

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-615-619

УДК 669; 67.014

Метод получения двухкомпонентных композиционных материалов с заданной теплопроводностью

Юрий Петрович Заричняк¹, Вячеслав Петрович Ходунков²✉

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

¹ zarich4@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8713-3583>

² walkerearth@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9208-7462>

Аннотация

Введение. Предложен метод получения двухкомпонентных композиционных материалов, отличающийся от известных методов тем, что в результате его реализации может быть достигнуто любое значение теплопроводности создаваемого композита, выбранное из диапазона теплопроводностей исходных компонентов.

Метод. Метод заключается в смешивании существенно разнородных твердых компонентов в заданной пропорции, последующем их прессовании и спекании. Пропорцию компонентов предварительно находят расчетным путем исходя из требуемого значения теплопроводности смеси. Для оценки ожидаемой теплопроводности композита и определения требуемой пропорции компонентов предложено использовать разработанную новую модель структуры с хаотически расположенными компонентами. **Основные результаты.** Показано, что для получения необходимой теплопроводности двухкомпонентной смеси можно успешно управлять структурой с хаотически расположенными компонентами, где в качестве элементарной ячейки используется предложенная в работе восьмизлементная кубическая ячейка. При этом обеспечивается точность задания требуемого значения теплопроводности не ниже 90 %. Реализация метода показана на примере получения медно-алундового композита с заданным значением теплопроводности $\lambda = 110$ Вт/(м·К), которое, согласно представленному в примере расчету, соответствует процентному соотношению компонентов 74/26 (медь/алунд). **Обсуждение.** Разработанный метод позволяет получать двухкомпонентные композиты с заданной теплопроводностью в широком диапазоне от нескольких единиц до нескольких сотен Вт/(м·К). В качестве компонентов может использоваться практически неограниченная номенклатура веществ, находящихся в твердом порошкообразном состоянии. Обеспечивается возможность реализации непрерывной шкалы теплопроводности твердых тел. При использовании тугоплавких веществ эта шкала может быть расширена до температуры 2000–2500 °С. Метод может найти применение в метрологии, металлургии, ядерных технологиях, авиационной и тяжелой промышленности, кораблестроении.

Ключевые слова

композиционный материал, теплопроводность, моделирование, взаимопроникающие компоненты, пропорция, электротепловая аналогия, элементарная ячейка

Ссылка для цитирования: Заричняк Ю.П., Ходунков В.П. Метод получения двухкомпонентных композиционных материалов с заданной теплопроводностью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 4. С. 615–619. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-615-619

Method for obtaining two-component composite materials with a given thermal conductivity

Yuri P. Zarichnyak¹, Vyacheslav P. Khodunkov²✉

¹ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

¹ zarich4@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8713-3583>

² walkerearth@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9208-7462>

© Заричняк Ю.П., Ходунков В.П., 2024

Abstract

A method for obtaining two-component composite materials is proposed which differs from known methods in that as a result of the implementation of the method any value of the thermal conductivity of the composite being created can be achieved, if taken from the range of thermal conductivity of the initial components. The method consists in mixing substantially heterogeneous solid components in a given proportion, their subsequent pressing, and sintering. The proportion of the components is previously calculated based on the required value of the thermal conductivity of the mixture. To estimate the expected thermal conductivity of the composite and find the required proportion of components, it is proposed to use the structure model with chaotically arranged components developed by the authors of the article. It is shown that in order to achieve the goal, the thermal conductivity of a two-component mixture can be successfully modeled by a structure with chaotically arranged components, where an eight-element cubic cell proposed by the authors of the work is used as an elementary cell. At the same time, the accuracy of setting the required thermal conductivity value is at least 90 %. The implementation of the method is shown by the example of obtaining a copper-alund composite with a given thermal conductivity value $\lambda = 110 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ which, according to the calculation presented in the example, corresponds to a percentage ratio of components 74/26 (copper/alund). The developed method makes it possible to obtain two-component composites with a given thermal conductivity in a wide range from several units to several hundred $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$. An almost unlimited range of substances in a solid powdery state can be used as components. It is possible to implement a continuous scale of thermal conductivity of solids. When using refractory substances, this scale can be extended to a temperature of 2000–2500 °C. The method is intended for use in metrology, metallurgy, nuclear technology, aviation and heavy industry, shipbuilding.

Keywords

composite material, thermal conductivity, modeling, interpenetrating components, proportion, electrothermal analogy, unit cell

For citation: Zarichnyak Yu.P., Khodunkov V.P. Method for obtaining two-component composite materials with a given thermal conductivity. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 615–619 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-615-619

Введение

Предложенный метод относится к технологиям получения композиционных материалов с заранее заданными теплофизическими свойствами, а именно — к композитам в виде двухкомпонентной смеси, образованной путем механического смешения двух веществ с их последующим прессованием и спеканием. Метод отличается от известных методов тем, что в результате его реализации может быть достигнуто любое значение теплопроводности создаваемого композита из диапазона теплопроводностей исходных компонентов. Метод предназначен для использования в приборостроении, авиационной и космической отраслях промышленности, в теплоэнергетике, а также в метрологии для создания стандартных образцов теплопроводности твердых тел.

На современном уровне развития науки и техники известны и применяются разнообразные методы получения композиционных материалов [1–6], в том числе, с заранее заданным значением теплопроводности [7–10]. Рассмотрим подробнее методы, наиболее близкие к разработанному методу.

Метод получения рецептуры композиционного полимерного материала с эффективными теплофизическими и электрофизическими характеристиками в заданных интервалах. При использовании данного метода по экспериментальным данным строят поверхности и соответствующие им изолинии эффективных характеристик, зависящие от управляющих параметров — объемной доли компонентов, типа и среднего радиуса частиц наполнителя. По полученным изолиниям определяют рецептуру, т. е. значения управляющих параметров, обеспечивающую попадание эффективных характеристик в заданные интервалы значений [9]. Согласно данному методу, состав и свойства компози-

ционного полимерного материала определяются объемной долей и средним радиусом частиц наполнителя, который обладает известными теплофизическими и электрофизическими свойствами. Недостатки метода: низкая достоверность априорного задания теплопроводности композита, обусловленная ее сильной зависимостью от точности знания среднего радиуса частиц наполнителя; температурный диапазон существования композиционного полимерного материала ограничен предельной рабочей температурой полимера, которая, как правило, не высока и не превышает 200 °C; ограничение по номенклатуре материалов, применяемых для создания композита, так как один из материалов обязательно должен быть полимером.

Метод получения композиционного материала на основе металлической матрицы и неметаллического волокна, который заключается в том, что изготавливают преформу из неметаллического волокна. Преформу помещают в пресс-форму с перфорированным дном, уплотняют с одновременным удалением воды через перфорированное дно, фиксируют, сушат, заливают и пропитывают под давлением матричным металлом. В другом варианте осуществления метода при пропитке преформы под давлением выполняют направленную кристаллизацию материала, а в качестве неметаллического волокна используют дискретные волокна углерода, оксида алюминия или карбида кремния, а в качестве матричного металла — алюминий, магний, цинк, олово, свинец или их сплавы [10]. Недостаток метода: ограниченная номенклатура материалов, применяемых в качестве матрицы и наполнителя.

Метод получения композиционных материалов с заданными физико-химическими свойствами, в котором эти свойства, в первом приближении, определяются суммой свойств составляющих компонентов пропорционально их количеству [2]. Метод не применим для

создания композиционных материалов с заданной теплопроводностью. Это обусловлено тем, что теплопроводность является интенсивной физической величиной, поэтому ее эффективное значение для смеси материалов не является суммой теплопроводностей составляющих смесь компонентов — в этом заключается недостаток метода.

Цель работы — разработка метода получения композиционных материалов с заранее заданным значением теплопроводности.

Описание предлагаемого метода

Представленный новый метод разработан на основании результатов, полученных в работе [11]¹, и заключается в следующем. В заданной пропорции равномерно смешаны два компонента, представленные в виде порошков с заранее известными значениями теплопроводности. Далее порошки спрессованы в заданную форму и измерена теплопроводность полученного композита, которому присвоено измеренное значение теплопроводности. Отметим, что пропорция смешиваемых веществ рассчитана исходя из необходимого значения теплопроводности.

Для расчета ожидаемого значения теплопроводности смоделирована структура создаваемого композита моделью с хаотически распределенными по объему компонентами [12, 13].

Создаваемый двухкомпонентный композит структурно представляет совокупность элементарных ячеек (рис. 1), каждая из которых имеет вид куба, состоящего из восьми одинаковых специально ориентированных кубиков, каждый из которых образован параллельно-расположенными слоями, моделирующими слои веществ 1 и 2. При этом размеры куба равны $2L \times 2L \times 2L$, а кубика — $L \times L \times L$; слой вещества 1 имеет толщину a , а вещества 2 — b ; высота и ширина всех слоев 1, 2 одинакова и равна L . Через элементарную ячейку проходит направленный тепловой поток q . Данная ячейка в виде куба из восьми кубиков обладает эффективной теплопроводностью, равной эффективной теплопроводности ($\lambda_{\text{эфф}}$) создаваемого двухкомпонентного композита.

Значение $\lambda_{\text{эфф}}$ данной элементарной ячейки, т. е. композита, может быть рассчитано через ее эффективное тепловое сопротивление $R_{\text{эфф}}$, которое, в свою очередь, рассчитывается исходя из схемы электрического замещения, составленной по электротепловой аналогии (рис. 2). Согласно закону Кирхгофа, рассчитаем $R_{\text{эфф}}$ для электрической схемы:

$$R_{\text{эфф}} = 0,25(R_{\parallel} + R_{\perp}). \quad (1)$$

С другой стороны, $R_{\text{эфф}}$ электрической схемы может быть рассчитано из общеизвестного определения для теплового сопротивления участка тепловой цепи:

$$R = l/(\lambda S), \quad (2)$$

где l — длина участка тепловой цепи (в направлении передачи теплоты); λ — теплопроводность участка цепи; S — площадь сечения, в котором передается теплота на данном участке цепи.

Применим к $R_{\text{эфф}}$ элементарной ячейки двухкомпонентного композита соотношение (2), тогда запишем:

$$R_{\text{эфф}} = 2L/(\lambda_{\text{эфф}}S). \quad (3)$$

Решив уравнение (3) совместно с (1) относительно $\lambda_{\text{эфф}}$ композита при условии, что $S = 4L^2$, получим:

$$\lambda_{\text{эфф}} = 2/(L(R_{\parallel} + R_{\perp})). \quad (4)$$

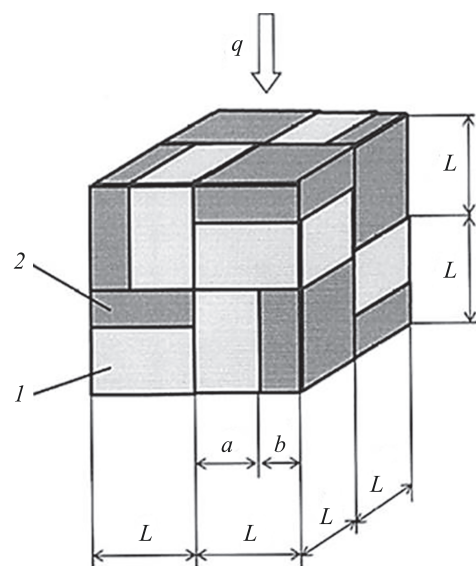


Рис. 1. Элементарная ячейка, моделирующая структуру создаваемого двухкомпонентного композита

Fig. 1. Unit cell modeling the structure of the created two-component composite

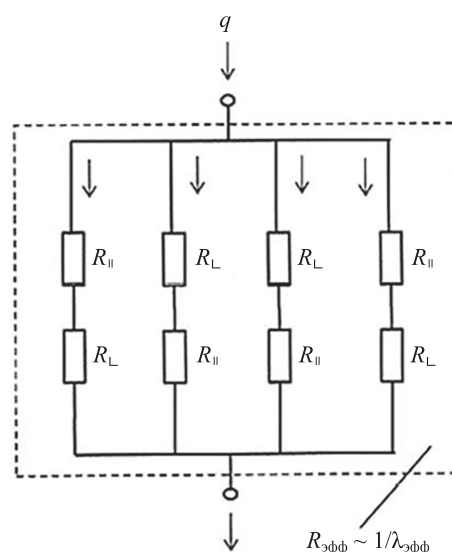


Рис. 2. Электрическая схема замещения теплового сопротивления элементарной ячейки

Fig. 2. Electric circuit for substituting the thermal resistance of the unit cell

¹ Приказ Роспатента № 183 от 8 ноября 2021 г. О результатах отбора изобретений, включенных в базу данных «100 лучших изобретений России» за первое полугодие 2021 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://agns.ru/news/14647> (дата обращения: 26.04.2024).

Примем $L = 1$ (кубики единичной длины), в результате получим более простое соотношение:

$$\lambda_{\text{эфф}} = 2/(R_{\parallel} + R_{\perp}). \quad (5)$$

Значения эффективных тепловых сопротивлений кубиков можно рассчитать исходя из общеизвестного определения теплового сопротивления участка тепловой цепи (2), соотношения для которых имеют вид (при $L = 1$):

$$R_{\parallel} = 1/(a\lambda_1 + b\lambda_2), \quad (6)$$

$$R_{\perp} = a/\lambda_1 + b/\lambda_2. \quad (7)$$

В соотношениях (6) и (7) теплопроводности веществ 1 и 2 — λ_1 и λ_2 заранее известны. Неизвестными параметрами остаются толщины слоев веществ a и b . Рассчитаем указанные толщины слоев веществ (выраженные в относительных единицах) исходя из объемного содержания каждого вещества по следующим соотношениям:

$$a = X_1/(X_1 + X_2), \quad (8)$$

$$b = X_2/(X_1 + X_2), \quad (9)$$

где X_1 и X_2 — объемные содержания веществ 1 и 2 . При этом объемные содержания веществ X_1 и X_2 измеряют также в относительных единицах.

Далее, используя соотношения (4)–(9), выполним расчет зависимости $\lambda_{\text{эфф}}$ создаваемого двухкомпонентного композита от объемного содержания (пропорции смешивания) веществ 1 и 2 , т. е. от X_1 и X_2 . Полученную зависимость $\lambda_{\text{эфф}} = f(X_i)$, $i = 1, 2$ построим графически или выразим математически с помощью аппроксимации, например, полиномом n -ой степени, как показано на рис. 3 для примера реализации метода. Согласно найденной пропорции, необходимо равномерно сме-

шать порошки веществ 1 и 2 , спрессовать полученную смесь по одной из общеизвестных технологий в заданную форму и выполнить спекание. На последнем этапе измерить $\lambda_{\text{эфф}}$, полученного из смеси двухкомпонентного композита, и присвоить ему измеренное значение теплопроводности.

Пример реализации метода

Пусть, например, требуется создать медно-алундовый двухкомпонентный композит, обладающий эффективной теплопроводностью $\lambda_{\text{эфф}} = 110$ Вт/(м·К). В качестве вещества 1 взята чистая медь (Cu), в качестве вещества 2 — алунд (Al_2O_3). Теплопроводности веществ известны: Cu равна $\lambda_1 = 400$ Вт/(м·К), Al_2O_3 — $\lambda_2 = 20$ Вт/(м·К). Данные по теплопроводности приведены для комнатной температуры. Для реализации метода первоначально по соотношениям (4)–(9) выполним расчет зависимости $\lambda_{\text{эфф}}$ создаваемого двухкомпонентного композита от объемного содержания (пропорции смешивания) веществ, например, от объемного содержания X_1 вещества 1 , т. е. находят зависимость $\lambda_{\text{эфф}} = f(X_1)$. Полученную зависимость построим графически или выполним аппроксимацию математически. Для рассматриваемого примера осуществим аппроксимацию зависимости полиномом 6-й степени с коэффициентом достоверности аппроксимации $k_R = 0,999$:

$$\lambda_{\text{эфф}} = 11860X_1^6 - 30359X_1^5 + 29599X_1^4 - 13324X_1^3 + 2715,5X_1^2 - 116,7X_1 + 22.$$

Исходя из данной зависимости, найдем требуемые объемные содержания веществ, которые, как следует из расчетов, для $\lambda_{\text{эфф}} = 110$ Вт/(м·К) равны $X_1 = 0,74$ и $X_2 = 0,26$.

Затем в установленной пропорции равномерно смешаем порошки указанных веществ (Cu и Al_2O_3), полученную смесь спрессуем в заданную форму и спечем, т. е. сформируем образец нужного размера и формы. После операции прессования и спекания измерим $\lambda_{\text{эфф}}$ полученного двухкомпонентного композита любым, соответствующим по точности измерителем теплопроводности, обладающим заданной погрешностью измерения (например, не более 2 %) в диапазоне измеряемой теплопроводности. Найденное с помощью измерителя значение $\lambda_{\text{эфф}}$ присваивают созданному двухкомпонентному композиту.

Оценим достоверность задания $\lambda_{\text{эфф}}$ согласно предлагаемому методу не ниже 90 % (относительная неопределенность предсказания ≈ 10 %).

Предложенный метод позволяет создать двухкомпонентные композиты с заданной теплопроводностью, непрерывно изменяемой в широком диапазоне от сотен до нескольких единиц, при этом может использоваться практически неограниченная номенклатура веществ, находящихся в твердом порошкообразном состоянии. Отметим, что в методе не предъявляются какие-либо жесткие требования к гранулометрическому составу порошков используемых веществ. Кроме того, использование веществ, обладающих высокой температурой плавления, позволяет создавать композиты с высокой

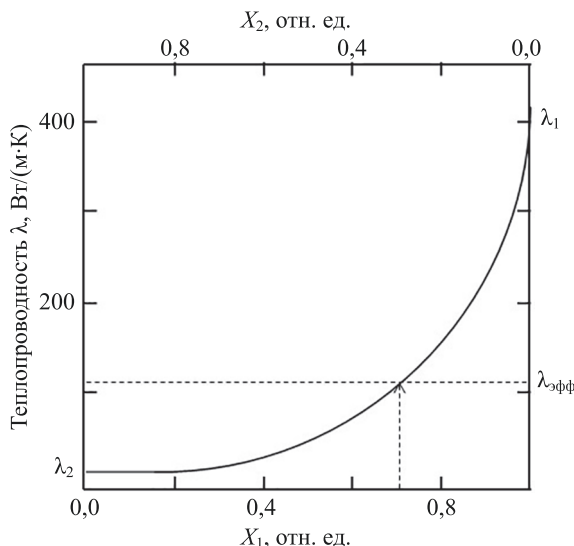


Рис. 3. Зависимость эффективной теплопроводности создаваемого двухкомпонентного композита от объемного содержания вещества 1 для представленного примера реализации метода

Fig. 3. Dependence of the effective thermal conductivity of the created two-component composite on the volumetric content of substance 1 for the presented example of the method

рабочей температурой, вплоть до температуры 2000–2500 °С.

Заключение

Предложенный метод позволяет создавать двухкомпонентные композиты с любым значением теплопроводности, взятым из диапазона теплопроводностей исходных компонентов, при этом может использоваться

практически неограниченная номенклатура веществ, находящихся в твердом порошкообразном состоянии. Кроме того, какие-либо жесткие требования к гранулометрическому составу порошков используемых веществ не предъявляются. Использование веществ, обладающих высокой температурой плавления, позволяет создавать композиты с высокой рабочей температурой, вплоть до 2000–2500 °С.

Литература

1. Han X.H., Wang Q., Park Y.G., T'Joel C., Sommers A., Jacobi A. A review of metal foam and metal matrix composites for heat exchangers and heat sinks // *Heat Transfer Engineering*. 2012. V. 33. N 12. P. 991–1009. <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.659613>
2. Гаврилин И.В. Композиционные материалы в машиностроении: Обзорная информация. М., 1989. 40 с.
3. Sidhu S.S., Kumar S., Batish A. Metal Matrix Composites for Thermal Management: A Review // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2016. V. 41. N 2. P. 132–157. <https://doi.org/10.1080/10408436.2015.1076717>
4. Qu X.H., Zhang L., Wu M., Ren S.-B. Review of metal matrix composites with high thermal conductivity for thermal management applications // *Progress in Natural Science: Materials International*. 2011. V. 21. N 3. P. 189–197. [https://doi.org/10.1016/S1002-0071\(12\)60029-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60029-X)
5. Jia J., Cheng W., Long K. Concurrent design of composite materials and structures considering thermal conductivity constraints // *Engineering Optimization*. 2017. V. 49. N 8. P. 1335–1353. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1248959>
6. Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учебное пособие. Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 179 с.
7. Ходунков В.П., Заричняк Ю.П. Способ создания металлокомпозита с предсказуемой теплопроводностью. Патент RU2739728C1. Бюл. 2020. № 1.
8. Павлов С.П., Макарова В.М., Злобина И.В., Бекренев Н.В. Предпосылки регулирования теплопроводности полимерных композиционных материалов на основе моделирования тепловых потоков и аддитивных технологий // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 12-2. С. 337–342.
9. Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Реутов А.И., Люкшин П.А. Способ получения состава композиционного полимерного материала с заданными свойствами. Патент RU2668915C2. Бюл. 2018. № 28.
10. Абузин Ю.А., Наймушин А.И., Гончаров И.Е., Кочетов В.Н. Способ получения композиционного материала. Патент RU2392090C2. Бюл. 2010. № 17.
11. Ходунков В.П., Заричняк Ю.П. Способ создания двухкомпонентного композита с заданной теплопроводностью. Патент RU2748669C1. Бюл. 2021. № 16.
12. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
13. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность многокомпонентных смесей // *Инженерно-физический журнал*. 1967. Т. 12. № 4. С. 419.

Авторы

Заричняк Юрий Петрович — доктор физико-математических наук, профессор, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6701513411](https://orcid.org/0000-0001-8713-3583), <https://orcid.org/0000-0001-8713-3583>, zarich4@gmail.com

Ходунков Вячеслав Петрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, [sc 6504750914](https://orcid.org/0000-0001-9208-7462), <https://orcid.org/0000-0001-9208-7462>, walkerearth@mail.ru

References

1. Han X.H., Wang Q., Park Y.G., T'Joel C., Sommers A., Jacobi A. A review of metal foam and metal matrix composites for heat exchangers and heat sinks. *Heat Transfer Engineering*, 2012, vol. 33, no. 12, pp. 991–1009. <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.659613>
2. Gavrilin I.V. *Composite Materials in Mechanical Engineering: Overview Information*. Moscow, 1989, 40 p. (in Russian)
3. Sidhu S.S., Kumar S., Batish A. Metal Matrix Composites for Thermal Management: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2016, vol. 41, no. 2, pp. 132–157. <https://doi.org/10.1080/10408436.2015.1076717>
4. Qu X.H., Zhang L., Wu M., Ren S.-B. Review of metal matrix composites with high thermal conductivity for thermal management applications. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 189–197. [https://doi.org/10.1016/S1002-0071\(12\)60029-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60029-X)
5. Jia J., Cheng W., Long K. Concurrent design of composite materials and structures considering thermal conductivity constraints. *Engineering Optimization*, 2017, vol. 49, no. 8, pp. 1335–1353. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1248959>
6. Galygin V.E., Baronin G.S., Tarov V.P., Zavrazhin D.O. *Modern Technologies for the Production and Processing of Polymer and Composite Materials*. Tambov, TSTU, 2012, 179 p. (in Russian)
7. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. Method of metal composite creation with predicted heat conductivity. *Patent RU2739728C1*, 2020. (in Russian)
8. Pavlov S.P., Makarova V.M., Zlobina I.V., Bekrennev N.V. Preconditions of regulation of thermal conductivity of polymer composites based on modeling of heat flow and additive technologies. *Modern High Technologies*, 2018, no. 12-2, pp. 337–342. (in Russian)
9. Bochkareva S.A., Grishaeva N.Yu., Lyukshin B.A., Reutov A.I., Lyukshin P.A. Method for producing composition of composite polymer material with prescribed properties. *Patent RU2668915C2*, 2018. (in Russian)
10. Abuzin J.A., Najmushin A.I., Goncharov I.E., Kochetov V.N. Method of composite material obtainment. *Patent RU2392090C2*, 2010. (in Russian)
11. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. Method for creating two-component composite with given thermal conductivity. *Patent RU2748669C1*, 2021. (in Russian)
12. Dulnev G.N., Zarichniak Iu.P. *Thermal Conductivity of Mixtures and Composite Materials*. Leningrad, Jenergiya Publ., 1974, 264 p. (in Russian)
13. Dulnev G.N., Zarichniak Iu.P. Thermal Conductivity of Multicomponent Mixtures. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 1967, vol. 12, no. 4, pp. 419. (in Russian)

Authors

Yuri P. Zarichnyak — D.Sc. (Physics & Mathematics), Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6701513411](https://orcid.org/0000-0001-8713-3583), <https://orcid.org/0000-0001-8713-3583>, zarich4@gmail.com

Vyacheslav P. Khodunkov — PhD, Senior Researcher, D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, [sc 6504750914](https://orcid.org/0000-0001-9208-7462), <https://orcid.org/0000-0001-9208-7462>, walkerearth@mail.ru