



УДК 66.045.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-6-6

**МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА
ПРИ ИЗГИБЕ**

В.В. Бутаков

О.В. Басаргин

В.Г. Бабашов

Ю.А. Ивахненко

Декабрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 66.045.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-6-6

В.В. Бутаков¹, О.В. Басаргин¹, В.Г. Бабашов¹, Ю.А. Ивахненко¹

МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИЗГИБЕ

Рассматриваются особенности поведения гибкого волокнистого материала при испытании на изгиб. Предложена модель поведения гибкого материала при испытании на изгиб. Модель показывает взаимосвязь между способностью материала выдерживать изгиб и способностью материала к упругому сжатию и растяжению. Приводится соотношение между критическим радиусом изгиба материала и модулем упругости материала при сжатии и растяжении. Выдвинуты предложения о способах повышения гибкости волокнистого материала.

Ключевые слова: теплоизоляция, гибкий волокнистый материал, критический радиус изгиба.

V.V. Butakov, O.V. Basargin, V.G. Babashov, Y.A. Ivakhnenko

A BEHAVIORAL MODEL OF THE FIBROUS MATERIAL DURING BENDING TESTS

The paper considers the behavior features of a flexible fibrous material during the bending test. A behavioral model of the flexible fibrous material during bending tests is suggested. This model shows the relationship between ability of the material to withstand bending stress and its ability to the elastic compression and tension. The article describes the correlation between the minimum bend radius and elasticity module at compressive and tension. Proposals on ways to enhance flexibility of the fibrous material are given.

Keywords: heat insulation, flexible fibrous material, minimum bend radius.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время в качестве теплозащиты ракетно-космической техники и летательных аппаратов (ЛА) все чаще используются конструкции с применением гибких волокнистых теплоизоляционных материалов (ВТИ), изготовленных из волокон на основе тугоплавких оксидов. Широкому использованию ВТИ способствуют их уникальные свойства, такие как низкие плотность и теплопроводность, высокая температура эксплуатации, возможность изоляции поверхностей сложной формы [1–12].

В настоящее время конструкторские коллективы заинтересованы в получении ВТИ материалов с минимальным критическим радиусом изгиба. Как правило, такие материалы получают в виде нетканых матов различных марок широкой номенклатуры по толщине – от 2 мм до нескольких сантиметров.

При определении критического радиуса изгиба образцов гибких волокнистых материалов из волокон тугоплавких оксидов (Al_2O_3 , SiO_2) замечено, что разрушение образцов начиналось с появления трещин на внешнем слое мата. Данная работа посвящена попытке объяснить наблюдаемое явление с точки зрения напряжений, возникающих в образце при испытании на изгиб в одномерном приближении, и некоторым особенностям поведения гибких волокнистых материалов.

Материалы и методы

Гибкость волокнистого материала (мата) оценивали по ГОСТ 17177. Для экспериментального определения коэффициентов пропорциональности между сжимающей или растягивающей нагрузкой, приложенной к образцу, и его линейной деформацией применялась разрывная машина Instron 5965.

Основным элементом структуры высокотемпературного гибкого волокнистого материала является минеральное волокно – как правило оксидное. Это волокно образует пространственную сетку, узлами которой являются физические зацепления волокон между собой. Предел упругих деформаций волокон довольно мал (доли процентов). В то же время образцы материалов из таких волокон демонстрируют упругое сжатие и растяжение в значительно больших пределах (единицы процентов). Как следствие, такие материалы могут упруго изгибаться [13–19].

Следует сразу отметить, что для классического твердого тела при упругих деформациях внешние силы изменяют взаимное расположение частиц тела, смещая их из энергетически равновесных положений. Возникающие внутренние силы противодей-

ствуют внешним и уравнивают их при достижении стационарного состояния. В области линейной зависимости между силой и упругой деформацией твердое тело может быть представлено в виде модели, состоящей из квазиупругих вибраторов [20].

Волокнистый материал представляет собой пространственную сеть из волокон. Причем в большинстве случаев длина волокна между узлами сети больше расстояния между ними, т. е. волокно между узлами сети изогнуто, и представляет собой некоторое подобие пружины. Иными словами, волокнистый материал можно также представить в виде модели из упругих и массивных элементов, а подобная модель в любом случае подчиняется закону Гука. Таким образом, несмотря на различие в механизмах возникновения упругих деформаций в классическом твердом теле и волокнистом материале, можно наблюдать упругие деформации в волокнистом материале и применять закон Гука в тех пределах, в которых волокнистый материал соответствует выбранной модели.

Рассмотрение процессов, происходящих в структуре волокнистого материала при испытании на изгиб, важно для понимания поведения материала при использовании в конкретной конструкции и нахождения путей улучшения технологии материала с целью увеличения его гибкости. Поэтому представляется целесообразным создать модель, которая позволит связать между собой легко измеряемые свойства материала с его гибкостью.

Предположим, что прямоугольный образец материала длиной l_0 , шириной b и высотой H изгибают вокруг цилиндра радиусом R – достаточно большим, чтобы материал изгибался упруго (без превышения пределов упругой деформации слоев). В этом случае внешние слои образца будут растянуты, а внутренние слои будут подвергаться сжатию (рис. 1).

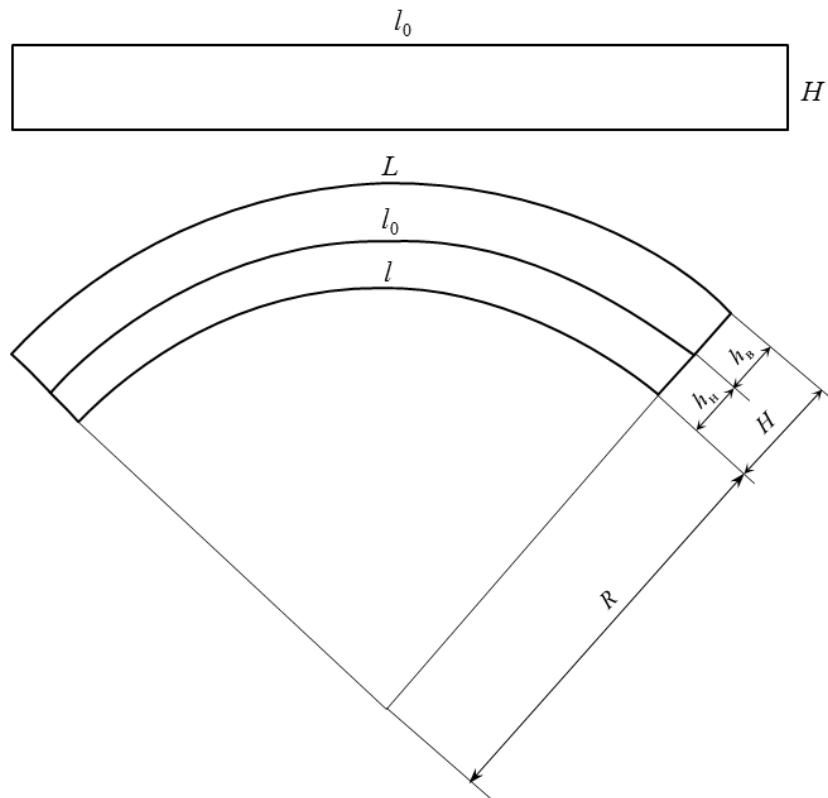


Рисунок 1. Геометрическая схема изгиба образца

Численным критерием гибкости материала является критический радиус изгиба образца. Это минимальный радиус цилиндра, при изгибании по образующей которого образец материала сохраняет свою целостность без повреждений структуры. Очевидно, что при постепенном уменьшении радиуса цилиндра R (в данной модели) материал разрушится при наступлении одного из условий:

- растяжение верхнего (внешнего) слоя превысит допустимые упругие деформации растяжения материала;
- сжатие нижнего (внутреннего) слоя превысит допустимые упругие деформации сжатия материала.

Первые проведенные эксперименты показали, что допустимые деформации сжатия превосходят допустимые деформации растяжения в 2 и более раз. Это связано с тем, что при нагружении (растяжении или сжатии) образца в некоторый момент времени начинается проскальзывание волокон в местах их физических зацеплений. При сжатии проскальзывание отдельных волокон в физических зацеплениях приводит к сокращению расстояния между зацеплениями и увеличению доли свободных концов в материале, а при растяжении волокна выдергиваются из физических зацеплений, и происходит разрушение материала по механизму раздергивания. Поэтому в дальнейшем будем счи-

тать, что материал разрушается при превышении пределов упругого растяжения внешнего слоя.

Рассмотрение такой модели изгиба образца предполагает наличие слоя материала, не испытывающего растяжения или сжатия. Очевидно, что чем выше (ближе к внешнему краю образца) расположен этот слой, тем меньше относительное удлинение внешнего слоя материала при изгибе.

Рассматривая изгибание модели, мысленно разделим изогнутый образец на достаточно большое число N элементарных секторов, настолько узких, что угол α этого сектора можно было бы считать малым – $\sin(\alpha) \approx \alpha$. Из-за малости углов следует также малая разница между длиной дуги и длиной хорды этой дуги. Поэтому сектор можно представить в виде трапеции с основаниями L/N и l_0/N соответственно (рис. 2).

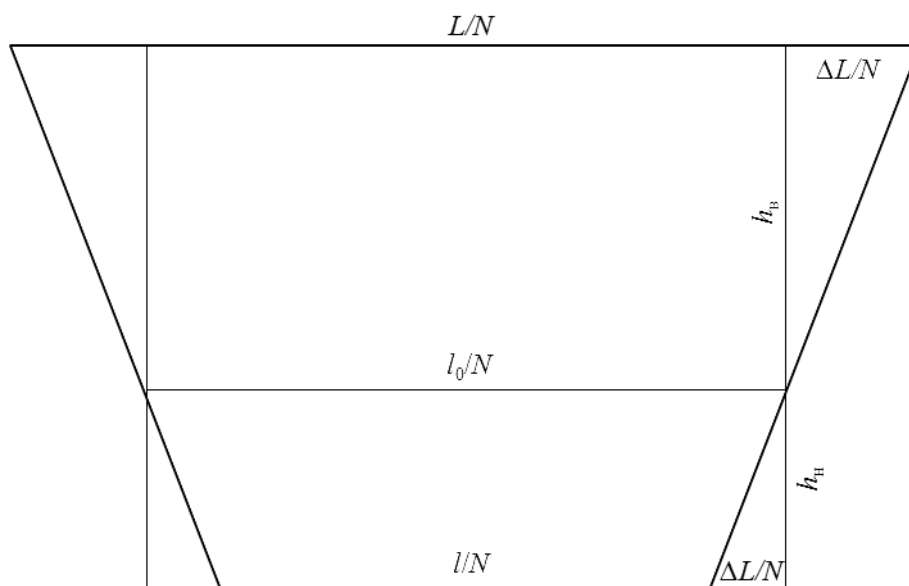


Рисунок 2. Элементарный сектор изогнутого образца в виде трапеции

Очевидно, что если в образце существует некоторый ненагруженный слой, то он сохранит свою прежнюю длину (длину базы образца до нагружения) [21]. Расположение ненагруженного слоя легко определить из пропорции:

$$\frac{h_B}{h_H} = \frac{\Delta L/N}{\Delta l/N} = \frac{\Delta L}{\Delta l}.$$

Рассмотрим подробнее изменение длины верхнего и нижнего слоев элементарного сектора образца как идеальных упругих параллелепипедов, предполагая что:

– высота образца в процессе изгибания не меняется (пренебрегаем незначительным изменением высоты образца);

– растягивающая и сжимающая силы равны по модулю и противоположны по направлению (участок образца остается неподвижен);

– модуль упругости при сжатии и растяжении может быть разным (эксперименты показали, что модуль упругости при сжатии и растяжении волокнистого материала может отличаться в 2–3 раза). Обозначим их соответственно как E_c – для сжатия и E_p – для растяжения (рис. 3).

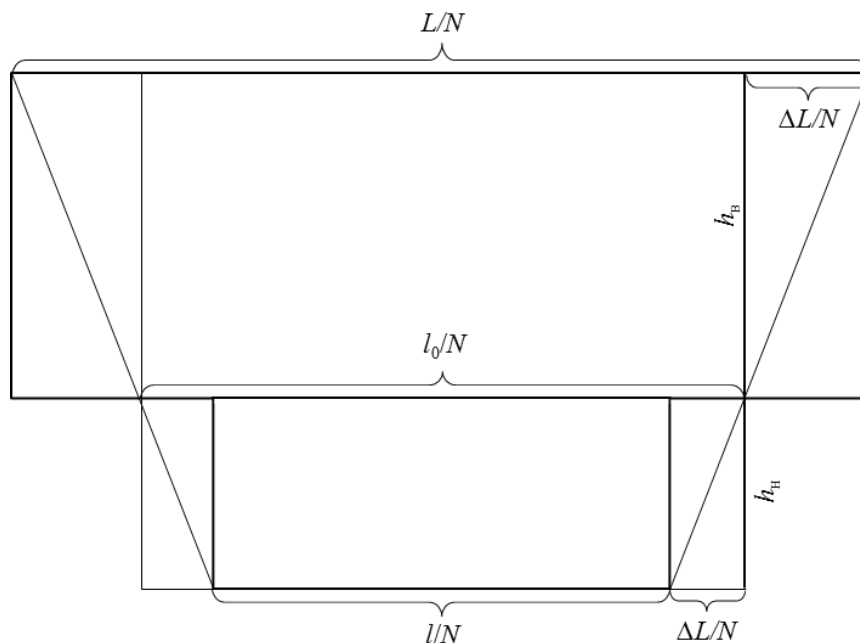


Рисунок 3. Представление элементарного сектора образца в виде растянутого и сжатого слоя

Закон Гука применительно к этому случаю может быть записан в виде:

$$\Delta L = \frac{F}{S_{\text{верх}}} \cdot \frac{1}{E_p} = \frac{F}{h_B b \cdot E_p};$$

$$\Delta l = \frac{F}{S_{\text{ниж}}} \cdot \frac{1}{E_c} = \frac{F}{h_H b \cdot E_c},$$

где S – площадь поперечного сечения образца; h_B и h_H – высота растянутого и сжатого слоя; b – ширина образца.

Тогда очевидно, что

$$\frac{h_B}{h_H} = \frac{\Delta L}{\Delta l} = \frac{h_H E_c}{h_B E_p} \quad \text{или} \quad \frac{h_B}{h_H} = \frac{\sqrt{E_c}}{\sqrt{E_p}}.$$

В результате рассмотренная модель поведения материала при испытании на гибкость позволила определить соотношение между относительным удлинением верхнего

слоя образца $\Delta L_{\text{отн}}=(L/l_0)-1$ (см. рис. 1), радиусом изгиба R , высотой образца H и модулями упругости при сжатии и растяжении (E_c и E_p):

$$\Delta L_{\text{отн}} + 1 = \frac{L}{l_0} = \frac{(R+H)(\sqrt{E_c} + \sqrt{E_p})}{R(\sqrt{E_c} + \sqrt{E_p}) + H\sqrt{E_p}}.$$

Нетрудно заметить, что это выражение может быть записано в виде

$$\Delta L_{\text{отн}} = \frac{Z}{1-Z},$$

где $Z = \frac{H}{R+H} \cdot \frac{\sqrt{E_c}}{\sqrt{E_c} + \sqrt{E_p}}.$

Очевидно, что критическим радиусом изгиба образца материала в рассматриваемой модели станет такой радиус, при котором относительное удлинение верхнего слоя образца материала превысит допустимое относительное удлинение для этого же образца.

Для проверки работоспособности модели в соотношение подставили предельно допустимое относительное удлинение образца, определенное экспериментально, высоту и модули упругости, рассчитанные по результатам испытаний на определение пределов прочности при растяжении и сжатии. После чего полученный теоретически критический радиус изгиба сравнили с реально измеренным. Разница между результатами не превышала 50%, что объясняется погрешностью измерений.

Результаты и обсуждение

Использование предложенной модели позволило с приемлемой точностью теоретически вычислить критический радиус изгиба, совпадающий с полученным в ходе прямых испытаний.

Из рассмотрения этой модели можно сделать вывод о том, что поведение материала при испытании на изгиб в наибольшей степени определяется его способностью к упругому растяжению и сжатию. Исходя из этого существует два основных способа повышения гибкости материала.

Первым и наиболее очевидным способом является увеличение пределов упругих деформаций при растяжении. При этом граница слоев остается на прежнем месте, однако растяжение внешнего слоя, прежде бывшее запредельным, становится допустимым.

Второй способ заключается в смещении ненагруженной границы сжатого и растянутого слоев ближе к внешнему краю образца. При этом величина деформации растяжения уменьшается до допустимых пределов. Поскольку квадрат отношения высоты

растянутого и сжатого слоев пропорционален отношению модулей упругости при сжатии и растяжении

$$\left(\frac{h_B}{h_H}\right)^2 = \frac{E_c}{E_p} \text{ или } \frac{h_B}{h_H} = \frac{\sqrt{E_c}}{\sqrt{E_p}},$$

изменение отношения модулей упругости при сжатии и растяжении образца позволяет сместить границу в нужную сторону.

Предложенная модель вплотную подводит к необходимости подробнее исследовать структуру волокнистого материала с целью обнаружения взаимосвязей между технологическими параметрами процесса получения материала, параметрами его структуры и макросвойствами материала, а также одновременно с этим является удобной основой для создания методов исследования структуры материала.

Заключение

1. Гибкие волокнистые материалы способны испытывать обратимые деформации при одностороннем сжатии и растяжении в пределах нескольких процентов. Зависимость между приложенной к образцу нагрузкой и деформацией образца в области обратимых деформаций линейная, а коэффициент пропорциональности между напряжением и деформацией (модуль упругости) отличается при приложении сжимающей и растягивающей нагрузок, что связано с механизмом возникновения упругих сил, отличающимся от механизма появления упругих сил в классическом твердом теле.

2. В наибольшей степени способность материала выдерживать изгиб вокруг цилиндрических и конических поверхностей определяется его способностью к упругому сжатию и растяжению. С повышением пределов упругих деформаций при растяжении и со снижением модуля упругости при испытании на сжатие способность материала выдерживать изгиб увеличивается (уменьшается критический радиус изгиба материала).

3. Рассмотрение модели поведения материала при изгибе позволяет обосновать три основных способа повышения гибкости волокнистого материала:

- повышение пределов упругих деформаций материала при растяжении;
- изменение соотношения модулей упругости при сжатии и растяжении для материала в сторону уменьшения модуля при сжатии;
- уменьшение толщины материала (замена монолитного мата пакетом тонких слоев).

4. Данная работа должна быть продолжена в следующих направлениях:

– установление взаимосвязи между параметрами микроструктуры волокнистого материала и его макросвойствами;

– установление взаимосвязи между технологическими приемами получения материала и параметрами его микроструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хейг Дж.Р., Линч Дж.Ф. и др. Огнеупоры для космоса. М. Металлургия. 1967. 268 с.
2. Многоцветный орбитальный корабль «Буран» /Под ред. Ю.П. Семенова, Г.Е. Лозино-Лозинского. М.: Машиностроение. 1995. 448 с.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
4. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 3–10.
5. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 05 (viam-works.ru).
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
7. Гращенков Д.В., Балинова Ю.А., Тинякова Е.В. Керамические волокна оксида алюминия и материалы на их основе //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 32–36.
8. Каблов Е.Н., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А., Семенова Е.В. Волокна диоксида циркония для нового поколения материалов авиации и космоса /В сб. материалов XXV юбилейной Международной конф. и выставки «Композиционные материалы в промышленности». Ялта: Мир композитов. 2005. С. 320–323.
9. Щетанов Б.В., Балинова Ю.А., Люлюкина Г.Ю., Соловьева Е.П. Структура и свойства непрерывных поликристаллических волокон $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 13–17.
10. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В. Методы получения монокристаллических волокон оксида алюминия для композиционных материалов /В сб. материалов XXIX еже-

- годной Международной конф. и семинара «Композиционные материалы в промышленности». Ялта. 2009. С. 150–155.
11. Милейко С.Т., Серебряков А.В., Кийко В.М. и др. Монокристаллические волокна муллита, получаемые методом внутренней кристаллизации //Композиты и наноструктуры. 2009. №2. С. 47–60.
 12. Щетанов Б.В., Купцов Р.С., Свистунов В.И. Методы получения монокристаллических волокон оксида алюминия для создания композиционных материалов и высокотемпературной волоконной оптики //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 01 (viam-works.ru).
 13. Балинова Ю.А. Непрерывные поликристаллические волокна оксида алюминия для композиционных материалов: Автореф. дис. к.т.н. М. 2012. 20 с.
 14. Способ получения неорганического волокнистого материала: пат. 2213074 Рос. Федерация; опубл. 27.09.2003.
 15. Производство формованного продукта на основе волокна оксида алюминия: пат. 5319949 Япония; опубл. 03.12.1993.
 16. Janssen R. Reaction Formed Alumina-Alumina FRCMC /Rolf Janssen /In: 7-th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites (HT-CMC 7). Байройт. 2010. С. 398–414.
 17. Zhang Y., Ding Y., Gao J. Mullite fibres prepared by sol–gel method using polyvinyl butyral //J. of the European Ceramic Society. 2009. V. 29. №6. P. 1101–1107.
 18. Тинякова Е.В., Гращенков Д.В. Теплоизоляционный материал на основе муллито-корундовых и кварцевых волокон //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 43–46.
 19. Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г., Зимичев А.М., Тинякова Е.В. Высокотемпературные теплоизоляционные и теплозащитные материалы на основе волокон тугоплавких соединений //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 380–385.
 20. Жданов Г.С. Физика твердого тела. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова. 1961. 504 с.
 21. Посацький С.Л. Опір матеріалів. Львов: Изд-во Львовського ун-та. 1963. 360 с.

REFERENCES LIST

1. Hejg Dzh.R., Linch Dzh.F. i dr. Ogneupory dlja kosmosa [Refractories for space]. М. Metallurgija. 1967. 268 с.

2. Mnogorazovyy orbital'nyj korabl' «Buran» [Reusable orbital ship "Buran"] /Pod red. Ju.P. Semenova, G.E. Lozino-Lozinskogo. M.: Mashinostroenie. 1995. 448 s.
3. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
4. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product "Buran" - innovative solutions forming the sixth technological order] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S2. S. 3–10.
5. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A. Perspektivnye armirujushhie vysokotemperaturnye volokna dlja metallicheskih i keramicheskikh kompozicionnyh materialov [Prospective reinforcing fibers for high temperature ceramic composites and metal materials] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 05 (viam-works.ru).
6. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Solncev S.S. Perspektivnye vysokotemperaturnye keramicheskie kompozicionnye materialy [Promising high-temperature ceramic composite materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 20–24.
7. Grashhenkov D.V., Balinova Ju.A., Tinjakova E.V. Keramicheskie volokna oksida aljuminija i materialy na ih osnove [Ceramic alumina fibers and materials based on them] //Steklo i keramika. 2012. №4. S. 32–36.
8. Kablov E.N., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A., Semenova E.V. Volokna dioksida cirkonija dlja novogo pokolenija materialov aviacii i kosmosa [Zirconium fibers for a new generation of materials Air and Space] /V sb. materialov XXV jubilejnoj Mezhduнародnoj konf. i vystavki «Kompozicionnye materialy v promyshlennosti». Jalta: Mir kompozitov. 2005. S. 320–323.
9. Shhetanov B.V., Balinova Ju.A., Ljuljukina G.Ju., Solov'eva E.P. Struktura i svojstva nepreryvnyh polikristallicheskih volokon α -Al₂O₃ [Structure and properties of continuous fibers of polycrystalline α -Al₂O₃] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 13–17.
10. Kablov E.N., Shhetanov B.V. Metody poluchenija monokristallicheskih volokon oksida aljuminija dlja kompozicionnyh materialov [Methods of obtaining single-crystal aluminum oxide fibers for composite materials] /V sb. materialov XXIX ezhegodnoj

- Mezhdunarodnoj konf. i seminara «Kompozicionnye materialy v promyshlennosti». Jalta. 2009. S. 150–155.
11. Milejko S.T., Serebrjakov A.V., Kijko V.M. i dr. Monokristallicheskie volokna mullita, polu-chaemye metodom vnutrennej kristallizacii [Monocrystalline mullite fiber, obtained by internal crystallization] //Kompozity i nanostruktury. 2009. №2. S. 47–60.
 12. Shhetanov B.V., Kupcov R.S., Svistunov V.I. Metody poluchenija monokristallicheskih volokon oksida aljuminija dlja sozdanija kompozicionnyh materialov i vysokotemperaturnoj volokonnoj optiki [Methods for obtaining polycrystalline alumina fibers to create a high-temperature composite materials and fiber optics] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 01 (viam-works.ru).
 13. Balinova Ju.A. Nepreryvnye polikristallicheskie volokna oksida aljuminija dlja kompozicionnyh materialov [Continuous polycrystalline alumina fibers for composite materials]: Avtoref. dis. k.t.n. M. 2012. 20 s.
 14. Sposob poluchenija neorganicheskogo voloknistogo materiala [A method of producing an inorganic fiber material]: pat. 2213074 Ros. Federacija; opubl. 27.09.2003.
 15. Proizvodstvo formovannogo produkta na osnove volokna oksida aljuminija [Production of a molded product based on alumina fibers]: pat. 5319949 Japonija; opubl. 03.12.1993.
 16. Janssen R. Reaction Formed Alumina-Alumina FRCMC /Rolf Janssen /In: 7-th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites (HT-CMC 7). Bayreuth. 2010. C. 398–414.
 17. Zhang Y., Ding Y., Gao J. Mullite fibres prepared by sol–gel method using polyvinyl butyral //J. of the European Ceramic Society. 2009. V. 29. №6. P. 1101–1107.
 18. Tinjakova E.V., Grashhenkov D.V. Teploizoljacionnyj material na osnove mullitokorundovyh i kvarcevyh volokon [Thermal insulation material on the basis of mullite-corundum and quartz fibers] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 43–46.
 19. Ivahnenko Ju.A., Babashov V.G., Zimichev A.M., Tinjakova E.V. Vysokotemperaturnye teploizoljacionnye i teplozashhitnye materialy na osnove volokon tugoplavkih soedinenij [High-temperature insulating and heat-proof materials for fiber-based refractory compounds] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 380–385.
 20. Zhdanov G.S. Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]. M.: Izd-vo MGU im. M.V. Lomonosova. 1961. 504 s.
 21. Posac'kij S.L. Opir materialiv [Resistance of materials]. L'vov: Izd-vo L'vovskogo un-ta. 1963. 360 s.