

Научная статья

УДК 666.762.14

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-38-45

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МУЛЛИТА

В.В. Антипов¹, Н.М. Варрик¹, В.Г. Максимов¹, А.А. Луговой¹, В.Г. Бабашов¹, А.А. Шавнев¹

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

Аннотация. Пористые керамические материалы востребованы во многих отраслях промышленности, использующих высокотемпературные печи и другое оборудование, работающее при повышенных температурах. В данной работе получен пористый керамический материал из волокна муллита, а в качестве связующего использовано твердое связующее, содержащее мелкодисперсный порошок бора и измельченные кварцевые волокна. В работе также получены образцы пористых керамических материалов и оценены их механические и термические характеристики после термообработки при различных температурах.

Ключевые слова: керамический материал, муллит, тугоплавкие волокна, термостойкость, оксид алюминия

Для цитирования: Антипов В.В., Варрик Н.М., Максимов В.Г., Луговой А.А., Бабашов В.Г., Шавнев А.А. Изучение механических и термических характеристик пористого керамического материала на основе муллита // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-38-45.

Scientific article

STUDY OF MECHANICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF A POROUS CERAMIC MATERIAL BASED ON MULLITE

V.V. Antipov¹, N.M. Varrik¹, V.G. Maksimov¹, A.A. Lugovoy¹, V.G. Babashov¹, A.A. Shavnev¹

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

Abstract. Porous ceramic materials are in demand in many industries using high-temperature furnaces and other equipment operating at elevated temperatures. In this work, a porous ceramic material was obtained from a mullite fiber, and a solid binder containing fine boron powder and crushed quartz fibers was used as a binder. Samples of porous ceramic materials were obtained and their mechanical and thermal characteristics after heat treatment at various temperatures were evaluated.

Keywords: ceramic material, mullite, refractory fibers, heat resistance, aluminum oxide

For citation: Antipov V.V., Varrik N.M., Maksimov V.G., Lugovoy A.A., Babashov V.G., Shavnev A.A. Study of mechanical and thermal characteristics of a porous ceramic material based on mullite. *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-38-45.

Введение

Пористые керамические материалы на основе оксидных волокон востребованы во многих отраслях промышленности, в которых используются высокотемпературные печи и другое оборудование, работающее при высоких температурах. В начальный

период развития данного технологического направления волокнистые материалы использовали почти исключительно в виде мягких теплоизоляционных матов, но в последние десятилетия широкое распространение получили жесткие материалы на основе высокопористых керамик, армированных огнеупорными волокнами. Благодаря термической стойкости в окислительной среде, размеростабильности при высоких температурах, устойчивости к многократным нагревам и охлаждениям эти материалы в течение многих лет привлекают внимание потребителей. Однако их механические свойства пока значительно уступают свойствам традиционных плотных огнеупоров, в связи с этим производящие их фирмы работают над повышением свойств оксидных волокнистых материалов [1–7].

По сравнению с органическими полимерными связующими неорганические связующие имеют преимущество из-за их способности выдерживать более высокие температуры и, как правило, содержат оксид кремния. Некоторые виды связующих содержат также неорганические оксиды в виде наночастиц, которые обычно диспергированы в жидком носителе и представляют собой коллоидные растворы. При получении керамического материала жидкий носитель испаряется во время термообработки, а содержащееся в нем связующее образует мостики, скрепляющие волокна основы между собой.

Использование золь-гель технологий получило широкое распространение в технологиях изготовления керамических и композиционных материалов для промышленных горячих цехов. Суть этой технологии заключается в применении золь, таких как коллоидные растворы оксидов и гидроксидов металлов, способных превращаться в твердые продукты, т. е. керамизироваться при определенных температурных условиях.

Способ получения таких изделий включает приготовление водной смеси из керамических волокон и микрочастиц (и/или металлических частиц), а также ее отливку или в некоторых вариантах – пропитку волокнистого мата золь с последующей сушкой мата, при которой происходит гелирование золь с образованием межволоконных мостиков из золь-гель керамики, обеспечивающих жесткость и размерную стабильность мата, и дальнейшую термообработку полученного блока с получением керамического формованного изделия [8–13]. В качестве альтернативы иногда могут быть использованы твердофазные связующие в виде порошка, без жидкого носителя.

Керамическую продукцию в виде плиток или формованных изделий определенной геометрической формы используют для футеровки высокотемпературных печей и других компонентов промышленных установок, работающих при повышенных температурах. Другой важной областью применения пористой керамики являются керамические фильтры для горячих жидкостей и газов. Потребители ценят сочетание газопроницаемости и высокой удельной поверхности с огнеупорными свойствами, которые позволяют использовать высокопористые оксиды в процессах, проводимых при высоких температурах в химических средах, когда другие виды керамических материалов не имеют достаточной окислительной стойкости. Пористые материалы из оксидной керамики могут быть использованы в фильтрационных боксах или в качестве носителей катализаторов благодаря высокой термостабильности даже при длительном воздействии температур. Кроме того, низкая стоимость и доступность исходных компонентов позволяют осуществлять частую смену фильтровальных компонентов в случае их износа или засорения шлаками.

В данной работе получен пористый керамический материал из волокна на основе муллита, а в качестве связующего использовано твердое связующее из мелкодисперсного порошка бора и измельченных кварцевых волокон. В результате термической обработки в волокнистом мате образовались прочные керамические связи, которые

обеспечили размеростабильность при сохранении низкой плотности. В работе получены образцы пористых керамических материалов и оценены их механические и термические характеристики после обработок при различных температурах [14].

Материалы и методы

При получении пористого керамического материала использовали волокно на основе муллита. Твердофазное связующее содержало кварцевое волокно с порошковыми добавками бора.

Для исследования состава и структуры образцов пользовались методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, а для определения механических свойств использовали установку для определения прочности при сжатии; термостойкость определяли по линейной усадке образцов после высокотемпературной выдержки [15–17].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Эксперимент

Для получения образцов проводили диспергирование волокна муллита с добавлением кварцевого волокна и мелкодисперсного порошка бора в пропеллерной мешалке в водной среде. Водную пульпу, содержащую волокно и связующее, отливали в форму и обезвоживали по бумажной технологии. После сушки полученную заготовку осаждали в пресс-форме, получая образец со средней плотностью $\sim 0,4 \text{ кг/м}^3$. Полученные образцы подвергали высокотемпературной термообработке при температурах от 1200 до 1600 °С. Определены свойства полученных образцов: фазовый состав, плотность, прочность при сжатии и термостойкость.

Результаты и обсуждение

В качестве связующего использовали мелкорубленое супертонкое кварцевое волокно с добавлением порошка бора. Средняя плотность пористых керамических образцов составила $\sim 0,4 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 1 представлено электронно-микроскопическое изображение образца – видна микроструктура пористого керамического материала из муллитового волокна с использованием в качестве связующего смеси кварцевых волокон и порошка бора.

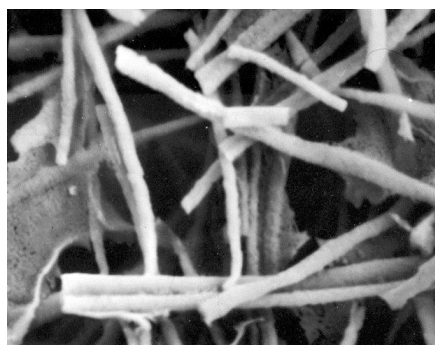


Рис. 1. Микроструктура (СЭМ; $\times 1000$) пористого керамического материала из муллитового волокна с использованием в качестве связующего смеси кварцевых волокон и порошка бора

На рис. 2 представлены микроструктуры образца на изломе. Выделенные на рис. 2, а, в фрагменты представлены при большем увеличении на рис. 2, б, г соответственно. В частности, можно видеть достаточно большое количество неволоконистых включений с характерной для данной технологии формой.

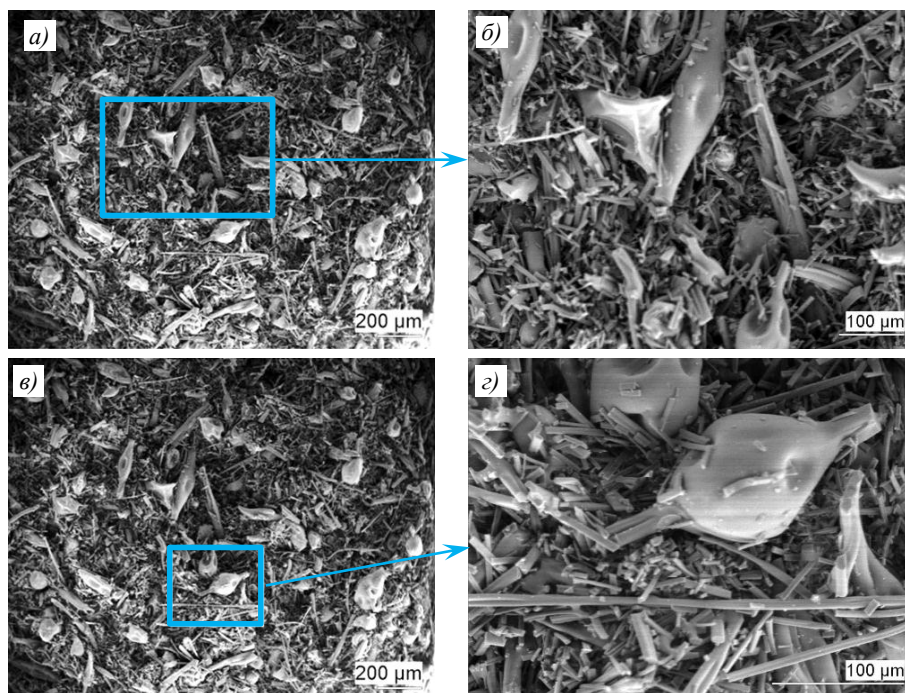


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения микроструктуры (СЭМ) образца на изломе (а, в) и увеличенные изображения выделенных фрагментов (б, з)

Рентгенофазовый анализ показал, что пористый керамический материал имел в составе фазу муллита и переходную фазу $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$. По-видимому, образец претерпел следующие превращения. При изготовлении образца измельченные кварцевые волокна с порошком бора и небольшим количеством поливинилового спирта распределились по муллитовым волокнам. После сушки пленка из поливинилового спирта зафиксировала связующее по всему объему волокнистой заготовки. Можно предположить, что в процессе термообработки поливиниловый спирт выгорел, а частицы бора окислились и вступили в реакцию с оксидом кремния в кварцевом волокне, образуя боросиликатное стекло $n\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, скрепляющее волокна муллита в единый каркас. При дальнейшем повышении температуры произошла взаимная встречная диффузия оксида кремния из волокон и оксида бора из связующей стекломассы, в результате чего оксиды бора и кремния взаимно растворились в объеме волокон и связующих мостиков, обеспечив снижение концентрации оксида бора в стекле до уровня $<5\%$, при котором свойства боросиликатного стекла уравниваются со свойствами кварцевого стекла. Кроме того, можно также предположить, что свободный оксид кремния в процессе высокотемпературной выдержки вступил в реакцию с избыточным над составом муллита оксидом алюминия, диффундирующим из волокна с образованием муллита.

Данный вывод основан в основном на данных рентгенофазового анализа, свидетельствующих о том, что после завершения процесса термообработки в материале не обнаружено ни какого-нибудь заметного аморфного рассеяния при угле $2\theta = 22$ градуса, характерного для силикатных стекол, ни легко фиксируемых рефлексов кристобалита, образующегося при расстекловывании высокосиликатных стекол. Остаточный оксид бора самостоятельных кристаллических фаз и заметного количества стеклофазы в данном материале не образует и наиболее вероятно присутствует в виде твердорастворной примеси в кристаллах основных фаз – различных модификаций оксида алюминия и муллита.

Таким образом, по мнению авторов данной статьи, эффекты, обеспечивающие работу подобного кварц-борного связующего, очень близки к эффектам, происходящим в процессе пайки исчезающим припоем (иногда классифицируется как «диффузионная сварка с присадкой» или даже просто как диффузионная сварка).

Термостойкость

Для оценки термостойкости образцов определяли усадку пористого керамического материала после термообработки в течение 24 ч. В двух взаимно перпендикулярных плоскостях вырезали параллелепипеды квадратного сечения 10×10 мм длиной 55 и 30 мм, которые термообработали на воздухе при температурах 1300, 1400, 1500 и 1600 °С в течение 24 ч, после чего измеряли длину образцов. Полученные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения линейной температурной усадки образцов после высокотемпературной выдержки при температурах 1300, 1400, 1500 и 1600 °С в течение 24 ч

Режим высокотемпературной выдержки									
1400 °С, 2 ч		1400 °С, 2 ч + 1300 °С, 24 ч		1400 °С, 2 ч + 1400 °С, 24 ч		1400 °С, 2 ч + 1500 °С, 24 ч		1400 °С, 2 ч + 1600 °С, 24 ч	
Длина, мм	Усадка, %	Длина, мм	Усадка, %	Длина, мм	Усадка, %	Длина, мм	Усадка, %	Длина, мм	Усадка, %
55,1	0	54,4	1,3	54,3	1,5	53,6	2,7	53,1	3,6
30,0	0	29,6	1,4	29,5	1,7	29,2	2,6	28,9	3,7

Результаты измерений показали, что образец имеет значение линейной усадки после выдержки в течение 24 ч при температуре 1500 °С, близкое к критическому квалификационному значению 3 %, а после выдержки при 1600 °С – превышает этот показатель. Таким образом, результаты позволяют утверждать, что термостойкость исследованных образцов с твердофазным связующим составляет немногим более 1500 °С.

Прочность при сжатии

Прочность образцов при сжатии определяли на испытательной машине для определения механических свойств при комнатной температуре. Испытали 30 образцов пористого керамического материала, вырезанных в продольном («слабом») и поперечном («сильном») направлениях по отношению к расположению волокон. В табл. 2 представлены средние значения прочности при сжатии.

Таблица 2

Средние значения прочности при сжатии образцов при комнатной температуре

Температура термообработки, °С	Направление вырезки образца	σ, МПа	σ _{ср} , МПа
1400	Продольное	2,1	2,45
	Поперечное	2,8	

Результаты испытаний показали, что материал с твердофазным связующим имеет достаточно высокую прочность при сжатии. Это можно объяснить тем, что при синтезе соединяющих волокна мостиков по «сухой» технологии они образовывались при практически безусадочной кристаллизации плотного расплава боросиликатного стекла и имеют свойства, близкие к свойствам плотноспеченного муллита, из которого состоят волокна.

Для исследования влияния термообработки на прочность при комнатной температуре пористого керамического материала проведена оценка прочности при сжатии образцов после термообработки при разных температурах. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние термообработки образцов на прочность при сжатии

Температура термообработки, °С	Плотность, г/см ³	Прочность при сжатии, МПа
1200	0,37	2,4
1300	0,38	2,9
1400	0,41	3,3
1500	0,48	3,4

Из результатов эксперимента следует, что при плотности $\sim 0,4$ г/см³ в интервале температур 1200–1500 °С наблюдается повышение остаточной прочности при сжатии образцов пористого керамического материала из муллитового волокна со связующим из измельченного кварцевого волокна и порошка бора. Рентгенофазовый анализ образцов свидетельствует о наличии 100 % муллита только после термообработки при температурах 1400 и 1500 °С. В остальных образцах наряду с муллитом присутствуют различные модификации оксидов алюминия и кремния, а также стеклофазы. Очевидно, что именно постепенное завершение процесса муллитизации межволоконных мостиков является причиной увеличения прочности при повышении температуры термообработки. Но при температурах системы, близких к температуре солидус, начинает сказываться флюсующий эффект остаточного оксида бора, что и снижает значения свойств данного материала при более высоких температурах (табл. 1).

Заключения

Выбор типа связующих фаз и методов их введения в керамический материал для изготовления пористых керамических материалов должен определяться в первую очередь техническими задачами (рабочая температура, прочность и т. д.), а также такими характеристиками, как экономичность, технологичность и экологическая чистота. Пористый керамический материал на основе высокотехнологичного «сухого» связующего, имеющий повышенные механические свойства, технологичность и газопроницаемость, может быть рекомендован для использования в качестве фильтров очистки горячих газов – например, выхлопных газов дизельных двигателей, а также материалов футеровки широко применяемых нагревательных печей.

Список источников

1. Zok F.W. Developments in oxide fiber composites // Journal of the American Ceramic Society. 2006. Vol. 89. No. 11. P. 3309–3324.
2. Sadik C., El Amranib I.-E., Albizane A. Recent advances in silica-alumina refractory: A review // Journal of Asian Ceramic Societies. 2014. Vol. 2. P. 83–96.
3. Parlier M., Ritti M.H. State of the art and perspectives for oxide/oxide composites // Aerospace Science and Technology. 2003. Vol. 7. No. 3. P. 211–221.
4. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Арктическое материаловедение. Томск: Изд. дом Томск. гос. ун-та, 2018. Вып. 3. 44 с.
5. 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.
6. Baklouti S., Bouaziz J., Chartier T., Baumard J.-F. Binder burnout and evolution of the mechanical strength of dry-pressed ceramics containing poly (vinyl alcohol) // Journal of the European Ceramic Society. 2001. Vol. 21. No. 8. P. 1087–1092.

7. Wiśniewska M., Chibowski S., Urban T., Sternik D. Investigation of the alumina properties with adsorbed polyvinyl alcohol // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2011. Vol. 103. No. 1. P. 329–337.
8. Process for gelling a sol in fiberformed ceramic insulation: pat. 5021369 USA; filed 01.08.88; publ. 04.06.91.
9. Refractory fibrous ceramic insulation and process of making same: pat. 6183852 USA; filed 11.03.94; publ. 06.02.01.
10. Thermal insulation system employing oxide ceramic matrix composite: pat. 6969546 USA; filed 20.10.03; publ. 29.11.05.
11. Bonding of Thermal Tile Insulation: pat. 6494979 USA; filed 29.09.00; publ. 17.12.02.
12. Бучилин Н.В., Люлюкина Г.Ю., Варрик Н.М. Влияние режима обжига на структуру и свойства высокопористых керамических материалов на основе муллита // *Труды ВИАМ*. 2017. № 5 (53). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-4-4.
13. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Неорганические термостойкие связующие // *Нанотехнологии в строительстве*. 2017. Т. 9. № 2. С. 69–80. URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-2-2017/66-81.pdf (05.10.2020). DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-2-66-81.
14. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова*. М.: ВИАМ, 2011. Т. 9: Теплозащитные, теплоизоляционные и композиционные материалы, высокотемпературные неметаллические покрытия. С. 31–37.
15. Зуев А.В., Заричняк Ю.П., Баринов Д.Я., Краснов Л.Л. Исследование теплофизических свойств гибкого теплоизоляционного материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.01.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
16. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Крылов В.Д. Построение трехмерных диаграмм деформирования для анализа механического поведения материала, испытанного при различных скоростях нагружения // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-59-66.
17. Баринов Д.Я., Шорстов С.Ю., Размахов М.Г., Гуляев А.И. Исследование теплофизических характеристик теплозащитного материала на основе стеклопластика при его деструкции // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.01.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-91-97.

References

1. Zok F.W. Developments in oxide fiber composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, vol. 89, no. 11, pp. 3309–3324.
2. Sadik C., El Amranib I.-E., Albizane A. Recent advances in silica-alumina refractory: A review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2014, vol. 2, pp. 83–96.
3. Parlier M., Ritti M.H. State of the art and perspectives for oxide/oxide composites. *Aerospace Science and Technology*, 2003, vol. 7, no. 3, pp. 211–221.
4. Buznik V.M., Kablov E.N. *Arctic materials sciences*. Tomsk: Tomsk State Univ., 2018, is. 3, 44 p.
5. 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. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 54–63. DOI: 10.8577/2071-9140-2020-0-1-54-63.
6. Baklouti S., Bouaziz J., Chartier T., Baumard J.-F. Binder burnout and evolution of the mechanical strength of dry-pressed ceramics containing poly (vinyl alcohol). *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, vol. 21, no. 8, pp. 1087–1092.
7. Wiśniewska M., Chibowski S., Urban T., Sternik D. Investigation of the alumina properties with adsorbed polyvinyl alcohol. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, vol. 103, no. 1, pp. 329–337.
8. *Process for gelling a sol in fiberformed ceramic insulation*: pat. 5021369 USA; filed 01.08.88; publ. 04.06.91.

9. *Refractory fibrous ceramic insulation and process of making same*: pat. 6183852 USA; filed 11.03.94; publ. 06.02.01.
10. *Thermal insulation system employing oxide ceramic matrix composite*: pat. 6969546 USA; filed 20.10.03; publ. 29.11.05.
11. *Bonding of Thermal Tile Insulation*: pat. 6494979 USA; filed 29.09.00; publ. 17.12.02.
12. Buchilin N.V., Lyulyukina G.Yu., Varrik N.M. Influence of the mode of roasting on structure and property of high-porous ceramic mullite materials. *Trudy VIAM*, 2017, no. 5 (53), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 05, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-4-4.
13. Kudryavtsev P.G., Figovsky O.L. Inorganic heat-resistant binders. *Nanotekhnologii v stroitelstve*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 66–81. Available at: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-2-2017/66-81.pdf (accessed: October 05, 2020). DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-2-66-81.
14. *Aviation materials*: reference book in 13 vols. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2011, vol. 9: Heat-shielding, heat-insulating and composite materials, high-temperature non-metallic coatings, pp. 31–37.
15. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya., Krasnov L.L. Measurement of thermophysical properties of flexible thermal insulation. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 30, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
16. Oreshko E.I., Erasov V.S., Krylov V.D. Construction of 3D stress-strain diagram for the analysis of mechanical behavior of the material tested at various loading rates. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-59-66.
17. Barinov D.Ya., Shorstov S.Yu., Razmahov M.G., Gulyaev A.I. Examination of thermophysical characteristics of a heat-protective material based on fiberglass during destruction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 30, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-91-97.

Информация об авторах

Антипов Владислав Валерьевич, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Варрик Наталья Мироновна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Луговой Алексей Алексеевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Шавнев Андрей Александрович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladislav V. Antipov, Deputy Director General for Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia M. Varrik, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Aleksey A. Lugovoy, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Andrey A. Schavnev, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.04.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.04.2023.

The article was submitted 04.04.2023; approved and accepted for publication after reviewing 06.04.2023.