

Научная статья

УДК 621.775.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-84-93

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОКСИДНЫХ МОНОВОЛОКОН

Ю.А. Балинова¹, Е.В. Степанова¹, В.Г. Бабашов¹, Е.С. Бондаренко¹,
Е.С. Куликова², Г.В. Пруцков²

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, Москва; nrcki@nrcki.ru

Аннотация. С применением методов рентгеновской микродифракции и микрофлуоресценции, а также методов электронографии исследованы процессы структурообразования в оксидных моноволокнах. Показано, что основной фазой образцов является муллит. Установлено, что на исследуемой длине моноволокон все образцы имеют однородный фазовый состав. Показано, что все образцы обладают выраженной зернистой структурой с вытянутыми зернами, габитус которых соответствует муллиту. Зерна равномерно распределены в кристаллической матрице.

Ключевые слова: моноволокна, фазовый состав, рентгеновская дифракция, электронная микроскопия, микроэлементный анализ, длина, распределение

Для цитирования: Балинова Ю.А., Степанова Е.В., Бабашов В.Г., Бондаренко Е.С., Куликова Е.С., Пруцков Г.В. Исследование свойств оксидных моноволокон // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 84–93. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-84-93.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF OXIDE MONOFILAMENTS

Yu.A. Balinova¹, E.V. Stepanova¹, V.G. Babashov¹, E.S. Bondarenko¹,
E.S. Kulikova², G.V. Prutskov²

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

²Federal State Budgetary Institution «National research center «Kurchatov institute», Russia, Moscow; nrcki@nrcki.ru

Abstract. Using X-ray microdiffraction and microfluorescence methods, as well as electronography methods, the processes of structure formation in oxide monofilaments under the influence of temperature were studied. It was shown that the main phase of the studied samples is mullite. Research shows that all samples demonstrate the uniform phase composition during the monofilament length. The investigation shows pronounced grain structure with elongated crystallites, that have the mullite habitus. The grains demonstrate homogeneous distribution.

Keywords: monofilaments, phase composition, X-ray diffraction, electron microscopy, trace element analysis, length, distribution

For citation: Balinova Yu.A., Stepanova E.V., Babashov V.G., Bondarenko E.S., Kulikova E.S., Prutskov G.V. Investigation of the properties of oxide monofilaments. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 84–93. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-84-93.

Введение

Развитие промышленности сложно представить без использования волокнистых композиционных материалов [1–9]. Такие материалы находят применение в металлургической, керамической и стекольной промышленности для выплавки и термической обработки. В химической и нефтехимической промышленности они могут использоваться как в термических процессах, так и в процессах очистки. Применение волокнистых композиционных материалов позволяет снизить потери тепла и обеспечить экономию энергоносителей при работе оборудования.

Из всего многообразия разработанных волокон можно выделить волокна, применяемые для получения композиционных материалов и волокнистых изделий, устойчивых к воздействию агрессивных сред, таких как кислород, разбавленные кислоты, гидроксиды и органические растворители. Наиболее распространены керамические волокна на основе муллита. Перспективно использование муллитовых волокон для армирования оксидных керамических композитов из-за присущего им сопротивления ползучести и прочности.

Разработан широкий ассортимент такого рода оксидных волокон [10]. Моноволокна на основе муллита являются компонентом керамических композиционных материалов. Кроме того, моноволокна применяют для изготовления текстиля, такого как уплотнительные шнуры, оплетка и нетканые материалы.

Основным способом промышленного производства керамических волокон является золь-гель метод, представляющий собой сухое механотропное формование волокнообразующего раствора, содержащего прекурсоры основных оксидов и волокнообразующий полимер, с последующим переводом их в керамическую форму посредством обжига.

Процесс получения оксидных волокон относится к высоким технологиям, поскольку каждая стадия требует сложных способов и режимов изготовления.

В связи с этим в настоящее время материаловеды продолжают работу по получению оксидных волокон с высоким уровнем эксплуатационных свойств. Одним из важных моментов при получении оксидных волокон золь-гель методом являются состав и способ приготовления волокнообразующего раствора. Вторым фактором, определяющим возможность получения волокон с высокими значениями характеристик, является термическая обработка, необходимая для формирования и спекания оксидов, преобразования переходных фаз в муллит. Эти превращения исследуют с помощью термогравиметрического, дифференциального термического анализа, порошковой дифракции рентгеновского излучения, распределения фазового состава методами рентгеновской микродифракции и микрофлуоресценции, электронографического анализа [11–17].

Керамические волокна на основе тугоплавких оксидов производят в США (фирмы 3M, DuPont, Zircar Ceramic), Японии (фирмы Sumitomo, Mitsui Mining, Nitivy Co Ltd), Германии (Cerafib GmbH (Мейсен), Fraunhofer Center HTL (Байрот)).

Китайские разработчики также сообщают об успехах в области получения оксидных волокон на основе муллита [18–28]. В частности, Сианьский университет транспорта (Xi'An Jiaotong University) запатентовал несколько вариантов получения волокна [18–23, 27, 28] по золь-гель технологии. Способы включают механотропное формование из растворов на основе органических и неорганических прекурсоров. Некоторые способы подразумевают получение волокон, армированных «усами» муллита (рис. 1).

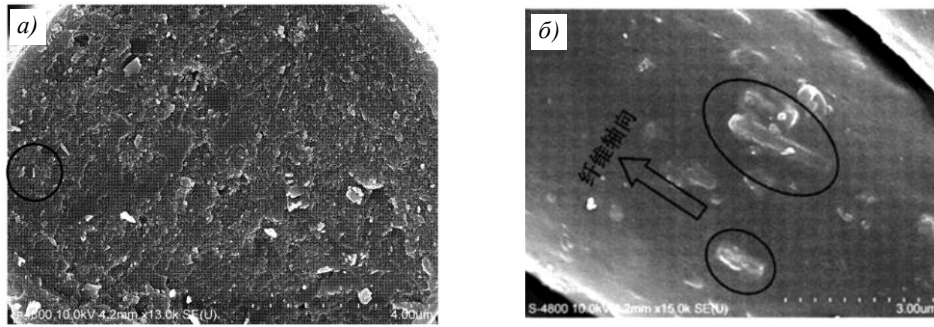


Рис. 1. Микрофотографии (сканирующая электронная микроскопия) моноволокна, армированного муллитом, в поперечном (а) и продольном (б) направлениях [22]

Материалы и методы

Работы по порошковой рентгеновской дифракции проводили на экспериментальной станции «Белок/РСА» источника синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов» [29], а также на дифрактометре с регистрацией дифрактограмм в $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении в геометрии Брэгга–Брентано. Дифрактограммы расшифровывали с помощью базы данных PDF-2. Рентгеновскую съемку проводили в диапазоне углов 2θ от 15 до 70 градусов.

Для исследования методами рентгеновской микродифракции и микрофлуоресценции использовали станцию «Микрофокус» источника синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов».

Исследование микроструктуры и электронографический анализ проводили на просвечивающем электронном микроскопе с термополювым катодом типа Шоттки при ускоряющем напряжении 200 кВ. Съемку осуществляли в сканирующем режиме на светлопольный и высокоугловой кольцевой темнопольный детекторы, а также в классическом режиме на нижнюю CCD-камеру (Charge Couple Device). Локальный химический анализ структурных составляющих проводили рентгеноспектральным методом с использованием энергодисперсионного спектрометра.

Процессы кристаллизации в моноволокнах исследовали методом оптической микроскопии в поляризованном свете на оптическом микроскопе. Обработанные моноволокна помещали в иммерсионную жидкость (показатель преломления $n = 1,515$) и исследовали в проходящем поляризованном свете с компенсатором при аппаратном увеличении $\times 30$, что для использованной камеры соответствует 0,147 мкм/пиксель. Придаваемую компенсатором характерную розовую окраску удаляли принудительной поканальной установкой уровней черного/белого.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и УНУ КИСИ-Курчатов НИЦ «Курчатовский институт».

Результаты и обсуждение

Для проведения исследований механотропным способом (экструзия через монофильеру – монокапилляр) изготовлены экспериментальные образцы моноволокон.

Образование муллита является диффузионным процессом и сопровождается проникновением Al_2O_3 в ядро SiO_2 . Этот процесс является функцией не только времени, но и температуры и природы прекурсоров. В связи с этим представляет интерес исследование полноты превращения прекурсоров в термостабильную фазу муллита.

В рамках проведенной работы исследованы образцы моноволокон, термообработанные до формирования муллита. Структура полученных образцов исследована на базе НИЦ «Курчатовский институт» пространственно-разрешающими методами [29].

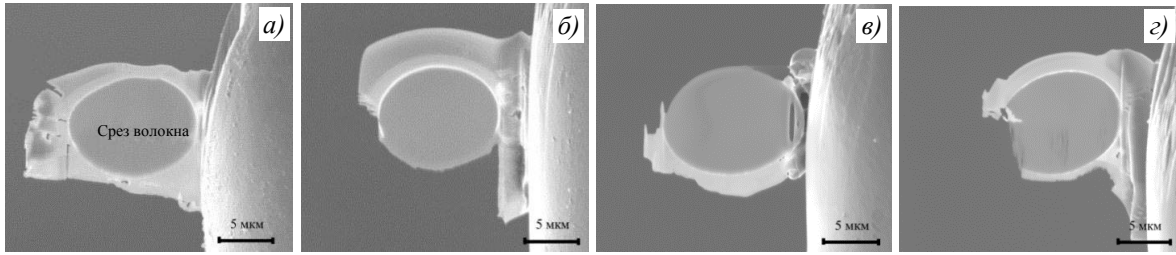


Рис. 4. Изображения (растровая электронная микроскопия) срезов, приготовленных методом фокусированного ионного пучка и закрепленных на медных «пальцах» полукольца, для образцов 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (з)

После пробоподготовки проведены исследования структуры тонких срезов моноволокон методом просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что материал образцов моноволокон находится в мелкокристаллическом состоянии. Зернистая структура имеет микропоры, представленные на рис. 5 в виде светлых пятен.

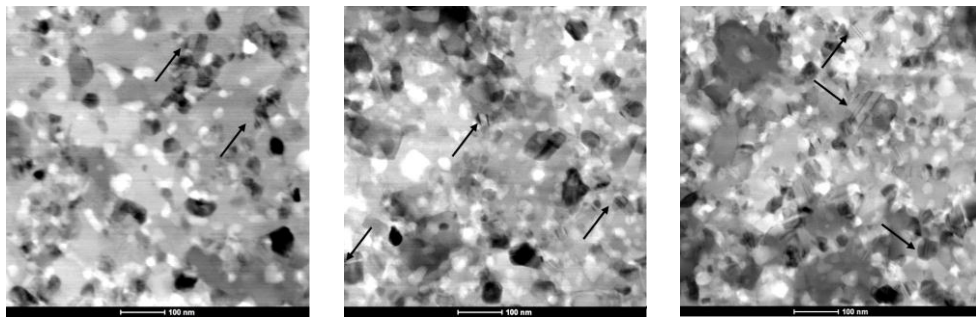


Рис. 5. Структуры тонких срезов поперечного сечения образцов моноволокон на основе муллита. Стрелками отмечены зерна – микродвойники вытянутой формы

Из рис. 5 следует, что волокна на основе муллита имеют выраженную зернистую структуру и содержат кристаллиты вытянутой формы: во всех образцах наблюдаются микродвойники, пересекающие зерна от края до края, габитус которых соответствует габитусу зерен муллита. Кроме того, присутствуют поры. Причем площади, занимаемые порами и кристаллитами, сопоставимы. Размер пор находится в диапазоне 10–60 нм (рис. 6).

Оценка размера зерен по электронным фотографиям образцов 1–4 (рис. 6) показала, что зернистая структура имеет полидисперсный состав. Размеры зерен в образцах моноволокон 1–4 составили 15–90, 20–125, 15–80 и 15–120 нм соответственно.

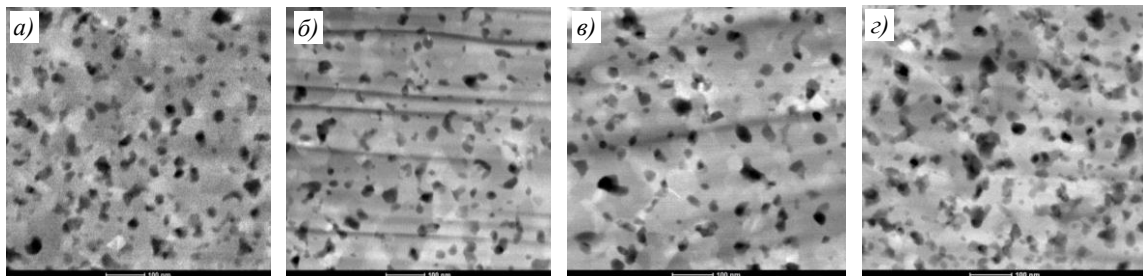


Рис. 6. Изображения (высокоугловая кольцевая темнопольная сканирующая просвечивающая электронная микроскопия) структуры образцов моноволокон 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (з), иллюстрирующие пористость материала

Исследования тонких срезов показали, что во всех образцах моноволокон присутствуют области аморфного силиката алюминия размером 0,3–0,9 мкм (рис. 7).

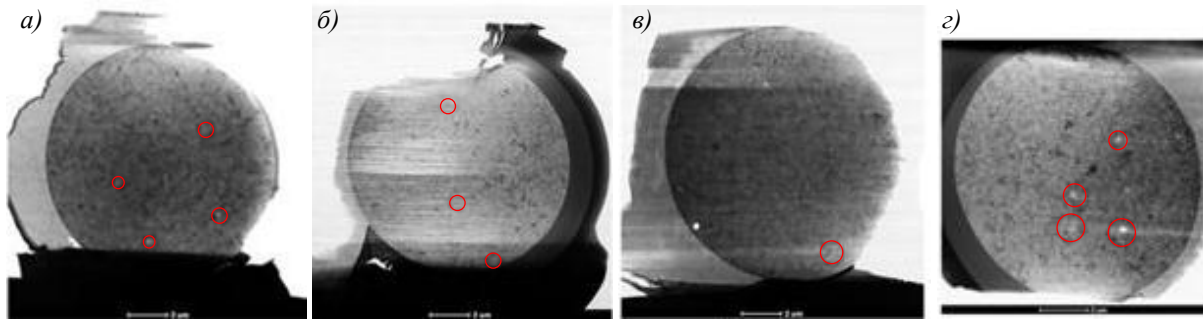


Рис. 7. Общий вид образцов моноволокон 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (з). Красным выделены включения аморфного силиката алюминия. Слои, окружающие моноволокна, – вспомогательный материал, нанесенный при пробоподготовке

На рис. 8 представлены электронограммы образцов моноволокон. Методом электронографического анализа установлено, что кристаллическая решетка материала волокон соответствует соединению Al_2SiO_5 (орторомбическая кристаллическая решетка, $a = 0,55$ нм, $b = 0,772$ нм, $c = 0,782$ нм). Кроме того, сохраняется некоторая доля наноразмерных зерен с решеткой $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, что проявляется на электронограммах в виде диффузных непрерывных колец (рис. 7).

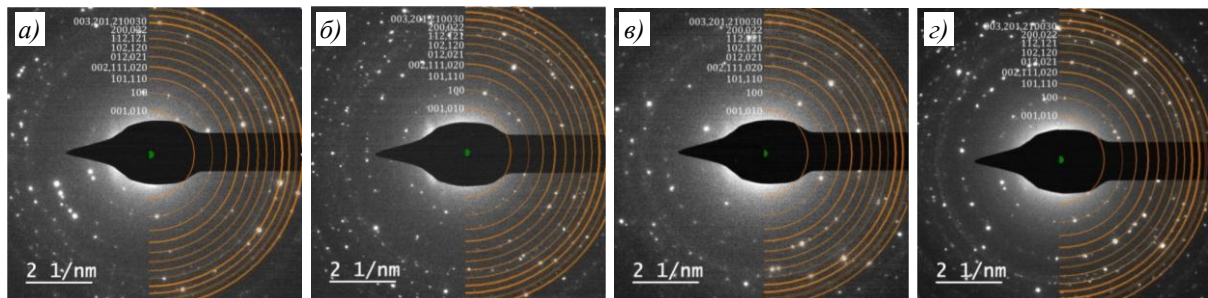


Рис. 8. Проиндцированные частично кольцевые электронограммы объема зерен в образцах моноволокон 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (з). Расчетные линии соответствуют фазе Al_2SiO_5 . Дифракция от выбранной области

Процессы кристаллизации в моноволоках исследовали методом оптической микроскопии в проходящем поляризованном свете, хорошо проявляющем как наличие анизотропных кристаллов, так и их пространственную ориентацию. При анализе рисунков учитывали наличие капельных включений в моноволокне, которые снижали значение средней прочности при растяжении, но при этом не искажали результаты исследований по определению температуры, оптимальной для правильной и интенсивной кристаллизации.

Микроструктура моноволокон в поляризованном свете приведена на рис. 9.



Рис. 9. Микроструктура моноволокон (оптическая микроскопия)

Анализ микроструктуры показал, что в слабо- и двухоснотекстурированной мелкозернистой массе появляются чрезвычайно крупные (длиной до 4–5 мкм) игольчатые кристаллы, которые по данным рентгенофазового анализа и характерному габитусу идентифицированы как кристаллы муллита, причиной появления которых является рекристаллизация в мелкозернистом материале. Во всех моноволокнах наблюдаются поры, ориентированные вдоль оси моноволокна.

Заключения

Рассмотрены процессы формирования кристаллической структуры моноволокон оксида алюминия. Проведен сравнительный анализ структурных особенностей моноволокон на основе муллита, полученных различными методами исследования (порошковая дифракция рентгеновского излучения, распределение фазового состава по длине моноволокна методами рентгеновской микродифракции и микрофлуоресценции, по поперечному сечению микрошлифа – методом электронографии).

Исследование моноволокон методом порошковой дифракции показало, что во всех образцах основной фазой является муллит, соответствующий формуле $Al_{2,34}O_{4,83}Si_{0,66}$, также обнаружена фаза $\delta-Al_2O_3$ (частично преобразуется в моноклинный Al_2O_3 и $\theta-Al_2O_3$). Фазы в процессе формирования не сохраняют какую-либо преимущественную ориентацию, кристаллиты ориентированы случайным образом.

Проведены исследования распределений локального фазового состава методом рентгеновской микродифракции и элементного состава методом рентгеновской микрофлуоресценции по длине образца моноволокна с помощью сфокусированного рентгеновского излучения, обеспечивающего локальность источника синхротронного излучения ≤ 20 мкм. Показано распределение фазового состава по длине моноволокна. Установлено, что все образцы имеют однородный фазовый состав на исследуемой длине моноволокон. Основной фазой на поверхности волокон является муллит, также обнаружена фаза $\delta-Al_2O_3$. Метод рентгеновской микрофлуоресценции показал наличие пика алюминия, распределение интенсивности которого по длине образца составляет ≤ 8 %.

Исследована кристаллическая структура волокон методом просвечивающей электронной микроскопии тонких поперечных срезов моноволокон, полученных методом фокусированного ионного пучка. Показано, что все образцы имеют выраженную зернистую структуру с вытянутыми зернами, габитус которых соответствует муллиту. Зерна равномерно распределены в кристаллической матрице.

Оценка размеров зерен по электронным фотографиям срезов показала, что размер кристаллитов составляет от 15 до 125 нм. Исследование темнопольных изображений тонких поперечных срезов моноволокон подтвердило наличие значительного количества пор, размер которых составляет 10–60 нм.

Метод электронографического анализа показал, что во всех образцах наблюдаются микродвойники, пересекающие зерна от края до края. Кристаллическая решетка зерен соответствует соединению Al_2SiO_5 с орторомбической кристаллической решеткой. Согласно электронограммам, также сохраняется некоторая доля наноразмерных зерен с решеткой $\gamma-Al_2O_3$, что проявляется в виде диффузных непрерывных колец. При детальном исследовании отдельных образцов моноволокон обнаружены единичные зерна с моноклинной кристаллической решеткой, соответствующей фазе $\theta-Al_2O_3$. На всех микрошлифах моноволокон обнаружен аморфный силикат алюминия. Это свидетельствует о том, что структурные превращения вещества моноволокон не завершены.

Благодарности

Коллектив авторов выражает особую благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» И.Н. Трунькину, к.ф.-м.н. С.Н. Якунину и сотруднику НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ к.т.н. Е.А. Лукиной, а также к.т.н. А.В. Заводову за оказанную помощь при проведении исследований и подготовке данной статьи.

Список источников

1. 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.
2. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
3. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Ивахненко Ю.А., Кузьмин В.В., Беспалов А.С. Состояние и перспективы развития теплозвукоизоляционных пожаробезопасных материалов // Проблемы безопасности полетов. 2014. № 7. С. 27–30.
5. Wei W.Ch., Halloran J.W. Transformation Kinetics of Diphasic Alluminisilicate Gels // Journal of American Ceramic Society. 1988. Vol. 71. P. 581–587.
6. High Performance Synthetic Fibers for Composites: Report / Committee on High Performance Synthetic Fibers for Composites. Washington, DC: National Academy Press, 1992. 148 p.
7. Ceramic Matrix Composites: Fiber Reinforced Ceramics and their Applications / ed. W. Krenkel. Wiley-VCH, 2008. 440 p.
8. Бучилин Н.В., Максимов В.Г., Бабашов В.Г. Керамические фильтры для расплава алюминия (обзор) // Стекло и керамика. 2015. № 7. С. 20–28.
9. Балинова Ю.А., Луговой А.А., Бутаков В.В. Перспективы использования тугоплавких оксидов для твердооксидных топливных элементов // Труды ВИАМ. 2024. № 8 (138). С. 48–63. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-48-63.
10. Максимов В.Г., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Особенности получения керамических материалов из активных к спеканию порошков // Новые огнеупоры. 2023. № 10. С. 14–21.
11. Лебедева Ю.Е., Щеголева Н.Е., Воронов В.А., Солнцев С.С. Керамические материалы на основе оксидов алюминия и циркония, полученные золь-гель методом // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). С. 61–73. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-61-73.
12. Воронов В.А., Чайникова А.С., Лебедева Ю.Е., Ткаленко Д.М. Влияние морфологии, фазового состава и содержания частиц оксида алюминия на реологические свойства водных суспензий на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 14–25. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-14-25.
13. Non-frangible alumina-silica fibers: pat. US4047965A; appl. 04.05.76; publ. 13.09.77.
14. Process for producing alumina fiber or alumina-silica fiber: pat. US4101615A; appl. 20.02.73; publ. 18.07.78.
15. Process for producing alumina-based fiber: pat. US5002750A; appl. 19.09.89; publ. 26.03.91.
16. Jia Y., Cao Xu, Jiao X., Chen D. Preparation of Alumina Ceramic Continuous Fibers with Inorganic Acid Aluminium Sol as Precursor // Journal of Inorganic Materials. 2023. Vol. 38. P. 1257–1264. DOI: 10.15541/jim20230153.
17. Continuous process for producing long α -Alumina fibers: pat. US 4812271; appl. 04.09.87; publ. 14.03. 89.
18. Technology of preparing aluminium oxide based continuous fibers by sol-gel process: pat. 101717257 CN; appl. 01.12.09; publ. 02.06.10.
19. Technology of preparing aluminium oxide based continuous fibers by sol-gel process: pat. 101717258 CN; appl. 01.12.09; publ. 02.06.10.
20. Process for preparing alumina-based continuous fiber with sol-gel method: pat. 101723682 CN; appl. 01.12.09; publ. 09.06.10.
21. Alumina based long fiber containing mullite crystal phase, and preparation method thereof: pat. 102358697 CN; appl.18.07.11; publ. 22.02.12.
22. Method for preparing alumina-based continuous fibers by using SiO₂ nanopowder raw material: pat. 102351516 CN; appl. 06.07.11; publ. 15.02.12.

23. Preparation method of alumina-based continuous long fiber containing mullite whisker second phase: pat. 102978745 CN; appl. 28.11.12; publ. 20.03.13.
24. Tan H., Guo C. Preparation of long alumina fibers by sol-gel method using malic acid // Transactions of non-ferrous metals society of China. 2011. Vol. 21. P. 1563–1567.
25. Zhang Y., Xiao C., An S. et al. Characterization of Defects of Mullite Fibers Prepared by Polyvinyl Butyral as Spinning Aid // Science of Sintering. 2010. Vol. 42. P. 203–210.
26. Zhang Y., Ding Y., Gao J., Yang J. Mullite fibres prepared by sol-gel method using polyvinylbutyral // Journal of the European Ceramic Society. 2009. Vol. 29. No. 6. P. 1101–1107.
27. Technology for preparing alumina-based continuous fibers by using inorganic aluminum salts: pat. 102180656 CN; appl. 22.02.11; publ. 14.09.11.
28. Preparation method of aluminum oxide ceramic continuous fiber: pat. 102965764 CN; appl. 13.11.12; publ. 13.03.13.
29. Svetogorov R., Dorovatovskii P., Lazarenko V. Belok/XSA Diffraction Beamline for Study Crystalline Samples at Kurchatov Synchrotron Radiation Source // Crystal Research and Technology. 2020. Vol. 55 (5). Art. 1900184. DOI: 10.1002/crat.201900184.

References

1. Kablov E.N. The Role of Fundamental Research in the Creation of Next-Generation Materials. *Reports of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
2. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and Technological Development of Russia in the Context of Achieving National Goals: Problems and Solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
3. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 22, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Ivakhnenko Yu.A., Kuzmin V.V., Bepalov A.S. Status and development prospects of heat and sound insulating fireproof materials. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2014, no. 7, pp. 27–30.
5. Wei W.Ch., Halloran J.W. Transformation Kinetics of Diphasic Alluminisilicate Gels. *Journal of American Ceramic Society*, 1988, vol. 71, pp. 581–587.
6. *High Performance Synthetic Fibers for Composites*: Report. Washington, DC: National Academy Press, 1992, 148 p.
7. *Ceramic Matrix Composites: Fiber Reinforced Ceramics and their Applications*. Ed. W. Krenkel. Wiley-VCH, 2008, 440 p.
8. Buchilin N.V., Maksimov V.G., Babashov V.G. Ceramic filters for aluminum melt (review). *Steklo i keramika*, 2015, no. 7, pp. 20–28.
9. Balinova Yu.A., Lugovoy A.A., Butakov V.V. Application trends of high temperature refractory oxides for solid oxides fuel cells. *Trudy VIAM*, 2024, no. 8 (138), pp. 48–63. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-48-63.
10. Maksimov V.G., Varrik N.M., Babashov V.G. Features of obtaining ceramic materials from sintering-active powders. *Novye ognepory*, 2023, no. 10, pp. 14–21.
11. Lebedeva Yu.E., Shchegoleva N.E., Voronov V.A., Solntcev S.S. Al₂O₃ and ZrO₂ ceramic materials obtained by sol-gel method. *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), pp. 61–73. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-61-73.
12. Voronov V.A., Chainikova A.S., Lebedeva Yu.E., Tkalenko D.M. Influence of morphology, phase composition and content of aluminum oxide particles on rheological properties of aqueous suspensions based on them. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 14–25. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-14-25.
13. *Non-frangible alumina-silica fibers*: pat. US4047965A; appl. 04.05.76; publ. 13.09.77.
14. *Process for producing alumina fiber or alumina-silica fiber*: pat. US4101615A; appl. 20.02.73; publ. 18.07.78.

15. *Process for producing alumina-based fiber*: pat. US5002750A; appl. 19.09.89; publ. 26.03.91.
16. Jia Y., Cao Xu, Jiao X., Chen D. Preparation of Alumina Ceramic Continuous Fibers with Inorganic Acid Aluminium Sol as Precursor. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, vol. 38, pp. 1257–1264. DOI: 10.15541/jim20230153.
17. *Continuous process for producing long α -Alumina fibers*: pat. US 4812271; appl. 04.09.87; publ. 14.03. 89.
18. *Technology of preparing aluminium oxide based continuous fibers by sol-gel process*: pat. 101717257 CN; appl. 01.12.09; publ. 02.06.10.
19. *Technology of preparing aluminium oxide based continuous fibers by sol-gel process*: pat. 101717258 CN; appl. 01.12.09; publ. 02.06.10.
20. *Process for preparing alumina-based continuous fiber with sol-gel method*: pat. 101723682 CN; appl. 01.12.09; publ. 09.06.10.
21. *Alumina based long fiber containing mullite crystal phase, and preparation method thereof*: pat. 102358697 CN; appl.18.07.11; publ. 22.02.12.
22. *Method for preparing alumina-based continuous fibers by using SiO₂ nanopowder raw material*: pat. 102351516 CN; appl. 06.07.11; publ. 15.02.12.
23. *Preparation method of alumina-based continuous long fiber containing mullite whisker second phase*: pat. 102978745 CN; appl. 28.11.12; publ. 20.03.13.
24. Tan H., Guo C. Preparation of long alumina fibers by sol-gel method using malic acid. *Transactions of non-ferrous metals society of China*, 2011, vol. 21, pp. 1563–1567.
25. Zhang Y., Xiao C., An S. et al. Characterization of Defects of Mullite Fibers Prepared by Polyvinyl Butyral as Spinning Aid. *Science of Sintering*, 2010, vol. 42, pp. 203–210.
26. Zhang Y., Ding Y., Gao J., Yang J. Mullite fibres prepared by sol-gel method using polyvinylbutyral. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, vol. 29, no. 6, pp. 1101–1107.
27. *Technology for preparing alumina-based continuous fibers by using inorganic aluminum salts*: pat. 102180656 CN; appl. 22.02.11; publ. 14.09.11.
28. *Preparation method of aluminum oxide ceramic continuous fiber*: pat. 102965764 CN; appl. 13.11.12; publ. 13.03.13.
29. Svetogorov R., Dorovatovskii P., Lazarenko V. Belok/XSA Diffraction Beamline for Study Crystalline Samples at Kurchatov Synchrotron Radiation Source. *Crystal Research and Technology*, 2020, vol. 55 (5), art. 1900184. DOI: 10.1002/crat.201900184.

Информация об авторах

Балинова Юлия Александровна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Бабашов Владимир Георгиевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бондаренко Екатерина Сергеевна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куликова Елизавета Сергеевна, научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт», nrcki@nrcki.ru

Пруцков Григорий Владимирович, младший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт», nrcki@nrcki.ru

Information about the authors

Yulia A. Balinova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Vladimir G. Babashov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ekaterina S. Bondarenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elizaveta S. Kulikova, Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov institute», nrcki@nrcki.ru

Grigoriy V. Prutskov, Junior Researcher, NRC «Kurchatov institute», nrcki@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.07.2025.

The article was submitted 03.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 11.07.2025.