

УДК 66.045.3:678.6

А.В. Зувев¹, Ю.П. Заричняк², М.Г. Размахов¹**ПРЕДПОСЫЛКИ К ВЫБОРУ МОДЕЛИ СТРУКТУРЫ
ВЫСОКОПОРИСТЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
И РАСЧЕТА ТЕПЛОПЕРЕНОСА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-109-118

Рассматриваются предпосылки для построения модели структуры высокопористого волокнистого материала, применяемого в качестве основного компонента тепловой защиты, в том числе и на внешней поверхности высокоскоростных летательных аппаратов. Показана возможность учета влияния технологических параметров (с применением модели структуры) на теплопроводность на примере формования полуфабриката высокопористого волокнистого материала с нефиксированными контактами.

Ключевые слова: высокопористые волокнистые материалы, модель структуры, теплопроводность, расчет.

A. V. Zuev¹, Yu. P. Zarichnyak², M. G. Razmahov¹**PREREQUISITES FOR THE SELECTION OF THE STRUCTURE MODEL
OF HIGHLY POROUS FIBROUS MATERIALS TO TAKE INTO ACCOUNT
THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS
AND THE CALCULATION OF HEAT TRANSFER**

The prerequisites for selecting and constructing a model of the structure of a highly porous fibrous material used as the main component of thermal protection, including on the outer surface of high-speed aircraft, are considered. The possibility is shown through the model of the structure of taking into account the influence of technological parameters on thermal conductivity by the example of forming a semi-finished product of highly porous fibrous material with unfixed contacts.

Keywords: highly porous fibrous materials, structure model, thermal conductivity, calculation.

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

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» [Federal state Autonomous Education Institution of Higher Education «ITMO University»]; e-mail: abit@cde.ifmo.ru

Введение

С использованием теории обобщенной проводимости, разработанной в основном в работах [1, 2], проведены расчеты теплопроводности, подробно изложенные в статьях [3–5], для варианта материала на основе волокон из аморфного оксида кремния. Этот материал стал основным компонентом внешней тепловой защиты воздушно-космических аппаратов Space Shuttle, «Бор» и «Буран» [6–14].

Появление и распространение высокопористых материалов, работающих в широком диапазоне температур, привело к развитию представлений об особенностях комбинированного теплопереноса в таких средах, теоретическому и экспериментальному изучению теплофизических и оптических свойств, определению влияния на них характеристик

структуры композиционных материалов, что нашло отражение, например, в работах [15–20]. Основной эксплуатационной характеристикой теплоизоляционных материалов, в том числе и на основе волокон из оксида кремния, является теплопроводность. Для этого класса материалов характерна теплопроводность при температуре 20°C и нормальном атмосферном давлении – от 0,04 Вт/(м·К), при плотности 0,14 г/см³, что делает их весьма привлекательными для подвижных транспортных средств и в первую очередь для летательных аппаратов. Известно, что материалы этого класса использовались в качестве основного компонента внешней тепловой защиты во всех летательных аппаратах Space Shuttle (материалы марок Li-900 и Li-2200) и «Буран» (материалы марок ТЗМК-10 и ТЗМК-25) – см. таблицу. В СССР конструкция внешней тепловой защиты отрабатывалась на предшественнике орбитального корабля «Буран» – аппарате «Бор-4», под руководством Главного конструктора Г.Е. Лозино-Лозинского. Высокопористый волокнистый материал использовался в виде отформованной плитки с покрытием, которое защищает ее от аэродинамического воздействия в полете и обеспечивает требуемые оптические характеристики [20–22]. В последнее время основные конструктивные решения, использованные в аппаратах серии «Бор», включая общую компоновку летательного аппарата, рассматриваются как перспективные.

Свойства теплоизоляционных материалов [7, 8]

Свойства	Значения свойств для теплоизоляционного материала			
	ТЗМК-10	Li-900 (США)	ТЗМК-25	Li-2200 (США)
Плотность, г/см ³	0,15	0,144	0,25	0,35
Рабочая температура, °С	До 1250	До 1260	До 1250	До 1260
Теплопроводность, Вт/(м·К) (P=0,1 МПа, температура 20°C)	0,05	0,05	0,06	0,06

Интервал рабочих температур материалов на основе волокон из оксида кремния – от -150°C (на неосвещенной солнцем поверхности аппарата на орбите и в качестве теплоизоляции топливных баков) до +1250°C при спуске в плотных слоях атмосферы. Для вариантов теплоизоляции на волокнах из более тугоплавких оксидов, карбидов и нитридов (Al₂O₃, ZrO₂, SiC, Si₃N₄) рабочие температуры могут возрастать до 1500–1700°C и более. С ростом рабочей температуры все более востребованным становится исследование оптических свойств теплоизоляционных материалов, которые все в большей степени определяют теплоперенос [3, 8, 23, 24]. Коэффициент ослабления излучения, проходящего через полупрозрачную высокопористую волокнистую среду, может быть оценен с использованием теории Ми.

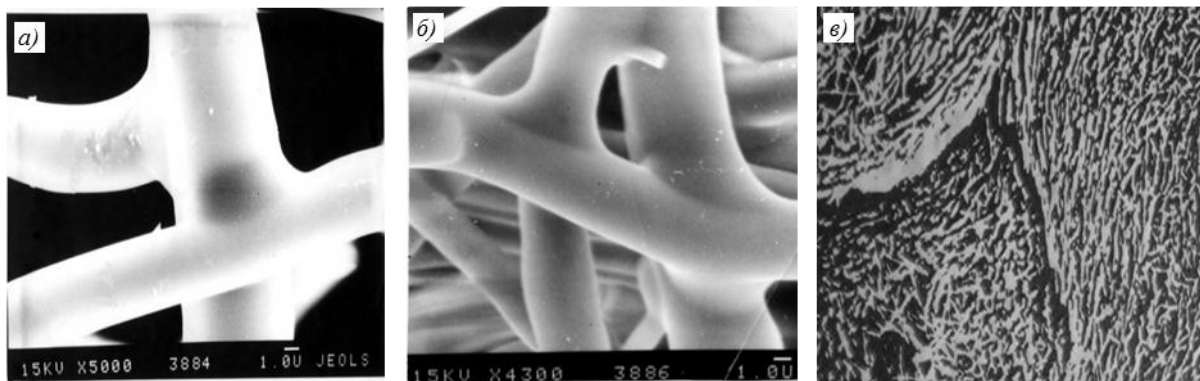


Рис. 1. Структура высокопористого волокнистого материала марки ТЗМК-10: а, б – места контакта волокон [5]; в – глобулы [25]

Структура высокопористых волокнистых материалов марок ТЗМК-10 и ТЗМК-25 (рис. 1) представляет собой совокупность волокон из аморфного оксида кремния со средним диаметром ~ 2 мкм и различаются между собой только плотностью (см. таблицу). В ряде случаев возможно образование внутри материала комков волокон по форме, близких к шарам диаметром ~ 1 мм, – глобул [25]. Жесткость контактов между волокнами обеспечивается за счет связующего, состоящего из оксида кремния. Вследствие формования полуфабриката на стадии изготовления плитки из волокнистого материала возникает преимущественная ориентация волокон.

Материалы и методы

Для решения задачи о влиянии характеристик отдельных элементов структуры на теплопроводность и построения модели структуры материала наиболее эффективно использовать теорию обобщенной проводимости. Такой подход позволяет, выбрав модель структуры композиционного материала, рассчитать ее результирующую, эффективную теплопроводность, т. е. свойство, измеряемое в эксперименте, как функцию характеристик структуры. В данном случае теплопроводность может быть определена в зависимости от плотности теплоизоляционного материала и свойств материала волокна, диаметра волокна, его ориентации в пространстве, характеристик газовой среды. Влиянием контактов волокон на теплоперенос в жестких волокнистых материалах можно пренебречь, так как значения теплопроводности материалов контакта и волокон совпадают, границы между волокном и контактом отсутствуют, уменьшение поперечного сечения по сравнению с волокном в контакте отсутствует (рис. 1). Используя модели, которые описывают формирование структуры в зависимости от параметров технологических процессов, можно представить ряд характеристик структуры, а следовательно, и теплопроводность в зависимости от этих параметров.

Предварительно следует сформулировать некоторые основные понятия. *Элементарная ячейка* структуры – это конструкция, отражающая особенности структуры, которая при многократном повторении во все стороны позволяет получить структуру исследуемого композиционного материала. Определение основных понятий и алгоритм построения моделей структуры приведены в работах [1, 2].

Представительный элемент структуры – это минимально возможный объем из набора элементарных ячеек, который обладает свойствами всего материала, при условии, что в представительном элементе, как и в ячейке, соблюдены свойства и средние для материала объемные доли компонентов. Введение такого понятия, как представительный элемент структуры, для рассматриваемых материалов вполне оправдан, поскольку некоторое число волокон, ничем не обусловленное, не обладает характеристиками материала. Рассматриваемый класс материалов вследствие малой плотности представляет собой среду, которая полупрозрачна для теплового излучения. По этой причине представительный элемент структуры, как минимально возможный объем, будет прозрачен, в то время как объем волокнистого материала при толщинах, превышающих оптическую толщину при выбранной температуре, будет средой непрозрачной.

Рассмотрим несколько известных решений по построению модели структуры или ее отдельных элементов, не претендуя на полноту обзора многочисленных моделей, появление которых определяется популярностью высокопористых волокнистых материалов в качестве высокоэффективной теплоизоляции.

В работах [1, 2, 26, 27] в качестве модели элементарной ячейки структуры высокопористого волокнистого материала используют три взаимно перпендикулярных бруса, сходящихся в одной точке. Вероятно, это одна из самых ранних моделей. Замена волокна, имеющего круглое поперечное сечение, на брус с квадратным поперечным

сечением значительно упрощает расчет. Такую же модель ячейки используют в работе [28]. В работе [27] рассматриваются разные виды контакта. В статьях [3, 17] принимают, что поперечное сечение волокна пропорционально доли волокон, ориентированных в этом же направлении. Авторы этих работ не делают явных различий между элементарной ячейкой и представительным элементом структуры, хотя использование понятия представительного элемента структуры достаточно важно. Как отмечалось ранее, для рассматриваемых материалов возможно образование комков волокон – глобул. Если объем глобулы больше объема представительного элемента структуры, то о ее свойствах можно судить как о свойствах материала соответствующей плотности. Если нет, то они должны быть определены отдельно. Для рассматриваемого материала глобула больше представительного элемента. Это позволяет сохранить известный подход к построению модели структуры композиционного материала. В данном случае структура может быть представлена моделью зернистого материала, где все зерна обладают одинаковыми свойствами. В более общем случае при описании структуры многокомпонентных композиционных материалов приходится разбивать структуру на подструктуры и для каждой из них формулировать модель.

К недостаткам ячейки из трех взаимно перпендикулярных волокон можно отнести то, что все три волокна пересекаются в одной точке, т. е. в одном контакте (рис. 2), а это не соответствует высокой пористости материала. Увеличение расстояния между контактами в большей степени соответствует приближениям, принимаемым при расчете радиационного теплопереноса, при учете влияния технологических факторов и расчете модуля упругости для системы, повторяющей элементарную ячейку (рис. 3, а), из стержней круглого сечения. В работе [27] для учета высокой пористости предложена ячейка, в которой места контактов волокон, пересекающих данные места в разных направлениях, разнесены, а в одном направлении либо совмещены, либо одно из волокон вообще не касается других. Такую модель ячейки сложно использовать для расчета влияния технологических факторов. Однако одновременно с учетом того, что вероятность пересечения трех волокон в одном месте контакта мала, появляется другая проблема. Ячейка, представленная на рис. 3, а, очевидно, обладает анизотропией свойств [4, 5]. Увеличение одного размера в 2 раза по сравнению с другими обусловлено равновероятным расстоянием одного волокна от двух других – это свойство модели ячейки структуры, а сам материал может быть изотропным. Это несоответствие устраняется введением понятия представительного элемента структуры высокопористого волокнистого материала, который изначально изотропен, а анизотропия возникает только вследствие тех или иных факторов – например, формования полуфабриката с неотвержденными контактами волокон. Эта анизотропия может быть рассчитана и определена как функция параметров технологического процесса [5].

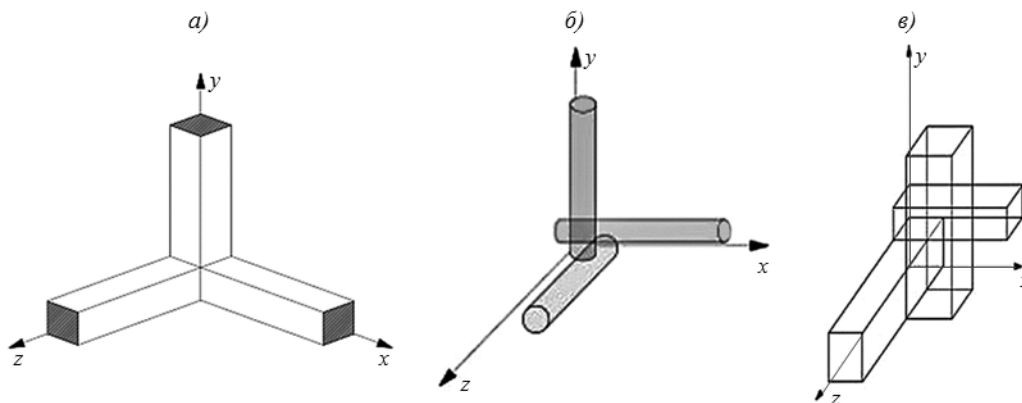


Рис. 2. Варианты ячеек структуры высокопористых волокнистых материалов

Задачу о выборе представительного элемента структуры авторы статьи [5] решали из чисто геометрических соображений. Раз элементарная ячейка получается анизотропной, то выбирается такая конструкция из анизотропных ячеек, которая будет изотропной. Решение такой задачи – куб с одинаковым набором ячеек всех ориентаций и при этом обладающий изотропией свойств (рис. 3, б). Поскольку соединение таких ячеек друг с другом в общем случае невозможно без разрыва волокна, то сторона такого куба выбрана равной тройной средней длине волокна. В результате при средней длине волокна 100–200 мкм длина ребра куба (представительного элемента) составит 300–600 мкм, что меньше размеров глобулы. Это позволяет определять свойства глобулы как свойства волокнистого материала соответствующей плотности.

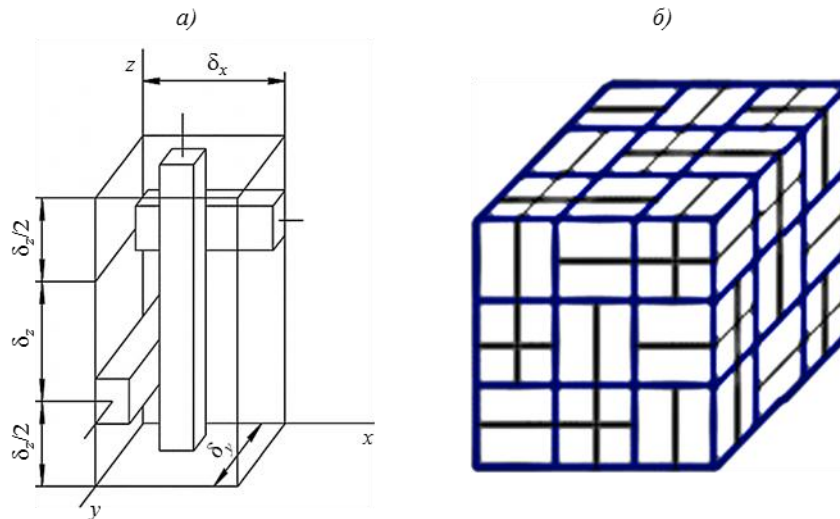


Рис. 3. Модель структуры высокопористого волокнистого материала [5]:
 а – элементарная ячейка – вариант с одинаковым расстоянием между волокнами $\delta_x = \delta_y = \delta_z$;
 б – представительный элемент структуры – сторона куба $b\delta_i$

Рассмотрим влияние процесса формования на изменение структуры. При формовании полуфабриката пульпа из волокон с неотвержденным связующим загружается в форму. Рассмотрим вариант, когда часть волокон объединена в глобулы, имеющие плотность больше, чем масса волокон вне глобул. Представим структуру пульпы в виде зернистого материала, где зерна, имеющие форму шара, – глобулы. При формовании менее плотная волокнистая масса, не вошедшая в глобулы, оказывается между ними и условно отнесена к порам зернистой системы.

Работа на сжатие пульпы может быть представлена в виде суммы работ на сжатие глобулы с оболочкой, переупаковку глобул, их уплотнение и трение волокнистой массы о стенки формы. Последнее слагаемое связано с давлением при формовании через коэффициент Пуассона пульпы (μ_p). Давление на боковую стенку $P_{ст}$ связано с давлением сжатия пульпы P :

$$P_{ст} = \frac{\mu_p}{1 + \mu_p} \cdot P.$$

Для жесткого материала с фиксированными местами контактов $\mu \approx 0,05$. Очевидно, что для пульпы значение коэффициента еще меньше, поэтому этим слагаемым пренебрегаем. Переупаковкой глобул также можно пренебречь, поскольку они мягкие и их скольжение относительно друг друга несущественно.

При расчете деформации глобулы радиусом r_Γ выражение для внутренних напряжений в частице под действием давления P имеет вид [29, 30]:

$$\sigma_s = \frac{1}{G} \cdot P \cdot \rho_{\text{п}} \cdot g \cdot h(1-\xi), \quad \xi = \frac{\Delta r_\Gamma}{r_\Gamma},$$

где h , G – высота и вес слоя пульпы, отнесенный к единице площади; $\rho_{\text{п}}$ – плотность пульпы; g – ускорение свободного падения; ξ – относительная деформация глобулы радиусом r_Γ .

Условие прекращения деформации глобулы можно оценить из равенства внутренних напряжений σ_s [29, 30] при сжатии по пятну контакта двух глобул радиусом r каждая и силы (F) поверхностного натяжения связующего $\sigma_{\text{п.н}}$ при деформации места контакта с периметром L_k , которую в первом приближении представим в виде

$$F = \frac{1}{V_\Gamma} \cdot \sigma_{\text{п.н}} \cdot L_k \cdot N_k,$$

тогда

$$\int_0^{r_\Gamma} \frac{\sigma_s}{r} \cdot 4\pi r^2 \cdot dr = \frac{1}{V_\Gamma} \cdot \sigma_{\text{п.н}} \cdot L_k \cdot N_k,$$

$$V_\Gamma = \frac{4}{3} \cdot \pi r_\Gamma^3, \quad N_k = V_\Gamma / \delta^3,$$

где V_Γ – объем глобулы; N_k – число контактов волокон в глобуле; принимаем, что периметр контакта $L_k = 4d_b$; δ – среднее расстояние между волокнами, которое можно определить через объемные концентрации компонентов [1],

$$\delta = d_b \left[\pi/2 \cdot (1 + \nu_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{св}} / \rho_{\text{в}}) \rho_{\text{в}} / \rho_{\text{м}} \right]^{1/2},$$

где d_b – средний диаметр волокна; $\nu_{\text{св}}$ – объемная доля связующего; $\rho_{\text{св}}$, $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{м}}$ – соответственно плотность связующего, волокна и волокнистого материала (примем $\rho_{\text{св}} = \rho_{\text{в}}$).

С учетом принятых приближений можно определить связь относительной деформации при формовании плитки и силы поверхностного натяжения связующего или, вводя вес волокнистой пульпы $G(h)$, который добавляется к давлению формования, получить степень сжатия по толщине и степень анизотропии волокон по толщине плитки:

$$\xi = 1 - \frac{8}{3} \cdot \frac{\sigma_{\text{п.н}} \cdot G}{P \cdot h} \cdot \frac{d_b \cdot r_\Gamma}{\rho_{\text{п}} \cdot g \cdot \delta^3}.$$

Из анализа полученного выражения следует, что с уменьшением силы поверхностного натяжения и ростом давления формования значение $\xi \rightarrow 1$, т. е. глобула будет раздавлена.

В результате формования образуется преимущественная ориентация волокон. Примем, что доля волокон в направлении i – N_{Bi} , пропорциональна диаметру глобулы в этом направлении. При условии сжатия ячейки в направлении, например, z и с учетом, что

$$N_{\text{Bx}} + N_{\text{By}} + N_{\text{Bz}} = 1, \quad N_{\text{Bx}} = N_{\text{By}},$$

получим

$$2N_{\text{Bx}} + N_{\text{Bz}} = N_{\text{Bx}} \left(2 + \frac{r_{gz}}{r_{gx}} \right) \quad \text{и} \quad N_{\text{Bx}} = N_{\text{By}} = (3 - \xi_z)^{-1}, \quad N_{\text{Bz}} = (1 - \xi_z) / (3 - \xi_z).$$

По определению

$$N_{\text{Bx}} = N_{\text{By}} = \frac{\delta_x}{\delta_x + \delta_y + 2\delta_z} = \frac{\delta_y}{\delta_x + \delta_y + 2\delta_z}, \quad N_{\text{Bz}} = \frac{2\delta_z}{\delta_x + \delta_y + 2\delta_z}.$$

Окончательно получаем для случая сжатия ячейки вдоль оси z после формования:

$$\delta_z = \delta_x(1 - \xi_z),$$

$$\delta_x = \delta_y = \delta \sqrt{\frac{2 - \xi_z}{2(1 - \xi_z)}}.$$

При сжатии по оси x :

$$\delta_x = \delta/2 \sqrt{\frac{4 - \xi_x}{1 - \xi_x}},$$

$$\delta_z = \delta_y = \delta/2 \cdot [(4 - \xi_x)(1 - \xi_x)]^{1/2}.$$

Аналогично – при сжатии по оси y . Оси выбраны как показано на рис. 3, *a*.

Расчет теплопроводности высокопористых волокнистых материалов с использованием расстояний между волокнами, образовавшимися в результате формования полуфабриката, приведен в работе [5].

Результаты и обсуждение

Результаты расчета эффективной теплопроводности с использованием модели структуры, представленной на рис. 3, совпадают с результатами измерений для материалов на волокнах SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, SiC и Si_3N_4 с плотностью от 100 до 300 кг/м^3 в диапазоне температур от 20 до 1700°C в вакууме и среде аргона при давлениях от 10^{-2} до 10^5 Па в пределах погрешности эксперимента [4]. Относительная погрешность измерения теплопроводности оценена в $\pm(15-20)\%$.

На рис. 4 приведены результаты измерения и расчета теплопроводности с учетом влияния на структуру сжатия при формовании материала марки ТЗМК-1700 на основе волокон из $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$.

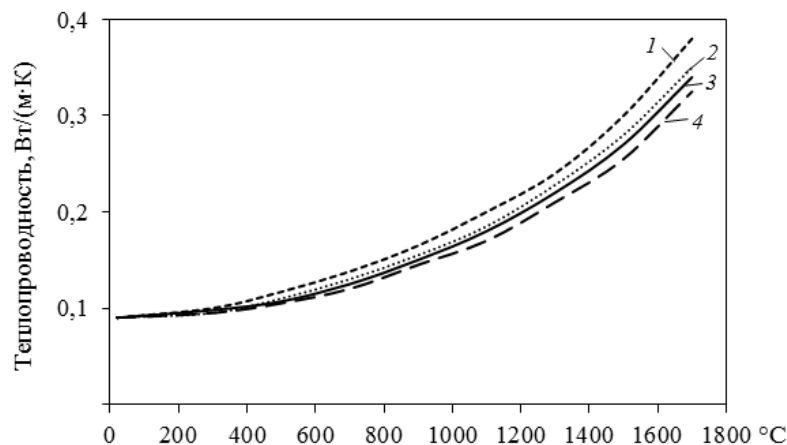


Рис. 4. Температурная зависимость теплопроводности материала на основе волокон $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ с плотностью 260–280 кг/м^3 (газ – аргон при давлении 10^5 Па):

1, 3 – эксперимент; 2, 4 – расчет; 1, 2 – теплопроводность в направлении формования; 3, 4 – теплопроводность в направлении, перпендикулярном действию давления при формовании

Результаты расчета меньше измеренных значений теплопроводности высокопористого материала на основе волокон $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ анизотропной структуры и эти отличия не превышают погрешности измерений.

Результаты расчета теплопроводности по ряду других моделей структуры также совпадают с результатами измерений в пределах погрешности эксперимента. Очевидно, что при расчете с использованием модели структуры определяющим фактором является корректное решение тепловой задачи. Как отмечалось, влияние выбранной модели проявится при расчете зависимости теплопроводности от параметров структуры – например, при учете формования или других параметров технологического процесса, при расчете модуля упругости.

Заключения

Рассмотрен ряд обстоятельств, определяющих построение модели структуры высокопористого волокнистого материала.

На примере этапа технологического процесса формования показана возможность учета влияния параметров технологического процесса через характеристики возникающей анизотропии структуры на основное эксплуатационное свойство теплоизоляционного материала – теплопроводность.

На примере материала марки ТЗМК-1700 на основе волокон из $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ с плотностью 260–280 кг/м³ показано, что результаты измерений теплопроводности высокопористого волокнистого материала в различных направлениях учитывают возникшую в результате формования анизотропию. Значения теплопроводности в двух направлениях различаются не более чем на 15% при относительной погрешности измерений в пределах $\pm(15-20)\%$ [4].

Показано, что результаты расчета для обоих направлений согласуются с результатами соответствующих измерений и показывают несколько заниженные значения по сравнению с измеренными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
2. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 248 с.
3. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Математическое моделирование высокопористых волокнистых материалов и определение их физических свойств // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. №3. С. 463–472.
4. Зуев А.В., Просунцов П.В., Майорова И.А. Расчетно-экспериментальное исследование процессов теплопереноса в высокопористых волокнистых теплоизоляционных материалах // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. №9. С. 410–419.
5. Зуев А.В., Просунцов П.В. Модель структуры волокнистых теплоизоляционных материалов для анализа процессов комбинированного теплопереноса // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. №6. С. 1319–1330.
6. Лукашевич В.П., Афанасьев И.Б. Космические крылья. М.: Лента странствий, 2009. 496 с.
7. Семенов Ю.П., Лозино-Лозинский Г.Е., Лапыгин В.Л. и др. Многоцветный орбитальный корабль «Буран». М.: Машиностроение, 1995. 468 с.
8. Мордовин С.Г., Давыдов И.З., Куликов В.И., Гофин М.Я. Теплозащитная конструкция многоцветного орбитального корабля // Тр. Первой междунар. авиакосмической конф. «Человек–Земля–Космос» (Москва, 28 сентября–2 октября, 1992). М., 1995. Т. 5: Материалы и технология производства авиакосмических систем. С. 315–327.
9. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий и их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

10. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
11. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. №3. С. 97–105.
12. Майорова И.А. Математическое моделирование процесса теплопереноса и оптимизация конструкции многослойного теплозащитного покрытия // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 16–18.
13. Ивахненко Ю.А., Баруздин Б.В., Варрик Н.М., Максимов В.Г. Высокотемпературные волокнистые уплотнительные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №5. С. 272–289. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-272-289.
14. Истомина А.В., Кольшев С.Г. Электростатический метод формования ультратонких волокон тугоплавких оксидов // Авиационные материалы и технологии. 2019. №2 (55). С. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-40-46.
15. Костылев В.М. Макроскопическая кинетика фотонного газа. Радиационный теплообмен в дисперсных средах. М.: Машиностроение, 2000. 240 с.
16. Alifanov O.M., Bojkov N.A. Les Methodes des Previsions In Formatiquers des Materaux Composities de Haute Porosite et de L'analyse des Systems de la Protection Thermique a leur Basc // Proceedings of Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing (Noordwijk, Netherlands, March 27–29, 1996). Noordwijk, 1996. P. 73.
17. Баринов Д.Я., Оспенникова О.Г., Мараховский П.С., Зуев А.В. Изучение динамики прогрета деструктирующего теплозащитного материала методом математического моделирования температурных полей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №8 (80). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-109-118.
18. Дождиков В.С., Петров В.А., Степанов С.В. Излучательная способность и коэффициенты затухания и поглощения волокнистой кварцевой теплоизоляции // Научные труды ИТЭС ОИВТ РАН. 2006. Вып. 7-2004. С. 65–70.
19. Просунцов П.В., Майорова И.А., Зуев А.В. Использование моделей комбинированного теплопереноса для анализа температурного состояния элементов тепловой защиты многоразовых космических аппаратов // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. №7. С. 317–323.
20. Шалин Р.Е., Солнцев С.С., Берсенев А.Ю. Исследование свойств покрытий плиточной теплозащиты для воздушно-космического летательного аппарата // Тр. Первой междунар. авиакосмической конф. «Человек–Земля–Космос» (Москва, 28 сентября–2 октября, 1992). М., 1995. Т. 5: Материалы и технология производства авиакосмических систем. С. 240–249.
21. Берсенев А.Ю., Ряховская З.И., Семенов Е.В., Солнцев С.С., Тюрин В.М. Высокоэффективные эрозионностойкие покрытия для теплозащитных материалов авиационно-космической техники // Тр. Первой междунар. авиакосмической конф. «Человек–Земля–Космос» (Москва, 28 сентября–2 октября, 1992). М., 1995. Т. 5: Материалы и технология производства авиакосмических систем. С. 235–240.
22. Дождиков В.С., Петров В.А. Излучательные характеристики теплозащитных материалов орбитального корабля «Буран» // Инженерно-физический журнал. 2000. Т. 73. №1. С. 26–30.
23. Просунцов П.В., Резник С.В. Исследование объемных оптических свойств частично прозрачных рассеивающих материалов на основе решения обратной задачи переноса излучения // Идентификация динамических систем и обратные задачи: материалы 2-й Междунар. конф. СПб., 1994. Т. 2. С. Д–12–1–9.
24. Петров В.А. Модель диффузии излучения для радиационно-кондуктивного теплопереноса в высокотемпературных полупрозрачных рассеивающих теплоизоляционных материалах. М.: Моск. гос. техн. ун-т радиотехники, электроники и автоматики, 2012. 140 с.
25. Грибков В.Н., Мизюрина Г.Т., Щетанов Б.В., Ляпин В.В. Возможности волокнистой тепловой защиты // Тр. Первой междунар. авиакосмической конф. «Человек–Земля–Космос» (Москва, 28 сентября–2 октября, 1992). М., 1995. Т. 5: Материалы и технология производства авиакосмических систем. С. 223–231.

26. Литовский Е.Я., Бондаренко С.Л., Полонский Ю.А., Ганичев Н.И. О влиянии диаметра волокна на эффективную теплопроводность // Теплофизика высоких температур. 1979. Т. 17. №5. С. 997–1000.
27. Кац С.М. Высокотемпературные теплоизоляционные материалы. М.: Metallurgy, 1981. 232 с.
28. Алифанов О.М., Будник С.А., Ненарокомов А.В., Черепанов В.В. Экспериментально-теоретическое исследование процессов теплообмена в высокопористых материалах // Тепловые процессы в технике. 2011. Т. 3. №2. С. 53–65.
29. Воларович М.П., Демкин Н.В., Беркович И.И. Экспериментальное исследование трения и уплотнения волокнистых материалов // Проблемы физико-химической механики волокнистых и пористых дисперсных структур и материалов. Рига: Зинатне, 1967. 620 с.
30. Жданович Г.М. Некоторые вопросы теории процесса прессования металлических порошков. Минск: Изд-во Белорус. политех. ин-та, 1960. 98 с.