамического волокна

Большой интерес также представляют структурные изменения, происходящие в волокнах при нагреве, поскольку при этом существенно изменяется распределение зёрен по размерам вследствие одновременного протекания нескольких процессов [28].

Цель данной работы – исследование изменений структуры оксидных керамических волокон при воздействии высокотемпературных нагревов.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований использовали керамические оксидные волокна на муллитовой, корундовой и оксидноциркониевой основах. Нагрев образцов волокон производили в воздушной атмосфере в печи сопротивления с дисилицид-молибденовыми нагревателями при температурах от 1100–1200 до 1700 °С.

Изучение керамического материала в исходном и рекристаллизованном состояниях проводили методом оптической микроскопии с использованием оптического микроскопа в проходящем поляризованном свете при увеличениях  $\times 30$ ,  $\times 20$  и  $\times 10$  на матрице камеры.

Выводы о внутреннем кристаллическом строении образцов при исследовании в скрещенных поляризаторах сделаны на основании следующих особенностей, свойственных данному методу:

1. При наличии в препарате оптической анизотропии материал приобретает интерференционную окраску, при этом анизотропия может быть вызвана как наличием анизотропных кристаллических фаз, так и внутренними напряжениями.

2. Цвет структурного элемента определяется как протяженностью объекта по лучу зрения, так и его ориентацией относительно плоскости поляризации осветителя, причем ориентация влияет на окраску сильнее.

3. При развороте объекта на 90 градусов цвет меняется на дополнительный.

Данный метод позволяет исключительно наглядно и информативно наблюдать за кристаллической структурой материалов внутри их объема, в том числе не имеющей выхода на поверхность шлифа или излома, а также за особенностями ориентации отдельных кристаллов.

### Результаты и обсуждение

Первоначально все образцы волокон просмотрели в исходном состоянии, т. е. до воздействия нагревов.

Волокна всех трех видов не имели видимых в оптический микроскоп структурных элементов, однако во всех случаях наблюдали существенную и однородную по объему волокна интерференционную окраску (рис. 3).

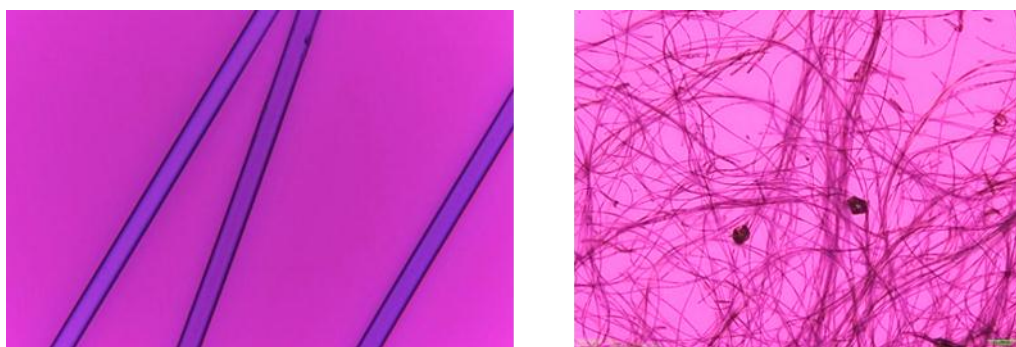


Рис. 3. Типичная для исходных волокон умеренно текстурированная микрокристаллическая структура (наблюдается однотонная интерференционная окраска низкой интенсивности)

С учетом того, что подобный эффект может быть обусловлен не только двулучепреломлением в кристаллах несимметричных типов, но и внутренними напряжениями в волокнах, проведен РФА исходных образцов. Данный анализ структуры всех волокон показал наличие в ней, в качестве основных, «номинальных» фаз (муллита, корунда и  $t\text{-ZrO}_2$ ), соответствующих заявленному химическому составу, хотя и с существенным (до 1–3 градусов по  $2\Theta$ ) уширением дифракционных линий. Значительного рассеяния от рентгеноаморфных фаз не наблюдали. Исходя из полученных данных сделан вывод о том, что исследуемые образцы имеют достаточно высокоориентированную структуру, состоящую из весьма мелких кристаллов основных фаз, не разрешаемых при наблюдении в оптический микроскоп.

#### *Изменения структуры, наблюдаемые при температурах 1100 и 1200 °С*

На втором этапе исследования волокна на основе муллита и корунда подвергали термообработке при 1100 и 1200 °С.

Установлено, что при нагреве до температур 1100 и 1200 °С в первоначально ультрамелкозернистых волокнах оксида алюминия и муллита произошла весьма сильная собирательная рекристаллизация, в процессе которой выросли крупные (до нескольких микрон) кристаллы (рис. 4 и 5). При этом в отдельных волокнах на основе муллита можно наблюдать некоторое количество оптически бесструктурных участков, в то время как в других исследуемых фрагментах той же пробы рекристаллизация проходила практически полностью.

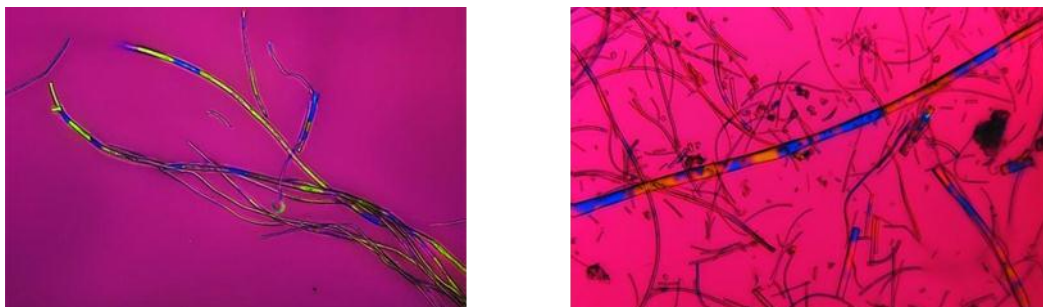


Рис. 4. Рекристаллизация в волокнах на основе оксида алюминия при нагреве до температуры 1100 °С (видно образование зерен размером, превосходящим диаметр волокон, границы между которыми разбивают волокно на отдельные монокристаллические цилиндры)

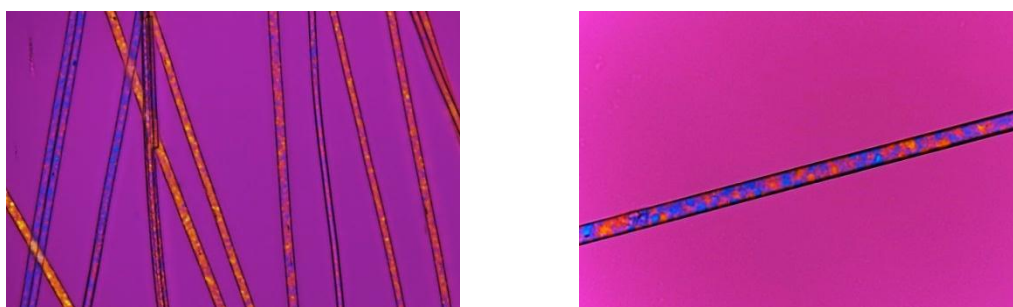


Рис. 5. Рекристаллизация в муллитовых волокнах при нагреве до температуры 1200 °С (на фото слева видно, что волокна одной пробы могут иметь существенно различающиеся типы взаимной ориентации волокон, а на фото справа представлено крупным планом волокно с характерным разворотом осей соседних кристаллов под углом, близким к 90 градусам)

Наиболее крупные кристаллы при низкотемпературной рекристаллизации выросли в дискретных волокнах на основе оксида алюминия (рис. 4). Следует отметить, что наблюдаемая во всех исходных волокнах текстура после рекристаллизации в отдельных муллитовых волокнах достаточно полно наследовалась, в то время как в других была практически разрушена. Подобное различие хорошо заметно у волокон, представленных на рис. 5 (фото справа и слева соответственно).

У волокон на основе оксида алюминия заметная первоначальная текстурированность утрачивалась практически полностью с образованием «бамбуковой» структуры, в которой рекристаллизованные зерна занимают все сечение волокна, разбивая его на отдельные монокристаллические цилиндры, разделенные границами, перпендикулярными к оси волокна. На рис. 4 это особенно хорошо заметно у волокон, имеющих наибольший диаметр, однако на оригинальном изображении подобную структура хорошо различима и на тонких фрагментах волокон.

Можно предположить, что весьма глубокая и быстрая рекристаллизация в данном случае связана с избыточно высокой удельной поверхностью исходных микрокристаллов в волокнах. Существенно более выраженная склонность к рекристаллизации

волокон на основе оксида алюминия с высокой вероятностью связана с однофазностью материала. Отсутствие в структуре значительно отличающихся по строению и составу кристаллических фаз приводит к беспрепятственному росту кристаллов, в то время как в муллитовых материалах в большинстве случаев имеется в качестве второй фазы некоторое количество корунда, наличие которого на границах зерен достаточно эффективно блокирует чрезмерно бурную рекристаллизацию. Кроме того, следует отметить и более сложную структуру муллита, позволяющую снижать скорость его роста, и резко выраженную анизотропию габитуса и скорости роста различных граней его кристаллов, которые затрудняют взаимное поглощение кристаллов различной ориентации.

#### *Изменения структуры, наблюдаемые при температуре 1700 °С*

При нагреве до температуры 1700 °С изменению подвергали не только кристаллическую структуру волокон, которая, в частности у муллита, радикально перестроилась по сравнению со структурой, образовавшейся при нагреве до температуры 1100 °С, но и их внешнюю форму.

Муллитовые волокна после высокотемпературного нагрева претерпели существенную и достаточно неравномерную усадку по длине со значительным (до ~1,5 раза) увеличением диаметров. Характерный вид глубоко рекристаллизованных муллитовых волокон приведен на рис. 6, причем волокна на фото справа имеют явно бóльшую усадку по длине с существенным увеличением диаметра.

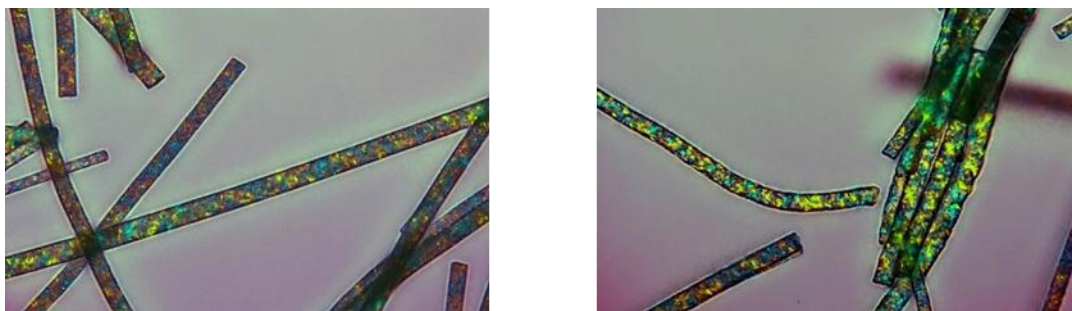


Рис. 6. Рекристаллизация в муллитовых волокнах при нагреве до температуры 1700 °С (хорошо заметно чередование ориентации соседних кристаллов и отсутствие пересекающих волокон насквозь границ зерен; на фото справа явно различим рельеф на поверхности волокон, образовавшийся при рекристаллизации)

Текстурированность волокон утрачена почти полностью, хотя ее следы у некоторых фрагментов могут быть замечены. Достаточно хорошо ограненные плоские (при просмотре сбоку – игольчатые) зерна при выходе на поверхность образуют характерный выраженный рельеф, полностью отсутствовавший у волокон, обработанных при более низких температурах. Следует отметить выраженную анизотропию наблюдаемых кристаллов; муллит практически никогда не образует «бамбуковидные» (подобные показанным на рис. 4) цилиндрические кристаллы, занимающие весь диаметр волокна, как оксид алюминия и в некоторых случаях оксид циркония. Кроме того, можно наблюдать отсутствие в поперечных сечениях волокон зон, в которых межзеренные границы пластинчатых кристаллов, ориентированных поперек волокон, не пересекались бы продольно направленными кристаллами.

Оксид циркония в волокне претерпел рекристаллизацию с образованием характерных округлых зерен, причем на рис. 7 хорошо видно, что каждое зерно представляет собой отдельный монокристалл. Размеры зерен существенно отличаются между разными фрагментами волокна. Текстурированность явно отсутствует. Некоторые

из фрагментов имеют «бамбуковую» структуру, аналогичную наблюдаемой у образцов из оксида алюминия.

На крупных фрагментах, видимых на рис. 7, также хорошо заметно появление выраженного видимого рельефа на поверхности, образованного выступающими округлыми зернами. Подобное явление можно наблюдать и на некоторых более мелких фрагментах на обоих фото.

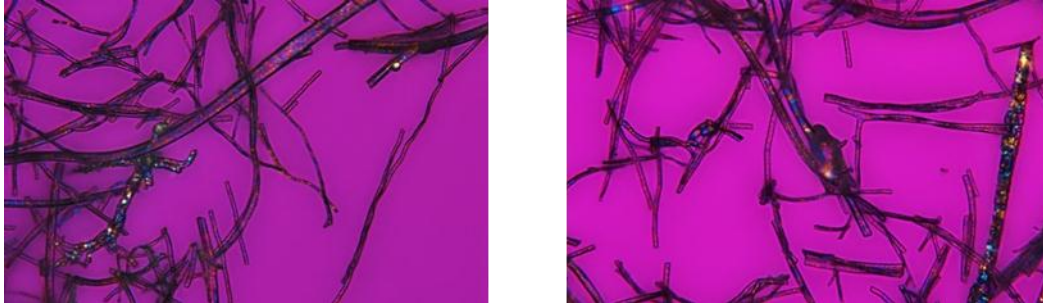


Рис. 7. Рекристаллизация оксида циркония в волокне при нагреве до температуры 1700 °С (видна преимущественно округлая форма кристаллов, наблюдается существенная разница в размере зерна между различными волокнами)

Волокна оксида алюминия не претерпели существенных изменений в видимой структуре по сравнению со структурой, образовавшейся при нагреве до температуры 1200 °С. Количественное изменение размеров для них оценить не удалось в связи с чрезвычайно высокой полидисперсностью и неправильной формой исходного волокна, хотя субъективно можно отметить уменьшение количества тонких фрагментов.

### Заключения

Используемые в настоящее время керамические волокна на основе тугоплавких оксидов претерпевают радикальные структурные изменения в процессе их нагрева и выдержки при высоких температурах.

Структуры, образующиеся в результате рекристаллизации в волокнах различных типов, существенно отличаются друг от друга.

В результате проведенного исследования установлено, что при термообработке оксидных волокон при умеренных (до 1200 °С) температурах образуется структура волокон с одноосным текстурированием при субмикронном размере кристаллов. Под текстурой в данном случае подразумевают наличие в материале кристаллов, кристаллографически ориентированных в определенном направлении преимущественно под углами 0 и 90 градусов.

При температурах термообработки ~1700 °С образуется структура либо с полным отсутствием текстурированности, либо с наличием текстуры [0°/90°] с дисперсным распределением составляющих. Подобное строение материала исключает наличие пересекающих все сечение волокна межзеренных границ и обеспечивает устойчивость к дальнейшей рекристаллизации блокированием быстрорастущих торцевых граней пластинчатых муллитовых кристаллов медленно растущими кристаллографическими гранями соседних зерен.

### Список источников

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. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб.: 2019. Т. 4. С. 24.
3. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
4. Браутманс Л. Современные композиционные материалы. М.: Мир, 1970. 670 с.
5. Истомин А.В., Кольшев С.Г. Переработка отходов производства высокотемпературного теплозащитного материала // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-97-104.
6. Ермоленко И.Н., Ульянова Т.М., Витязь П.А., Федорова И.Л. Волокнистые высокотемпературные материалы. Минск: Наука и техника, 1991. 255 с.
7. Ивахненко Ю.А., Баруздин Д.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.
8. Бабашов В.Г., Варрик Н.М. Волокна диоксида циркония как компонент высокотемпературной теплоизоляции (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 10 (104). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-79-86.
9. Черняк М.Г. Непрерывное стеклянное волокно. Основы технологии и свойства. М.: Химия, 1965. 320 с.
10. Костиков В.И., Варенков А.Н. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 563 с.
11. 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.
12. Афанасов И.М., Лазорьяк Б.И. Высокотемпературные керамические волокна. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 51 с.
13. Перепелкин К.Е. Волокна неорганические. М.: Большая российская энциклопедия, 2006. Т. 5. 663 с.
14. Волокна из оксидной керамики: пат. № 2396388 Рос. Федерация; заявл. 10.02.10; опубл. 10.08.10.
15. Alumina fiber: pat. US 3808015A; filed. 12.05.72; publ. 30.04.74.
16. Preparation of inorganic oxide monofilaments: pat. US3311689A; filed. 17.01.63; publ. 28.03.68.
17. Пакшвер А.Б. Физико-химические основы технологии химических волокон. М.: Химия, 1972. 432 с.
18. Способ получения высокотемпературного волокна на основе оксида алюминия: пат. № 2212388 Рос. Федерация; заявл. 19.11.01; опубл. 20.09.03.
19. Способ получения поликристаллических неорганических волокон: пат. № 2170293 Рос. Федерация; заявл. 16.07.99; опубл. 10.07.01.
20. Зимичев А.М., Варрик Н.М., Сумин А.В. К вопросу получения керамических нитей на основе тугоплавких оксидов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 3. Ст. 09. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 12.07.2021).
21. Мошников В.А., Таиров Ю.М., Хамова Т.В., Шилова О.А. Золь-гель технология микро- и нанокompозитов: учеб. пособие / под ред. О.А. Шиловой. СПб.: Лань, 2013. 304 с.
22. Максимов А.И., Мошников В.А., Таиров Ю.М., Шилова О.А. Основы золь-гель технологии нанокompозитов. СПб.: Элмор, 2007. 255 с.
23. Гращенков Д.В., Балинова Ю.А., Тинякова Е.В. Керамические волокна оксида алюминия и материалы на их основе // Стекло и керамика. 2012. № 4. С. 32–35.
24. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А. Получение, структура и прочность волокон  $Al_2O_3$  // Тр. Междунар. конф. «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». М.: Знание, 2003. С. 194–196.
25. 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.

26. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979. 24 с.
27. Мартаков И.С. Морфология и свойства оксидов алюминия и титана, полученных темплатным синтезом с применением целлюлозы и ее производных: дис. ... канд. хим. наук. Сыктывкар: Ин-т химии Коми научного центра УрО РАН, 2017. 133 с.
28. Ищенко В.В. Влияние агрегации на эволюцию микроструктуры оксидных порошков в процессах синтеза, термической обработки и спекания: дис. ... канд. хим. наук. М.: ИОНХ РАН им. Н.С. Курнакова, 2000. 111 с.

### References

1. Kablov E.N. Materials of the new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
2. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Report XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg: 2019, vol. 4, p. 24.
3. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
4. Brautmans L. *Modern composite materials*. Moscow: Mir, 1970, 670 p.
5. Istomin A.V., Kolyshv S.G. Processing of wastes high-temperature heat-protective material. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-97-104.
6. Ermolenko I.N., Ulyanova T.M., Vityaz P.A., Fedorova I.L. *Fibrous high temperature materials*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1991, 255 p.
7. Ivakhnenko Yu.A., Baruzdin B.V., Varrik N.M., Maksimov V.G. High-temperature fibrous sealing materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 272–289. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-272-289.
8. Babashov V.G., Varrik N.M. Zirconia fibers as a component of high temperature thermal insulation (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 18, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-79-86.
9. Chernyak M.G. *Continuous glass fiber. Fundamentals of technology and properties*. Moscow: Khimiya, 1965, 320 p.
10. Kostikov V.I., Varenkov A.N. *Ultra-high temperature composite materials*. Moscow: Internet Inzhiniring, 2003, 563 p.
11. Shavnev A.A., Babashov V.G., Varrik N.M. Continuous fibers based on alumina (review). *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 27–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-27-34.
12. Afanasov I.M., Lazoryak B.I. *High temperature ceramic fibers*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2010, 51 p.
13. Perepelkin K.E. *The fibers are inorganic*. Moscow: Bolshaya rossiyskaya entsiklopediya, 2006, vol. 5. 663 p.
14. *Fibers from oxide ceramics*: pat. no. 2396388 Rus. Federation; filed 10.02.10; publ. 10.08.10.
15. *Alumina fiber*: pat. US 3808015A; filed. 12.05.72; publ. 30.04.74.
16. *Preparation of inorganic oxide monofilaments*: pat. US3311689A; filed. 17.01.63; publ. 28.03.68.
17. Pakshver A.B. *Physical and chemical bases of technology of chemical fibers*. Moscow: Khimiya, 1972, 432 p.
18. *Method for producing high-temperature fiber based on aluminum oxide*: pat. no. 2212388 Rus. Federation; filed 19.11.01; publ. 20.09.03.
19. *Method for obtaining polycrystalline inorganic fibers*: pat. no. 2170293 Rus. Federation; filed 16.07.99; publ. 10.07.01.
20. Zimichev A.M., Varrik N.M., Sumin A.V. On the issue of obtaining ceramic threads based on refractory oxides. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2016, no. 3, paper no. 09. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: July 7, 2021).
21. Moshnikov V.A., Tairov Yu.M., Khamova T.V., Shilova O.A. *Sol-gel technology of micro- and nanocomposites*: textbook. Ed. O.A. Shilova. St. Petersburg: Lan, 2013, 304 p.

22. Maksimov A.I., Moshnikov V.A., Tairov Yu.M., Shilova O.A. *Fundamentals of sol-gel technology of nanocomposites*. St. Petersburg: Elmor, 2007, 255 p.
23. Grashchenkov D.V., Balinova Yu.A., Tinyakova E.V. Ceramic fibers of aluminum oxide and materials based on them. *Steklo i keramika*, 2012, no. 4, pp. 32–35.
24. Kablov E.N., Shchetanov B.V., Ivakhnenko Yu.A. Obtaining, structure and strength of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fibers. *International conf. "Theory and practice of technologies for the production of products from composite materials and new metal alloys"*. Moscow: Znanie, 2003, pp. 194–196.
25. Babashov V.G., Maksimov V.G., Varrik N.M., Samorodova O.N. Studying of structure and properties of samples of ceramic composite materials on the basis of mullite. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 54–63. DOI: 10.8577/2071-9140-2020-0-1-54-63.
26. Sirotnin Yu.I., Shaskolskaya M.P. *Fundamentals of crystal physics*. Moscow: Nauka, 1979, 24 p.
27. Martakov I.S. *Morphology and properties of aluminum and titanium oxides obtained by template synthesis using cellulose and its derivatives*: thesis, Cand. Sc. (Chem.). Syktyvkar: Institute of Chemistry, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017, 133 p.
28. Ishchenko V.V. *Influence of aggregation on the evolution of the microstructure of oxide powders in the processes of synthesis, heat treatment and sintering*: thesis, Cand. Sc. (Chem.). Moscow: IONKh RAN, 2000, 111 p.

#### **Информация об авторах**

**Степанова Елена Васильевна**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Максимов Вячеслав Геннадьевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Ивахненко Юрий Александрович**, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### **Information about the authors**

**Elena V. Stepanova**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Vyacheslav G. Maksimov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Yurij A. Ivakhnenko**, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.01.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved and accepted for publication after reviewing 19.01.2022.