

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-75-84

ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ ОКСИДНЫМИ ТУГОПЛАВКИМИ ВОЛОКНАМИ НА ГИБКОСТЬ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Антипов¹, Е.В. Степанова¹, В.Г. Бабашов¹, Ю.А. Ивахненко¹, В.В. Бутаков¹

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

Аннотация. Исследована возможность улучшения гибкости уплотнительных теплоизоляционных материалов путем введения в их состав армирующего компонента в виде штапельированных оксидных керамических тугоплавких волокон. Изучено влияние армирующего компонента на изменение критического радиуса изгиба образцов волокнистого материала на основе таких волокон. Испытания образцов показали улучшение показателей гибкости на 12–25 % в зависимости от толщины и объемной плотности теплоизоляционных материалов.

Ключевые слова: оксидные керамические волокна, теплоизоляционный материал, критический радиус изгиба, штапельированная ровница

Для цитирования: Антипов В.В., Степанова Е.В., Бабашов В.Г., Ивахненко Ю.А., Бутаков В.В. Влияние армирования оксидными тугоплавкими волокнами на гибкость теплоизоляционных материалов // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-75-84.

Scientific article

INFLUENCE OF REINFORCEMENT WITH OXIDE REFRACTORY FIBERS ON THE FLEXIBILITY OF THERMAL INSULATION MATERIALS

V.V. Antipov¹, E.V. Stepanova¹, V.G. Babashov¹, Yu.A. Ivakhnenko¹, V.V. Butakov¹

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

Abstract. In this work, we investigated the possibility of improving the flexibility of sealing heat-insulating materials by introducing a reinforcing component into the composition of the material in the form of chopped oxide ceramic refractory fibers. The effect of a reinforcing component on the change in the critical bending radius of samples of fibrous material based on ceramic refractory fibers has been studied. Sample tests showed an improvement in flexibility by 12–25 %, depending on the thickness and bulk density of heat-insulating materials.

Keywords: oxide ceramic fibers, fibrous heat-insulating material, critical bending radius, stapled roving, material density, roving length

For citation: Antipov V.V., Stepanova E.V., Babashov V.G., Ivakhnenko Yu.A., Butakov V.V. Influence of reinforcement with oxide refractory fibers on the flexibility of thermal insulation materials. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-75-84.

Введение

Стремительный научно-технический прогресс требует создания разнообразных видов материалов и совершенствования их свойств. В связи с развитием таких областей промышленности, как металлургическая, химическая, строительная, транспортная,

энергетическая и др., возникает потребность в создании материалов, имеющих совокупность следующих свойств: высокая химическая стойкость в агрессивных средах, коррозионная стойкость и механическая прочность при эксплуатации с рабочими температурами >1000 °С [1–6].

Одними из наиболее эффективных теплоизоляционных материалов с такими характеристиками являются материалы на основе керамических волокон из тугоплавких оксидов кремния, магния и др. и их соединений [7–11]. В отличие от монолитной огнеупорной керамики применение изоляции из оксидных волокон позволяет изготавливать теплоизоляционные изделия с малой плотностью и на их основе производить тепло- и электроизоляционные изделия для конструкций сложной геометрической формы. Продукция из них в виде теплоизоляционных блоков и гибких матов, высокотемпературной электроизоляционной оплетки обладает низким коэффициентом теплопроводности и заняла прочное место на рынке [12]. В частности, для химических аппаратов теплоизоляция на основе оксидных волокон обеспечивает нормальный ход технологического процесса при высоких температурах и воздействии агрессивных компонентов. Применение волокнистых теплоизоляционных материалов для нагревательных промышленных печей уменьшает потерю тепла во внешнюю среду, что позволяет экономно расходовать энергоресурсы и сохранять экологию окружающей среды. Поэтому во всех ведущих странах для изготовления высокотемпературных теплоизоляционных материалов разработаны технологии получения волокон из тугоплавких оксидов. За счет таких свойств, как высокая термостойкость, малая плотность и химическая инертность, эти волокна наиболее привлекательны для использования по сравнению с органическими волокнами, волокнами из стекломассы и карбида кремния, которые интенсивно окисляются или плавятся при относительно невысоких температурах, даже несмотря на дополнительные защитные покрытия. Керамические волокна из оксидов эффективно используются не только в качестве теплозащитных и теплоизоляционных материалов, но и могут служить в качестве армирующего компонента композиционных материалов с металлическими и керамическими матрицами, при производстве фильтров для расплавов и агрессивных газов и жидкостей, а также применяться в качестве носителя катализаторов [13–20].

Однако в отличие от органических волокон оксидные волокна после спекания не имеют необходимой эластичности [21, 22]. Испытания по определению механических свойств волокон показали, что их максимальное относительное удлинение при деформации, как правило, не превышает 1 % (рис. 1), дальнейшее увеличение нагрузки приводит к их обрыву.

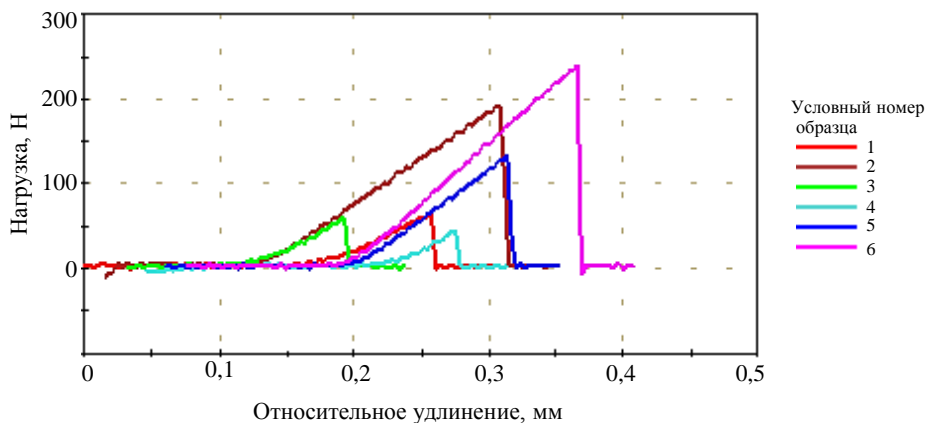


Рис. 1. Диаграмма испытаний волокон при деформации

При работах по монтажу теплоизоляции в узлах сложной формы особое внимание требуется уделять укладке теплоизоляционных матов без изломов и трещин, так как по этим дефектам будет происходить утечка теплового потока, что при последующей эксплуатации может стать причиной пожара или привести к потере прочности конструкции.

Изучение поведения образцов теплоизоляционного мата при изгибе показало, что во внутренних (прилегающих к поверхности изгиба) слоях материала возникают сжимающие напряжения, в то время как внешние слои подвергаются растяжению. Результаты исследования характера разрушения образцов волокнистых материалов свидетельствуют, что в первую очередь разрушаются именно внешние слои материала, причем образуется трещина на всю его толщину. Таким образом, для повышения гибкости материала прежде всего необходимо увеличить его устойчивость к растяжению.

Разрушение при растяжении трехмерной волокнистой структуры, к которой могут относиться теплоизоляционные материалы, происходит, предположительно, по двум основным механизмам. Во-первых, происходит разрыв отдельных волокон. Решение этой проблемы – в увеличении их прочности. Второй причиной разрушения материала при растяжении является вытаскивание отдельных волокон из толщи материала – так называемое раздергивание. С повышением количества физических зацеплений между соседними волокнами сопротивление мата процессу раздергивания должно возрасти [23, 24]. Следует отметить, что с целью получения однородного по теплофизическим свойствам материала в процессе изготовления пульпы необходимо сильно измельчить волокно. В то же время для сопротивления разрушению волокнистого материала по механизму раздергивания в нем надлежит максимально сохранить длину волокна, чтобы увеличить количество взаимных зацеплений между отдельными волокнами [25]. Классическим выходом из этого противоречия является введение армирующих добавок в основной состав в виде более длинных волокон и желательной непростой линейной геометрической формы.

Для повышения гибкости изоляционных материалов применяют армирование теплоизоляции стекловолокном и даже органическими нитями – например, изоляцию из асбеста. Однако условия применения таких материалов – это существенно более низкие температуры или использование криогенной техники [26, 27].

Известны примеры композиционных изоляционных материалов, армированных металлической проволокой из жаропрочных сплавов. Однако армирующая проволока ухудшает теплоизоляционные свойства, увеличивает массу изоляции, а при изгибе может прорезать внутренние слои теплоизоляции [28].

Для создания высокотемпературного теплоизоляционного материала повышенной гибкости целесообразно применять армирующие волокна также из тугоплавких оксидов.

Цель данной работы – исследование принципиальной возможности улучшения гибкости волокнистого керамического теплоизоляционного материала путем введения в него более длинных армирующих волокон.

Материалы и методы

Объектом исследования являются модельные образцы волокнистого керамического теплоизоляционного материала с объемной плотностью 100, 200 и 300 кг/м³, состоящие из керамических тугоплавких оксидных волокон (рис. 2, а, б). Для получения гибкого волокнистого теплоизоляционного материала с плотностью 100–300 кг/м³ в качестве основы использовали технологию формования материала из водной пульпы с применением керамических волокон из тугоплавких оксидов, которые, в свою очередь,

получали путем раздува волокнообразующего раствора с последующей термообработкой, обеспечивающей переход волокон в стабильную кристаллическую форму.

В качестве армирующего материала выбрали волокна из тугоплавких оксидов с составом, аналогичным составу основного материала. С этой целью изготовили партию длинномерного волокна в виде ровницы (рис. 2, в, з).

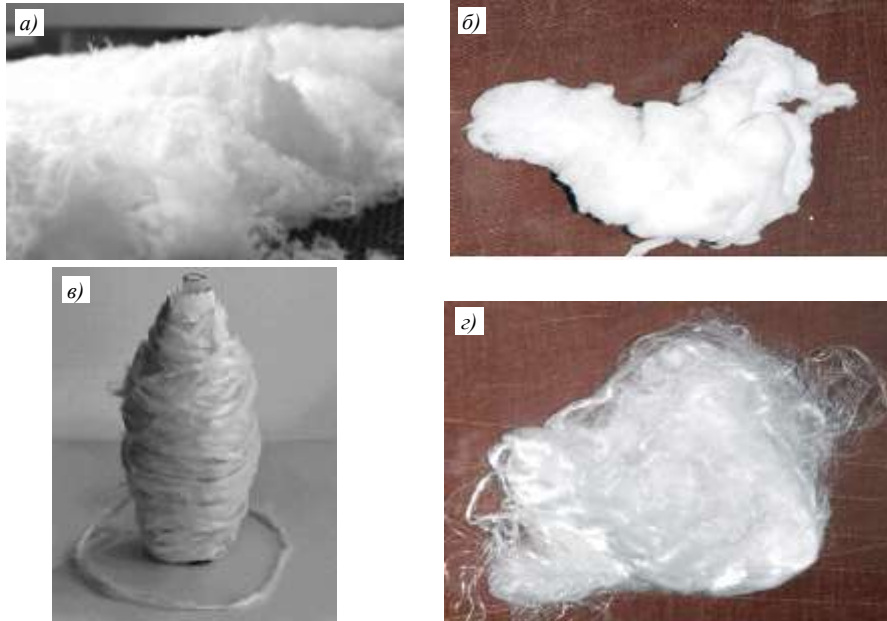


Рис. 2. Керамические волокна из тугоплавких оксидов (а, б), штапелированная ровница из тугоплавких оксидов (в) и отожженное волокно для изготовления ровницы (з)

Для оценки влияния армирования теплоизоляционного материала на его гибкость выбрали два направления исследования: в первом случае армирующие волокна добавляли в поверхностный слой теплоизоляционного мата с целью повышения прочности растягиваемой при изгибе поверхности, во втором случае их вводили во весь объем образца.

Основным критерием оценки влияния армирования являлось изменение критического радиуса изгиба материала до разрушения. Критический радиус оценивали по методике на основе ГОСТ 17177–94. Образцы материала изгибали вокруг цилиндра на постоянный для всех образцов угол, последовательно уменьшая его радиус, до появления трещины. За критический радиус изгиба для образца принимали наименьший радиус, при огибании которого материал не разрушился.

Для оценки гибкости материалов различной толщины в качестве численной величины для сравнения использовали безразмерное отношение толщины образца к сумме толщины образца и критического радиуса изгиба:

$$\text{Гибкость [безразмерная]} = H/(H + R),$$

где H – толщина образца; R – критический радиус изгиба данного образца.

В объем образцов материала с плотностью 100, 200 и 300 кг/м³ вводили штапелированную ровницу в качестве армирующего компонента, при этом количество штапелированных армирующих волокон составляло от 1 до 10 % от весового количества основных волокон. Ровничную нить штапелировали до длины волокон, равной 5 и 25 мм.

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

Результаты и обсуждение

Результаты исследований показали, что процесс поверхностного армирования теплоизоляционного материала затруднен в силу необходимости обеспечения равномерного распределения волокна по поверхности. По результатам проведения испытаний полученных образцов на изгиб также выявлено, что поверхностное армирование не оказывает положительного эффекта на прочностные характеристики (образцы разрушались подобно контрольным).

Для объемно-армированных образцов исследовали влияние длины штапелированных волокон на прочность при изгибе (исследования проводили на образцах, изготовленных с объемной плотностью 100, 200 и 300 кг/м³). Количество армирующего волокна составляло 1, 2, 5 и 10 % (по массе). В табл. 1 представлены результаты определения критического радиуса изгиба для полученных образцов.

Таблица 1

Зависимость критического радиуса изгиба образцов от содержания армирующего компонента

Содержание армирующего волокна, % (по массе)	Критический радиус изгиба образца, мм, с плотностью, кг/м ³		
	100	200	300
0 (контрольный образец)	10	15	52,5
1	10	15	37,5
2	10	15	37,5
5	10	10	25,0
10	10	10	25,0

Результаты эксперимента свидетельствуют, что длина штапелированного волокна не оказывает существенного влияния на критический радиус изгиба.

Исследование структуры образцов показало, что при использовании ровницы, штапелированной до длины 25 мм, возникают сложности с получением однородного образца. В структуре этих образцов наблюдается спутывание армирующих волокон в отдельные флоккулы с ограниченным захватом (не более 1–3 шт.) основных волокон образца. Распределение флоккул по образцу неравномерно и не создает условий для повышения прочности при растяжении. По-видимому, в дальнейшем путем подбора поверхностно-активных веществ, которые будут препятствовать запутыванию армирующего компонента, могут быть получены положительные результаты.

Исследование влияния армирования на свойства изоляционных материалов с различной объемной плотностью проводили с использованием ровницы, штапелированной до длины 5 мм.

Добавление более коротко штапелированной ровницы (5 мм) позволило отформовать образцы с равномерно распределенной плотностью.

На рис. 3 представлены результаты определения зависимости гибкости материала от содержания в нем армирующего компонента.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что армирование образцов с низкой плотностью (100 кг/м³) практически не влияет на гибкость материала. По-видимому, из-за низкой плотности армирующие волокна имеют слишком слабое сцепление с волокнами основы. Анализ структуры показал, что в этом случае длина армирующих элементов оказалась сопоставима с размером структурных элементов исходного волокнистого компонента материала, и по этой причине армирование не оказало влияния на гибкость образцов.

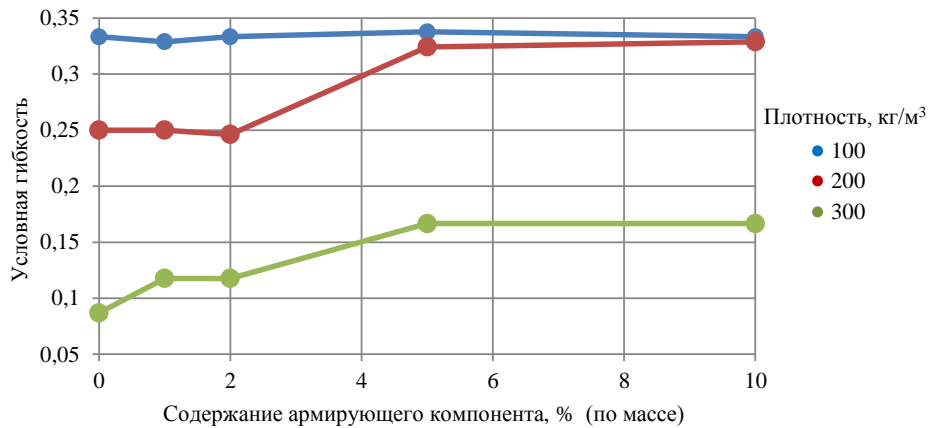


Рис. 3. Зависимость гибкости материала от содержания армирующего компонента

Дополнительные эксперименты с добавлением более длинных волокон ровницы, штапелированной до длины 25 мм, в образцах с низкой плотностью также не привели к увеличению прочности материала. Изучение структуры показало, что в процессе формирования армирующая ровница собиралась в единый клубок и наматывала на себя волокнистую составляющую. Получившаяся масса не позволила отформовать образец требуемой формы с равномерно распределенной плотностью. В дальнейшем от использования длинных армирующих элементов отказались.

При армировании материалов с плотностью 200 кг/м³ коротко штапелированным армирующим компонентом (5 мм) в количестве 5 % (по массе) и более наблюдается значительное улучшение гибкости (повышение ее вплоть до 40 % в безразмерном отношении).

Наибольший интерес представляет опыт введения коротко штапелированного армирующего компонента при получении материала с высокой плотностью (300 кг/м³). В этом случае гибкость материала начинает значительно повышаться при введении всего 1 % (по массе) армирующего компонента с сохранением тенденции к росту гибкости при увеличении содержания армирующего компонента. На рис. 4 представлены результаты испытаний на изгиб вокруг цилиндра радиусом 37,5 мм двух образцов материала.

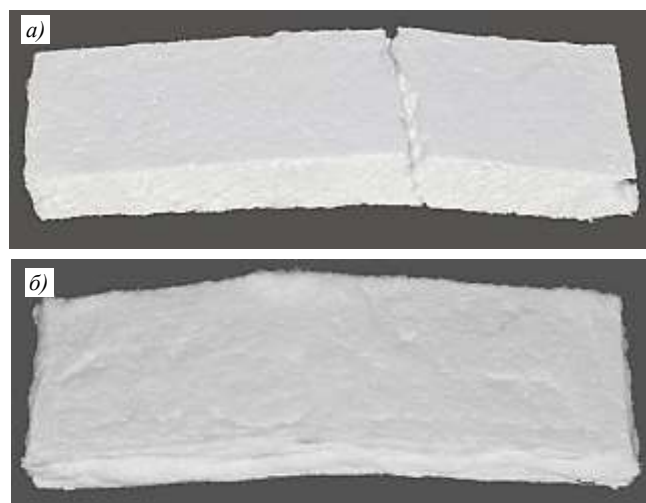


Рис. 4. Образцы материала с плотностью 300 кг/м³ без армирования (а) и с содержанием 1 % (по массе) армирующего компонента (б) после испытания на изгиб вокруг цилиндра радиусом 37,5 мм

Результаты испытания свидетельствуют, что первый образец (рис. 4, а), не содержащий армирующего компонента, при изгибании вокруг цилиндра хрупко раскололся – видна одна ровная трещина, направленная вдоль оси цилиндра, вокруг которого изгибается образец. Второй образец (рис. 4, б), содержащий 1 % (по массе) армирующего компонента, выдержал испытание на изгиб и остался без разрушения и дефектов – видно, что образец касается образующей цилиндра и не имеет трещин на внешней поверхности.

Таким образом, в результате исследований установлено следующее:

- основная причина низкой гибкости волокнистого теплоизоляционного материала – разрушение по механизму раздергивания;
- поверхностное армирование не оказывает существенного влияния на гибкость материала;
- при объемном армировании существует максимальная длина штапелирования армирующего компонента, выше которой формирование материала оказывается невозможным, т. е. длина армирующего компонента ограничена сверху;
- объемное армирование материала с низкой плотностью коротко штапелированным армирующим компонентом не оказывает влияния на его гибкость. Длина армирующего компонента должна существенно превышать размер флоккулы (длина армирующего компонента ограничена снизу);
- армирование улучшает гибкость – в зависимости от соотношения плотности и количества армирующего компонента гибкость (относительная величина) увеличивается с 5 до 40 %. Наибольший эффект армирование оказывает при введении в состав материала с высокой плотностью;
- для каждого волокнистого материала с конкретными составом и плотностью понадобится подбирать оптимальные параметры армирования.

Заключения

В работе исследовано влияние содержания штапелированной ровницы из тугоплавких оксидов на гибкость волокнистого теплоизоляционного материала. Рассмотрен также вопрос влияния длины штапелирования ровницы на механические свойства для введения в материал на этапе его формирования. Выбран состав совместимой с материалом изоляции, обеспечивающий повышение прочности при сохранении ее термостойкости. Определены условия введения армирующих волокон в состав теплоизоляции с различной объемной плотностью. Определены оптимальный линейный размер и необходимый объем вводимых упрочняющих штапелированных волокон. Установлено, что длина штапелированной ровницы не должна превышать 5 мм. Введение армирующего компонента большей длины затрудняет получение образцов необходимой формы и плотности. Предположительно, подбор поверхностно-активных веществ, которые позволят уменьшить спутывание армирующего компонента, может способствовать расширению диапазона длины его волокон.

Установлено, что введение армирующих волокон оказывает положительное влияние на гибкость материала с плотностью 200 и 300 кг/м³, при этом практически не улучшает показатель гибкости материала с низкой плотностью (100 кг/м³).

Отмечено, что увеличение содержания армирующего компонента повышает гибкость плотного волокнистого теплоизоляционного материала. Оптимальное количество добавочных волокон, по-видимому, необходимо определять с учетом испытаний по определению коэффициента теплопроводности получаемого теплоизоляционного материала.

Следует отметить, что эффект от применения армирующих волокон для теплоизоляционных материалов с большей, по сравнению с исследуемыми образцами, толщиной может быть значительно меньше из-за увеличения деформации растяжения на поверхности теплоизоляционного материала.

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. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
3. 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.
4. 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.
5. Ченцов И.В., Клибанский И.Б., Машенский А.А., Капитанов А.Ф. Технология важнейших отраслей промышленности. Минск: Вышэйшая школа, 1980. Ч. 1. 324 с.
6. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита / под ред. А.Б. Лыкова. М.: Энергия, 1976. 391 с.
7. Варрик Н.М., Максимов В.Г. Особенности получения высокотемпературного оксидного волокна // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 6. Ст. 06. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 23.11.2022).
8. Афанасов И.М., Лазорьяк Б.И. Высокотемпературные керамические волокна. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 51 с.
9. Волокна из оксидной керамики: пат. 2396388 Рос. Федерация; заявл. 10.02.10; опубл. 10.08.10.
10. 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.
11. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Максимов В.Г., Самородова О.Н. Оксидное волокно с покрытием карбида кремния для создания композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.10.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104.
12. 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: 31.10.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
13. Кац С.М. Высокотемпературные теплоизоляционные материалы. М.: Металлургия, 1981. 231 с.
14. Широкогородок В.К. Эффективные теплоизоляционные материалы. Краснодар: КГАУ, 2005. 130 с.
15. Аксенов С.Е. Современные теплоизоляционные материалы. Архангельск: АГТУ, 2009. 119 с.
16. Рахимов Р.З., Шелихов Н.С. Современные теплоизоляционные материалы. Казань: КГАСУ, 2006. 392 с.
17. Ермоленко И.Н., Ульянова Т.М., Витязь П.А., Федорова И.Л. Волокнистые высокотемпературные материалы. Минск: Наука и техника, 1991. 255 с.
18. Refractory fibrous ceramic insulation and process of making same: pat. US 6183852; filed 05.06.95; publ. 09.07.02.
19. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
20. Способ получения волокнистого оксидного материала: пат. SU 1730233 A1; заявл. 28.03.89; опубл. 30.04.92.

21. Житнюк С.В., Медведев П.Н., Сорокин О.Ю., Качаев А.А. Формирование кристаллографической текстуры в поликристаллической керамике как способ повышения свойств (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-74-86.
22. Степанова Е.В., Максимов В.Г., Ивахненко Ю.А. Внутренние дефекты комплексных нитей из оксидных тугоплавких волокон // Новые огнеупоры. 2022. № 2. С. 56–60.
23. Бутаков В.В., Басаргин О.В., Бабашов В.Г., Ивахненко Ю.А. Модель поведения волокнистого материала при изгибе // Труды ВИАМ. 2014. № 12. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-6-6.
24. Колышев С.Г., Басаргин О.В., Бутаков В.В. Эксперименты по определению прочности при растяжении образцов из легковесных гибких волокнистых материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 5. С. 8–11.
25. Дука А.В. Разработка технологии усовершенствованных кварцевых ТЗМ на основе развития принципов структурообразования волокнистых пульп: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 1989. 22 с.
26. Ходаковский М.Д. Производство стеклянных волокон и тканей. М.: Химия, 1973. 312 с.
27. Черняк М.Г. Непрерывное стеклянное волокно. М.: Химия, 1965. 322 с.
28. Жабин А.Н., Сидоров Д.В., Няфкин А.Н. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 6 (100). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-27-35.

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. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
3. 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. *Innovacii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
4. 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, pp. 24.
5. Chentsov I.V., Klibansky I.B., Mashchensky A.A., Kapitanov A.F. *Technology of the most important industries*. Minsk: Vysheyschaya shkola, 1980, part 1, 324 p.
6. Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B. *Thermal protection*. Ed. A.B. Lykov. Moscow: Energy, 1976, 391 p.
7. Varrik N.M., Maksimov V.G. Features of obtaining high-temperature oxide fiber. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2016, no. 6, paper no. 06. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: November 23, 2022).
8. Afanasov I.M., Lazoryak B.I. *High temperature ceramic fibers*. Moscow: Lomonosov Moscow State Univ., 2010, 51 p.
9. *Fibers from oxide ceramics*: pat. 2396388 Rus. Federation; filed 10.02.10; publ. 10.08.10.
10. 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.
11. Babashov V.G., Varrik N.M., Maksimov V.G., Samorodova O.N. Oxide fiber coated with silicon carbide for producing composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 26, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104.
12. 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: October 31, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.

13. Katz S.M. *High temperature thermal insulation materials*. Moscow: Metallurgiya, 1981, 231 p.
14. Shirokorodiyuk V.K. *Effective thermal insulation materials*. Krasnodar: KSAU, 2005, 130 p.
15. Aksenov S.E. *Modern thermal insulation materials*. Arkhangelsk: AGTU, 2009, 119 p.
16. Rakhimov R.Z., Shelikhov N.S. *Modern thermal insulation materials*. Kazan: KGASU, 2006, 392 p.
17. Ermolenko I.N., Ulyanova T.M., Vityaz P.A., Fedorova I.L. *Fibrous high temperature materials*. Minsk: Nauka i tekhnologii, 1991, 255 p.
18. *Refractory fibrous ceramic insulation and process of making same*: pat. US 6183852; filed 05.06.95; publ. 09.07.02.
19. Perepelkin K.E. *Reinforcing fibers and fibrous polymer composites*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2009, 380 p.
20. *Method for obtaining fibrous oxide material*: pat. SU 1730233 A1; filed 28.03.89; publ. 30.04.92.
21. Zhitnyuk S.V., Medvedev P.N., Sorokin O.Yu., Kachaev A.A. Formation of crystallographic texture in polycrystalline ceramics as a way to enhance properties (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 11, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-74-86.
22. Stepanova E.V., Maksimov V.G., Ivakhnenko Yu.A. Internal defects of complex threads from oxide refractory fibers. *Novye ogneupory*, 2022, no. 2, pp. 56–60.
23. Butakov V.V., Basargin O.V., Babashov V.G., Ivakhnenko Yu.A. A behavioral model of the fibrous material during bending tests. *Trudy VIAM*, 2014, no. 12, paper no. 6. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 14, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-6-6.
24. Kolyshhev S.G., Basargin O.V., Butakov V.V. Experiments to determine the tensile strength of samples from lightweight flexible fibrous materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2014, no. 5, pp. 8–11.
25. Duka A.V. *Development of technology for improved quartz HSM based on the development of the principles of structure formation of fibrous pulps*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 1989, 22 p.
26. Khodakovskiy M.D. *Manufacture of glass fibers and fabrics*. Moscow: Khimiya, 1973, 312 p.
27. Chernyak M.G. *Continuous glass fiber*. Moscow: Khimiya, 1965, 322 p.
28. Zhabin A.N., Sidorov D.V., Nyafkin A.N. Fibrous composite materials with a metal matrix (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 6 (100), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 04, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-27-35.

Информация об авторах

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

Степанова Елена Васильевна, старший 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

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

Бутак Вьячеслав Владимирович, инженер 1 категории, 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

Elena V. Stepanova, Senior 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

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

Vyacheslav V. Butakov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 16.01.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.02.2023.

The article was submitted 16.01.2023; approved and accepted for publication after reviewing 02.02.2023.