

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ
ДВУМЕРНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ**В. П. Ходунков^{1*}, Ю. П. Заричняк²¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург, Россия***walkerearth@mail.ru*² *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Рассматривается метод моделирования двухкомпонентного композиционного материала для описания анизотропии теплопроводности его двумерно-ориентированной структуры. Метод заключается в моделировании структуры исследуемого композита и последующем расчете его теплопроводности с помощью расчетных соотношений, которые основаны на общеизвестной электротепловой аналогии. В рассматриваемом методе структура реального композита моделируется элементарной ячейкой, представляющей собой куб с гранями единичной длины. Представлена итоговая система расчетных уравнений двумерно-ориентированной теплопроводности, приведен пример и дана оценка ожидаемой точности предсказания теплопроводности.

Ключевые слова: моделирование, структура, анизотропия, теплопроводность, электротепловая аналогия, двухкомпонентный композит

Ссылка для цитирования: Ходунков В. П., Заричняк Ю. П. Моделирование и расчет двумерно-ориентированной теплопроводности гетерогенных композиций // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 9. С. 771—780. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-771-780.

**MODELING AND CALCULATION OF TWO-DIMENSIONALLY ORIENTED THERMAL CONDUCTIVITY
OF HETEROGENEOUS COMPOSITIONS**V. P. Khodunkov^{1*}, Yu. P. Zarichnyak²¹ *D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia*
*walkerearth@mail.ru*² *ITMO University, St. Petersburg, Russia*

Abstract. A method for modeling a two-component composite material is considered to describe the anisotropy of thermal conductivity of its two-dimensionally oriented structure. The method consists of modeling the structure of the composite under study and subsequent calculation of its thermal conductivity using design relationships that are based on the well-known electrothermal analogy. In the method under consideration, the structure of a real composite is modeled by an elementary cell, which is a cube with edges of unit length. The final system of equations for calculating two-dimensionally oriented thermal conductivity is presented, an example is given, and an estimate of the expected accuracy of thermal conductivity prediction is given.

Keywords: modeling, structure, thermal conductivity, anisotropy, electrothermal analogy, two-component composite

For citation: Khodunkov V. P., Zarichnyak Yu. P. Modeling and calculation of two-dimensionally oriented thermal conductivity of heterogeneous compositions. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 9. P. 771—780 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-771-780.

Введение. На современном уровне развития науки и техники в ряду перспективных направлений немаловажное практическое значение приобрели технологии создания новых композиционных материалов с заранее заданными свойствами. Такие материалы широко

востребованы в ракетно-космической отрасли, авиа- и судостроении, строительстве и других отраслях промышленности и народного хозяйства.

Одним из важных физических параметров, характеризующих физико-химические свойства таких материалов, является их теплопроводность. И, что особенно актуально, пространственно-ориентированная теплопроводность, которая присуща анизотропным многокомпонентным композиционным материалам.

Анализ известных методов моделирования и расчета теплопроводности композиционных материалов показал, что в отношении пространственно-ориентированной теплопроводности существует довольно большое разнообразие методов расчета [1—15]. В развитие накопленного опыта в настоящей статье представлен метод, базирующийся на ранее разработанных методах и более ориентированный на его практическую реализуемость. Данное исследование является продолжением цикла работ, опубликованных авторами ранее [13—21].

Цель исследования — показать возможность прогнозирования значений двумерно-ориентированной теплопроводности на этапе создания анизотропных гетерогенных композиционных материалов.

Объект исследования — гетерогенный двухкомпонентный композиционный материал (далее — композит), который характеризуется существенной анизотропией теплопроводности в направлениях X , Y и, одновременно, одинаковой теплопроводностью в направлениях Y , Z (рис. 1). В данном случае рассматривается двухкомпонентный композит с матрицей, армированной однонаправленными волокнами, поскольку именно так возможно создать двунаправленную теплопроводную структуру.

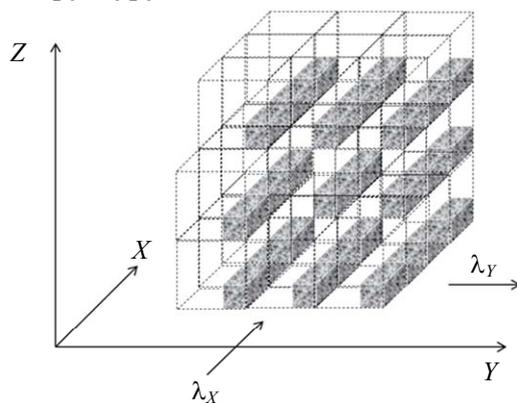


Рис. 1

Теория метода. Суть предложенного подхода сводится к моделированию структуры исследуемого композита и последующему расчету его теплопроводности с помощью полученных авторами настоящей статьи расчетных соотношений, которые основаны на общеизвестной электротепловой аналогии.

В ходе реализации рассматриваемого метода структура реального композита моделируется кубической элементарной ячейкой (рис. 2). При выборе вида элементарной ячейки авторы руководствовались следующими принципами:

- элементарная ячейка должна быть трехмерной;
- симметрия элементарной ячейки должна соответствовать симметрии реального композита;
- элементарная ячейка должна иметь максимальное число равных ребер и равных углов;
- элементарная ячейка должна иметь минимальный объем;
- структура элементарной ячейки должна наилучшим образом моделировать (воспроизводить) структуру реального композита и при этом обеспечивать строгое описание ее теплопроводности с позиций электротепловой аналогии.

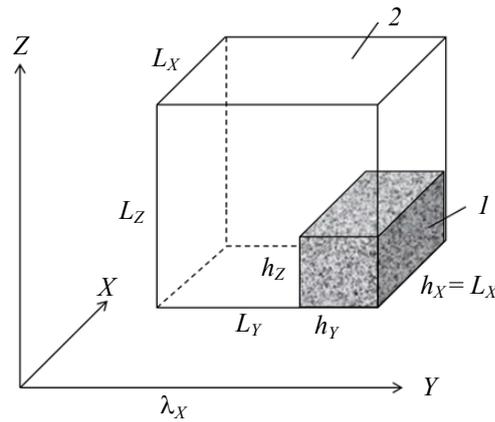


Рис. 2

Элементарная ячейка в форме куба при ее многократном повторении в пространстве в максимальной степени воссоздает структуру предлагаемого композита и удовлетворяет указанным выше принципам.

Компоненты 1 и 2 (см. рис. 2), образующие элементарную ячейку, обладают различными теплопроводностями, при этом компонентом 1 моделируются армирующие волокна, а компонентом 2 моделируется матрица.

Для прогнозирования теплопроводности λ_x композита в направлении X (вдоль армирующего компонента) необходимо рассчитать тепловое сопротивление R_x указанной элементарной ячейки в направлении X (рис. 3), а для предсказания теплопроводности λ_y создаваемого композита в направлении Y (поперек стержней) необходимо рассчитать тепловое сопротивление R_y указанной элементарной ячейки в направлении Y (рис. 4).

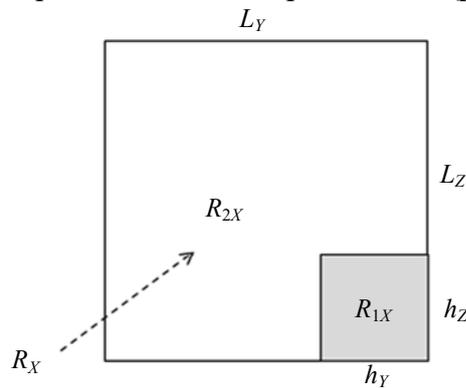


Рис. 3

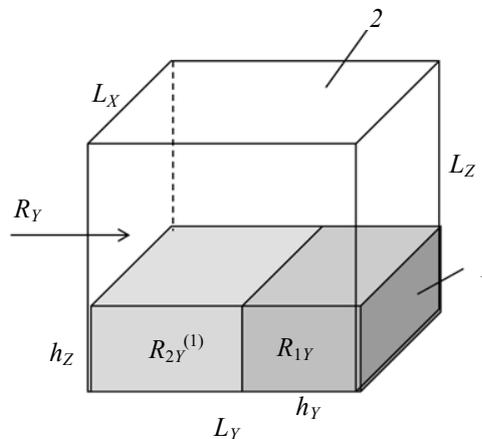


Рис. 4

Согласно общепринятому подходу [6], тепловое сопротивление R_x элементарной ячейки в направлении X рассчитывается по соотношению

$$R_X = \frac{L_X}{\lambda_X L_Y L_Z}, \quad (1)$$

где $L_X=L_Y=L_Z=1$ — габаритные размеры куба элементарной ячейки по соответствующим осям (см. рис. 2) причем, $L_Y=L_Z$ — есть не что иное, как расстояние между смежными стержнями в структуре композита; λ_X — искомая теплопроводность композита в направлении X , согласно (1) равная

$$\lambda_X = \frac{L_X}{R_X L_Y L_Z}. \quad (2)$$

Тепловой поток, проходящий через элементарную ячейку композита в направлении X , разделяется на два параллельных тепловых потока: один поток проходит через компонент 1, другой тепловой поток проходит через компонент 2 (см. рис. 3). Иными словами, следуя электротепловой аналогии, тепловой поток распределяется в двух параллельно-подключенных участках тепловой цепи (рис. 5, R_X), поэтому итоговое тепловое сопротивление R_X элементарной ячейки определяется аналогично случаю параллельно-подключенных электрических сопротивлений, т.е. через величины, обратно-пропорциональные тепловым сопротивлениям каждого участка:

$$\frac{1}{R_X} = \frac{1}{R_{1X}} + \frac{1}{R_{2X}}, \quad (3)$$

где R_{1X} — тепловое сопротивление компонента 1 в направлении X , R_{2X} — тепловое сопротивление компонента 2 в направлении X .

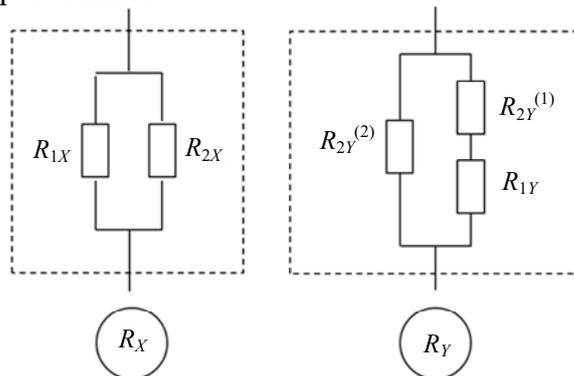


Рис. 5

Согласно определению, соответствующие тепловые сопротивления компонентов 1 и 2 равны

$$R_{1X} = \frac{L_X}{\lambda_1 h_Z h_Y} = \frac{L_X}{\lambda_1 \varphi L_Y L_Z}; \quad R_{2X} = \frac{L_X}{\lambda_2 (L_Y L_Z - h_Z h_Y)} = \frac{L_X}{\lambda_2 L_Y L_Z (1 - \varphi)}, \quad (4)$$

где h_Y, h_Z — габаритные размеры компонента 1 в направлениях Y, Z соответственно, причем $h_Y=h_Z=h_X$; λ_1, λ_2 — теплопроводность материала компонентов 1 и 2 соответственно; $\varphi=h_Z h_Y / (L_Y L_Z)$ — отношение поперечных сечений компонента 1 и элементарной ячейки в плоскости $Y-Z$, т.е., фактически, — объемная доля стержней в элементарной ячейке (в композите).

В случае когда в качестве компонента 1 используют стержни круглого сечения диаметром d , то их фактивно приводят к эквивалентным по площади сечения стержням квадратного сечения, при этом значения $h_Y=h_Z$ находят из соотношения $h_Y^2=h_Z^2=\pi d^2/4$ и принимают равное им значение h_X .

С учетом соотношений (3), (4) тепловое сопротивление R_X элементарной ячейки в направлении X равно

$$R_X = \frac{L_X}{\lambda_X L_Y L_Z} = \frac{L_X}{L_Y L_Z (\lambda_1 \varphi + \lambda_2 (1 - \varphi))}, \quad (5)$$

а искомая теплопроводность в направлении X (вдоль стержней) с учетом соотношений (5) и (2) равна

$$\lambda_X = \lambda_1 \varphi + \lambda_2 (1 - \varphi). \quad (6)$$

Искомую теплопроводность композита λ_Y в направлении Y (поперек стержней) рассчитывают также с использованием электротепловой аналогии:

$$\lambda_Y = \frac{L_Y}{R_Y L_X L_Z}, \quad (7)$$

где R_Y — тепловое сопротивление элементарной ячейки в направлении оси Y , которое рассчитывают исходя из того, что в направлении Y тепловой поток, проходящий через элементарную ячейку композита, разделяется на два параллельных тепловых потока, причем один из этих потоков последовательно проходит через компонент 1 и одну часть компонента 2, а другой тепловой поток проходит через другую часть компонента 2 (см. рис. 4), т.е. имеет место параллельно-последовательная схема включения тепловых сопротивлений (см. рис. 5, R_Y).

Для такой схемы итоговое тепловое сопротивление R_Y элементарной ячейки в направлении оси Y определяется по соотношению

$$\frac{1}{R_Y} = \frac{1}{R_{2Y}^{(2)}} + \frac{1}{R_{2Y}^{(1)} + R_{1Y}}, \quad (8)$$

где R_{1Y} — тепловое сопротивление компонента 1 в направлении Y ; $R_{2Y}^{(1)}$ — тепловое сопротивление одной части компонента 2, ограниченной поперечным сечением $h_Z \times L_X$ и длиной $(L_Y - h_Y)$ в направлении Y ; $R_{2Y}^{(2)}$ — тепловое сопротивление другой части компонента 2, ограниченной поперечным сечением $(L_Z - h_Z) \times L_X$ и длиной L_Y в направлении Y (см. рис. 4).

Согласно определению, соответствующие тепловые сопротивления равны

$$R_{1Y} = \frac{h_Y}{\lambda_1 h_Z L_X}, \quad R_{2Y}^{(1)} = \frac{L_Y - h_Y}{\lambda_2 h_Z L_X}, \quad R_{2Y}^{(2)} = \frac{L_Y}{\lambda_2 L_X (L_Z - h_Z)}. \quad (9)$$

С учетом соотношений (7), (9), а также с учетом того, что $L_X = L_Y = L_Z = 1$ и $h_Y = h_Z = h_X$, искомая теплопроводность λ_Y элементарной ячейки в направлении Y равна

$$\lambda_Y = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (1 - \varphi)^2 + \lambda_2^2 (1 - \varphi) \varphi + \varphi_2 \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 (1 - \varphi) + \lambda_2 \varphi}. \quad (10)$$

Ниже представлена итоговая система уравнений для расчета ожидаемых (предсказуемых) теплопроводностей создаваемого двухкомпонентного композита:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_X &= \lambda_1 \varphi + \lambda_2 (1 - \varphi) = \lambda_2 (N \varphi - \varphi + 1); \\ \lambda_Y &= \lambda_2 \frac{N(1 - \varphi)^2 + (N + 1 - \varphi) \varphi}{N(1 - \varphi) + \varphi}; \\ \varphi &= \frac{h_Z}{L_Z} = \frac{h_Y}{L_Y}, \quad N = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Для удобства практической реализации используется отношение ожидаемых теплопроводностей, получаемое из (11):

$$\frac{\lambda_X}{\lambda_Y} = \frac{(N \varphi - \varphi + 1)(N - N \varphi + \varphi)}{N(1 - \varphi)^2 + (N + 1 - \varphi) \varphi}. \quad (12)$$

На рис. 6 представлены графические зависимости отношения теплопроводностей λ_X/λ_Y от объемной доли стержней в композите (ϕ) при разных фиксированных отношениях теплопроводностей материалов компонентов $N=\lambda_1/\lambda_2$.

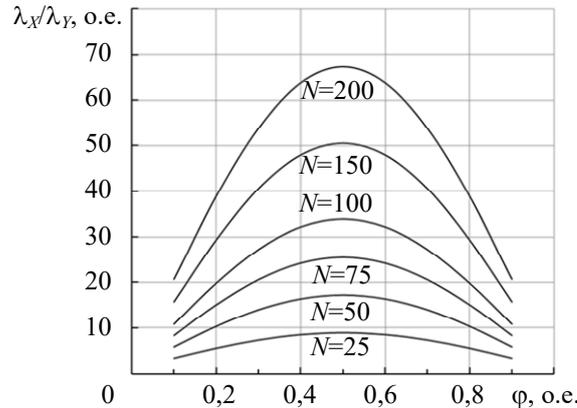


Рис. 6

Таким образом, если создать структуру, представленную на рис. 1, то она будет обладать различными теплопроводностями в направлениях вдоль и поперек стержней.

Пример реализации метода. Пусть, например, требуется создать композит в форме пластины с ориентировочными размерами $20 \times 40 \times 100$ см, где 20 см — толщина пластины (ось Z), 40 см — ширина пластины (ось Y), 100 см — длина пластины (ось X). Пусть исходно заданы следующие значения теплопроводностей по осям X, Y : $\lambda_X=30$ Вт/(м·К), $\lambda_Y=3$ Вт/(м·К).

Предварительно находят отношение заданных теплопроводностей $\lambda_X/\lambda_Y=30/3=10$. Исходя из целей и задач, условий практического применения создаваемого композита выбирают материалы его компонентов. При выборе материалов компонентов руководствуются номограммами, представленными на рис. 6. Согласно заданному отношению $\lambda_X/\lambda_Y=10$ по рис. 6 находят такую зависимость $\lambda_X/\lambda_Y(\phi)$, для которой обеспечивается ее экстремум (максимум) — в данном конкретном случае это зависимость для $N=\lambda_1/\lambda_2=25$. Из этого следует, что теплопроводность (λ_1) первого компонента должна быть примерно в 25 раз больше теплопроводности (λ_2) второго компонента.

При выборе материалов компонентов руководствуются следующими требованиями:

- фактическое отношение теплопроводностей компонентов должно быть заведомо несколько большим заданного значения, т.е. $(\lambda_1/\lambda_2)_{\text{факт}} > N$;
- фактическая теплопроводность компонента с меньшей теплопроводностью должна быть меньше заданной вдоль оси Y , т.е. $\lambda_2 < \lambda_Y$;
- фактическая теплопроводность компонента с большей теплопроводностью должна быть больше заданной вдоль оси X , т.е. $\lambda_1 > \lambda_X$.

Пусть, например, в качестве первого компонента используют сталь, обладающую теплопроводностью $\lambda_1=46,5$ Вт/(м·К), а в качестве второго компонента — бетон с теплопроводностью $\lambda_2=1,5$ Вт/(м·К). После этого рассчитывают фактическое отношение теплопроводностей компонентов: $N_{\text{факт}}=\lambda_1/\lambda_2=46,5/1,5=31$. Затем, используя соотношение (12), находят значение ϕ , которое соответствует заданным теплопроводностям λ_X и λ_Y . В конкретном примере получают:

$$10 = \frac{(31\phi - \phi + 1)(31 - 31\phi + \phi)}{31(1 - \phi)^2 + (31 + 1 - \phi)\phi} \Rightarrow \phi = 0,63.$$

Затем по соотношениям (11) оценивают ожидаемые фактические теплопроводности λ_X и λ_Y . Для конкретно взятых значений $\phi=0,63$, $\lambda_1=46,5$ Вт/(м·К), $\lambda_2=1,5$ Вт/(м·К) получают: $\lambda_X \approx 30$ Вт/(м·К), $\lambda_Y \approx 3$ Вт/(м·К).

После выполненной расчетной процедуры исходя из заданных габаритов композита находят размер его элементарной ячейки. При определении размера ячейки руководствуются следующими требованиями:

- размер элементарной ячейки должен быть минимально возможным настолько, насколько это позволяют современные технологии, — данное требование обеспечивает наиболее равномерную теплопроводность композита в заданном направлении;
- размер элементарной ячейки в наилучшей степени приближения должен быть кратен минимальному заданному габаритному размеру композита;
- размер элементарной ячейки должен быть таким, чтобы обеспечивались технологическая осуществимость многократного ее повторения в пространстве и воссоздание структуры предлагаемого композита;
- компонент, занимающий в композите меньший объем и имеющий поперечное сечение $h_Z \times h_Y$, должен быть технологически осуществимым.

В рассматриваемом примере: исходя из полученного значения $\varphi=0,63$ и заданных размеров элементарной ячейки $L_X, L_Y=L_Z$, равных, например, $L_X=100$ см, $L_Y=L_Z=1$ см, находят габаритные размеры первого компонента (стали), которые равны $h_X=L_X=100$ см, $h_Y=\varphi L_Y=0,63$ см, $h_Z=\varphi L_Z=0,63$ см. Второй компонент (бетон) выполняет роль препрега и заполняет пространство композита. Таким образом, для создания требуемого композита необходимо взять либо прямоугольные стальные стержни длиной 100 см с квадратным поперечным сечением размером $0,63 \times 0,63$ см, либо круглые стальные стержни, эквивалентные по их поперечному сечению прямоугольным стержням, с диаметром, равным

$$d = 2\sqrt{\frac{h_Y h_Z}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{0,63 \cdot 0,63}{3,14}} \approx 0,71 \text{ см.}$$

Затем из стальных стержней сечением $0,63 \times 0,63$ см или $\varnothing 0,71$ см изготавливают каркас композиционного материала размером $20 \times 40 \times 100$ см, как показано на рис. 1, при этом расстояние между смежными стержнями делают равным 1 см; затем заливают каркас бетоном и после его отверждения получают искомый композиционный материал с предсказанным с погрешностью не более 10 % значением теплопроводности вдоль стержней, равным 30 Вт/(м·К), поперек стержней — 3 Вт/(м·К). При этом созданный композит будет иметь форму пластины размером $20 \times 40 \times 100$ см, внутри которой по толщине пластины (ось Z) размещено 20 слоев стальных стержней по 40 стержней в каждом слое, шаг между стержнями по вертикали и горизонтали одинаковый и составляет 1 см, длина стержней 100 см.

Можно задать иной размер элементарной ячейки, например, задать ее размеры равными $L_X=100$ см, $L_Y=L_Z=0,5$ см. В этом случае габаритные размеры первого компонента (стали) равны $h_X=L_X=100$ см, $h_Y=\varphi L_Y=0,32$ см, $h_Z=\varphi L_Z=0,32$ см. Для создания требуемого композита необходимо взять либо прямоугольные стальные стержни длиной 100 см с квадратным поперечным сечением размером $0,32 \times 0,32$ см, либо круглые стальные стержни, эквивалентные по их поперечному сечению прямоугольным стержням, с диаметром, равным

$$d = 2\sqrt{\frac{h_Y h_Z}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{0,32 \cdot 0,32}{3,14}} \approx 0,36 \text{ см.}$$

Затем из стальных стержней сечением $0,32 \times 0,32$ или $\varnothing 0,36$ см изготавливают каркас композиционного материала размером $20 \times 40 \times 100$ см, как показано на рис. 1, при этом расстояние между смежными стержнями делают равным 0,5 см; затем заливают каркас бетоном и после его отверждения получают искомый композиционный материал с предсказанным с погрешностью не более 10 % значением теплопроводности вдоль стержней, равным 30 Вт/(м·К), поперек стержней — 3 Вт/(м·К). При этом созданный композит будет иметь форму пластины размером $20 \times 40 \times 100$ см, внутри которой по толщине пластины (ось Z) размещено

40 слоев стальных стержней по 80 стержней в каждом слое, шаг между стержнями по вертикали и горизонтали одинаковый и составляет 0,5 см, длина стержней 100 см.

Необходимо отметить, что технология изготовления каркаса, равно как и технология его заполнения матрицей, целиком и полностью определяются типом используемых материалов, размерами компонентов, имеющимися в наличии технологиями, приспособлениями и оборудованием, а поэтому выбираются изготовителем индивидуально и самостоятельно.

Заключение. Предложенный метод моделирования позволяет создавать двухкомпонентные анизотропные композиты с заранее заданной двумерно-ориентированной теплопроводностью, непрерывно изменяемой в широком диапазоне от нескольких единиц до нескольких сотен, при этом может быть использована практически неограниченная номенклатура веществ, изначально находящихся в твердом состоянии. Кроме того, использование в качестве компонентов веществ, обладающих высокой температурой плавления, позволяет создавать анизотропные композиты с высокой рабочей температурой, вплоть до 2500 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maxwell J. C. A treatise on electricity and magnetism. Oxford Univ. Press, 1873. Vol. 1. 500 p.
2. Wiener O. Die Theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Strömung. Abh. d. Leipzig. Akad., 1912. 509 p.
3. Оделевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // ЖТФ. 1951. Т. 21, вып. 6. С. 667—685.
4. Meredith R. E., Tobias C. W. Conductivities in emulsions // J. Electrochem. Soc. 1961. Vol. 108. P. 286—290 [Электронный ресурс]: <<https://doi.org/10.1149/1.2428064>>.
5. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир, 1968. 464 с.
6. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
7. Пономарев С. В., Мищенко С. В., Дивин А. Г. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: Монография. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2006. Кн. 1. 204 с.
8. Орлов А. И. Обобщенная проводимость гетерогенных сред и стержневых систем: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Обнинск, 2009.
9. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб: Изд-во „НОТ“, 2010. 822 с.
10. Зарубин В. С., Зарубин С. В., Кувыркин Г. Н. Математическое моделирование теплопереноса в однонаправленном волокнистом композите // Наука и образование. (Научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана.) 2014. № 1. С. 270—281. DOI: 10.7463/0114.0657262.
11. Эдвабник В. Г. К теории обобщенной проводимости смесей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1, ч. 2. 51 с.
12. Pietrak K., Wisniewski T. S. A review of model for effective thermal conductivity of composite materials // Journal of Power Technologies. 2015. Vol. 95, № 1. P. 14—24.
13. Балабанов П. В., Савенков А. П. Теоретические и практические аспекты измерения теплофизических свойств гетерогенных материалов: Монография. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2016. 188 с.
14. Колесников С. А., Ким Л. В., Воронцов В. А., Проценко А. К., Чеблакова Е. Г. Исследование формирования теплофизических характеристик объемно-ориентированных углерод-углеродных композиционных материалов // Новые огнеупоры. 2017. № 8. С. 45—56.
15. Сулаберидзе В. Ш., Михеев В. А. Моделирование теплопроводности гетерогенных композиций функциональных материалов на основе экспериментальных данных. СПб: Реноме, 2023. 118 с.
16. Ходунков В. П., Походун А. И., Заричняк Ю. П. Анизотропия теплопроводности как средство выравнивания температурных полей в излучающих полостях АЧТ // Приборы. 2015. № 8. С. 7—12.
17. Пат. 2739728 РФ. МПК G01N 25/18, C22C 9/06, G01N 33/20. Способ создания металлокомпозита с предсказуемой теплопроводностью / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк. Опубл. 28.12.2020. Бюл. № 1.

18. Пат. 2748669 РФ. МПК C09K 5/14, G01N 25/18. Способ создания двухкомпонентного композита с заданной теплопроводностью / В. П. Ходунков, Ю. П. Заричняк. Опубликовано. 28.05.2021. Бюл. № 16.
19. Ходунков В. П., Заричняк Ю. П. Новые стационарные методы измерения теплопроводности твердых тел // Вестн. ТГТУ. 2022. Т. 28, № 3. С. 455—465. DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.
20. Ходунков В. П., Заричняк Ю. П. Перспективные методы измерения теплопроводности твердых тел // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 668—676. DOI: 10/17586/0021-3454-2022-65-9-668-676.
21. Ходунков В. П., Заричняк Ю. П. Моделирование структуры композиционных материалов с заранее заданными тепловыми свойствами: новые методы измерения // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14, № 12. С. 482—496. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-12-482-496.

Сведения об авторах

Вячеслав Петрович Ходунков

— канд. техн. наук; Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева; ст. научный сотрудник;
E-mail: walkerearth@mail.ru

Юрий Петрович Заричняк

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Университет ИТМО, образовательный центр „Энергоэффективные инженерные системы“, доцент;
E-mail: zarich4@gmail.com

Поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 18.05.2023; принята к публикации 31.07.2023.

REFERENCES

1. Maxwell J.C. *A treatise on electricity and magnetism*, Vol. 1, Oxford University Press, 1873, 500 p.
2. Wiener O. *Die Theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Strömung*, Abh. d. Leipz. Akad., 1912, Bd. 32, 509 p.
3. Odelevsky V.I. *Technical Physics*, 1951, no. 6(21), pp. 667–685. (in Russ.)
4. Meredith R.E., Tobias C.W. *J. Electrochem. Soc.*, 1961, vol. 108, pp. 286–290, <https://doi.org/10.1149/1.2428064>.
5. Missenard A. *Conductivite' thermique des solides, liquides, gaz et de leurs melanges*, Eyrolles, 1965, 554 p.
6. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov* (Thermal Conductivity of Mixtures and Composite Materials), Leningrad, 1974, 264 p. (in Russ.)
7. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Divin A.G. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty teplofizicheskikh izmereniy* (Theoretical and Practical Aspects of Thermophysical Measurements), Tambov, 2006, Book 1, 204 p. (in Russ.)
8. Orlov A.I. *Obobshchennaya provodimost' geterogennykh sred i sterzhnevnykh sistem* (Generalized Conductivity of Heterogeneous Media and Rod Systems), Extended abstract of candidate's thesis, Obninsk, 2009, 24 p. (in Russ.)
9. Mikhailin Yu.A. *Konstruktsionnyye polimernyye materialy* (Structural Polymeric Materials), St. Petersburg, 2013, 822 p. (in Russ.)
10. Zarubin V.S., Zarubin S.V., Kuvyrkin G.N. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2014, no. 1, pp. 270–281, DOI: 10.7463/0114.0657262. <http://technomag.bmstu.ru/doc/657262.html> (in Russ.)
11. Edvabnik V.G. *Modern problems of science and education*, 2015, no. 1, 51 p. (in Russ.)
12. Pietrak K., Tomasz S. *Journal of Power Technologies*, 2015, no. 1(95), pp. 14–24.
13. Balabanov P.V., Savenkov A.P. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty izmereniya teplofizicheskikh svoystv geterogennykh materialov* (Theoretical and Practical Aspects of Measuring the Thermophysical Properties of Heterogeneous Materials), Tambov, 2016, 188 p. (in Russ.)
14. Kolesnikov S.A., Kim L.V., Vorontsov V.A., Protosenko A.K., Cheblakova E.G. *Novyye ognepupory* (New Refractories), 2017, no. 8, pp. 45–56. (in Russ.)
15. Sulaberidze V.Sh., Mikheev V.A. *Modelirovaniye teploprovodnosti geterogennykh kompozitsiy funktsional'nykh materialov na osnove eksperimental'nykh dannykh* (Modeling of Thermal Conductivity of Heterogeneous Compositions of Functional Materials Based on Experimental Data), St. Petersburg, 2023, 118 p., ISBN 978-5-001125-752-3. (in Russ.)
16. Khodunkov V.P., Pokhodun A.I., Zarichnyak Yu.P. *Instruments*, 2015, no. 8, pp. 7–12. (in Russ.)
17. Patent RU 2739728, G01N 25/18, C22C 9/06, G01N 33/20, *Sposob sozdaniya metallokompozita s predskazuyemoy teploprovodnost'yu* (Method for Creating a Metal Composite with Predictable Thermal Conductivity), V.P. Khodunkov, Yu.P. Zarichnyak, Patent application no. 2020123353, Priority 08.07.2020, Published 28.12.2020, Bulletin 1. (in Russ.)
18. Patent RU 2748669, C09K 5/14, G01N 25/18, *Sposob sozdaniya dvukhkomponentnogo kompozita s zadannoy teploprovodnost'yu* (Method for Creating a Two-component Composite with a Given Thermal Conductivity), V.P. Khodunkov, Yu.P. Zarichnyak, Patent application no. 2020123354, Priority 08.07.2020, Published 28.05.2021, Bulletin 16. (in Russ.)
19. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. *Bulletin of the Tambov State Technical University*, 2022, no. 3(28), pp. 455–465, DOI: 10.17277/vestnik.2022.03. (in Russ.)
20. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 9(65), pp. 668–676, DOI: 10/17586/0021-3454-2022-65-9-668-676. (in Russ.)

21. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. *Тепловые процессы в технике*, 2022, no. 12(14), pp.482–496, DOI: 10.34759/tpt-2022-14-12-482-496. (in Russ.)

Data on authors

- Vyacheslav P. Khodunkov** — PhD; D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology; Senior Researcher;
E-mail: walkerearth@mail.ru
- Yuriy P. Zarichnyak** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Educational Center "Energy-Efficient Engineering Systems"; Associate Professor;
E-mail: zarich4@gmail.com

Received 12.04.2023; approved after reviewing 18.05.2023; accepted for publication 31.07.2023.