

Методика для расчета коэффициента теплопроводности композиционных материалов

Д. Ционенко, к. ф.-м. н.¹, И. Козловский, к.т.н.²

УДК 536.212.2 | ВАК 2.2.8

Разработана методика для расчета усредненного по объему (эффективного) коэффициента теплопроводности эластичных диэлектрических композиционных материалов, применяемых при производстве теплопроводящих прокладок, которые используются в радиоэлектронном оборудовании для обеспечения требуемых режимов теплоотвода. Методика основана на комбинации численных и аналитических методов решения задачи теплопроводности, что обеспечивает ее высокую вычислительную эффективность. Разработанная методика позволяет рассчитать термическое сопротивление изделий различной формы и сложных гетерогенных структур. На основе разработанной методики сформулированы рекомендации для улучшения эксплуатационных свойств изделий, выполненных из эластичных композитных диэлектрических материалов.

Постоянное развитие технологии изготовления композиционных материалов и расширение сфер их применения требует совершенствования методов анализа прочностных, оптических, тепло- и электрофизических свойств этих материалов [1, 2]. Экспериментальные методы исследования требуют существенного временного ресурса, поскольку варьируется большое число параметров: вещество связующего и наполнителя, тип, размеры и форма частиц наполнителя, его концентрация [3]. Численные методы анализа композитов требуют существенных вычислительных затрат, особенно при большом количестве варьируемых параметров [4]. Применение аналитических методов к анализу композитов ограничено тем, что частицы наполнителя имеют различные формы и расположены нерегулярно. Известные методы расчета усредненного коэффициента теплопроводности по формулам Одолевского, Миснара и Бургера не отражают ряд особенностей, связанных с формой и размерами частиц наполнителя [3]. Уравнение Нильсена [1] учитывает форму частиц наполнителя, но не позволяет анализировать анизотропию свойств композитов. Решения, полученные в работах [5, 6], учитывают форму

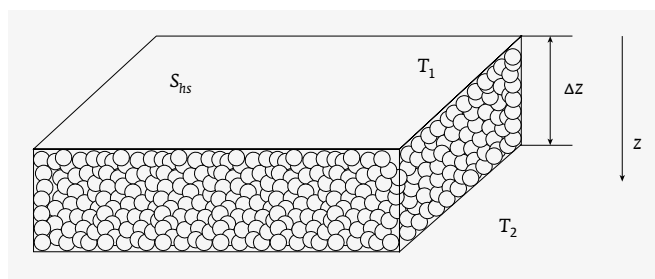


Рис. 1. Структура композита и параметры задачи. Граничные условия: T_1 – температура нагревателя, T_2 – температура радиатора, $T_1 > T_2$

и размеры частиц наполнителя, а также анизотропию теплопроводности композитов. Для использования аналитических моделей на практике необходим также учет нерегулярного расположения частиц наполнителя в матрице и распределения частиц по размерам [7].

Рассматриваемые в рамках данного исследования материалы представляют собой композиты, связующим у которых являются кремнийорганические полимеры, наполнителем – частицы веществ-диэлектриков, обладающих большим значением коэффициента теплопроводности. Частицы наполнителя имеют различную форму, размеры порядка 0,001–0,1 мм и расположены в объеме образца случайным образом (рис. 1).

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), старший научный сотрудник, доцент, tsiond@tut.by.

² ОДО «Евролиния», директор, доцент, eurolinia@mail.ru.

Разработанная методика основана на комбинации численных и аналитических методов, что позволяет существенно сократить количество расчетных операций и подобрать параметры композита для обеспечения минимального термического сопротивления изделий и максимального значения коэффициента теплопроводности материала. Результаты расчета по методике представляют собой усредненные по объему коэффициенты теплопроводности композита и термические сопротивления изделий.

Применение разработанной методики требует выполнения следующих условий, которые часто реализованы на практике:

- Источники и стоки тепла должны быть установлены на противоположных поверхностях изделия (см. рис. 1).
- Площади источников S_{hs} и стоков должны быть не менее чем на два порядка больше, чем максимальная площадь поперечного сечения частиц наполнителя.
- Расстояние между источниками Δz должно быть на порядок больше максимального размера частиц наполнителя d_{max} .
- Частицы наполнителя однородны и располагаются равномерно по объему. Зависимость плотности и теплопроводности от температуры не анализируется.

СУЩНОСТЬ МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ РАСЧЕТОВ

В рамках методики вводится понятие минимальных ячеек, которые представляют собой элементарные объемы, пространственной трансляцией которых может быть представлена структура композита. Элементарная ячейка формируется следующим образом: частицы наполнителя дополняются материалом связки до куба (параллелепипеда) соответствующих размеров (a или a, b) (рис. 2).

В основу разработанной методики расчета положена модель, базирующаяся на представлении сложной гетерогенной структуры эквивалентной схемой тепловых сопротивлений. Методика расчета реализуется посредством следующего алгоритма.

- Задать следующие исходные данные для вычисления термического сопротивления минимальной ячейки: форма и размеры частиц наполнителя, его коэффициент теплопроводности λ_1 и материала связки λ_0 .

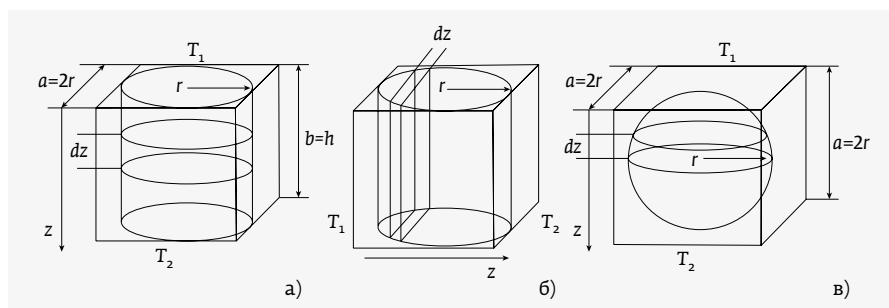


Рис. 2. Примеры элементарных ячеек при различных направлениях градиента температур (ось z): а – для цилиндра, градиент направлен вдоль оси цилиндра; б – для цилиндра, градиент направлен перпендикулярно оси цилиндра; в – для шара

- Рассчитать численным методом или аналитически термическое сопротивление элементарной ячейки в зависимости от направления градиента температур.
 - Разбить элементарную ячейку на слои при помощи плоскостей, перпендикулярных направлению градиента и расположенных на расстоянии dz друг от друга.
 - В каждом i -м сечении толщиной dz определить термическое сопротивление элемента частицы наполнителя площадью $S_i(z)$ и элемента связки площадью $a_2 - S_i(z)$ (или $a \cdot b - S_i(z)$) (см. рис. 2).

$$dR_{i1} = \frac{dz}{\lambda_1 \cdot S_i(z)}, \quad dR_{i0} = \frac{dz}{\lambda_0 \cdot (a^2 - S_i(z))} \quad (1)$$

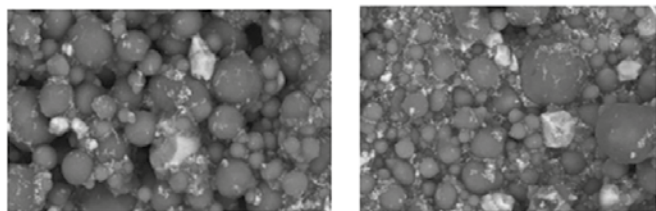
- Вычислить термическое сопротивление i -го слоя ячейки толщиной dz :

$$dR_{Ti} = \frac{dz}{\lambda_1 \cdot S_i(z) + \lambda_0 \cdot (a^2 - S_i(z))} \quad (2)$$

- Выполнить (аналитически или численно) интегрирование по переменной z в пределах высоты элементарной ячейки.

$$dR_T = \int_0^a \frac{dz}{\lambda_1 \cdot S_i(z) + \lambda_0 \cdot (a^2 - S_i(z))} \quad (3)$$

- Задать массу наполнителя m_1 и плотность материала наполнителя ρ_1 . Рассчитать минимальный объем связки, необходимый для формирования образца, в котором отсутствуют незаполненные полости (рис.3) и толщину слоя связки между частицами наполнителя.
 - Для частиц наполнителя шарообразной и цилиндрической формы минимальный объем



а)

б)

Рис. 3. Частицы наполнителя в связующем веществе: а – объем связки меньше минимального, присутствуют воздушные полости; б – минимальный объем связки приводит к формированию плотноупакованной структуры

материала связки вычисляется по следующим формулам соответственно:

$$V_{\min b} = \frac{6m_1}{\pi \cdot \rho_1} \cdot (1 - \pi/6), \quad V_{\min c} = \frac{4m_1}{\pi \cdot \rho_1} \cdot (1 - \pi/4). \quad (4)$$

- Формула (4) определяет максимальное объемное содержание сферических частиц 0,524 (минимальное объемное содержание связующего 0,476) и цилиндрических частиц наполнителя 0,79 и связки 0,21 при их положении в узлах кубической пространственной решетки.
- Для обеспечения требуемой эластичности, объем связки должен быть больше минимального, рассчитанного по формуле (4). На практике, дополнительный объем связующего ΔV_0 не делится поровну между элементарными ячейками, и в ряде случаев остается контакт между частицами наполнителя. При построении модели наихудшего случая (рассчитывается минимальный коэффициент теплопроводности), полагается, что объем связки ΔV_0 , дополнительный по отношению к минимальному, делится поровну между элементарными ячейками (при их равномерном пространственном распределении). К каждой ячейке размером a добавляется слой связки толщиной Δa :

$$\Delta a = a \cdot \left(\left(1 + \frac{\pi \cdot \rho_1 \Delta V_0}{6m_1} \right)^{1/3} - 1 \right). \quad (5)$$

- Рассчитать термическое сопротивление полученной ячейки с дополнительным слоем связки по формуле:

$$R_{CT} = \left(R_T^1 + \lambda_0 \Delta a \left(2 + \frac{\Delta a}{a} \right) \right)^{-1} + \left(\frac{\Delta a}{\lambda_0 (a + \Delta a)^2} \right), \quad (6)$$

где R_T – термическое сопротивление элементарной ячейки, рассчитанное по формуле (3).

- Полученные соотношения очевидным образом обобщаются на случай, когда композит состоит из частиц размером a_1 с долей $p_1 = N_1/N_f$, размером a_2 с долей $p_2 = N_2/N_f$, и т. д., размером a_n с долей $p_n = N_n/N_f$, где $N_f = N_1 + N_2 + \dots + N_n$.
- Модель позволяет рассматривать частицы различных форм, поскольку расчет термического сопротивления элементарной ячейки может осуществляться и аналитически, и численно.
- Построить эквивалентную схему замещения, состоящую из термических сопротивлений, рассчитанных по формуле (6), с учетом формы, размеров и структуры изделия (рис. 4).
- Рассчитать термическое сопротивление изделия на основе его эквивалентной схемы замещения, используя методы расчета электрических цепей постоянного тока, что допустимо при выполнении условий применимости модели, указанных выше.
- Определить усредненный по объему (эффективный) коэффициент теплопроводности композита, из которого выполнено изделие.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

- Рассчитаны термические сопротивления элементарных ячеек, соответствующих частицам наполнителя в форме цилиндров при разных направлениях градиента температур и элементарных ячеек, соответствующих сферическим частицам (рис. 5). Рассчитаны также коэффициенты теплопроводности композитов, которые представляют собой плотноупакованные структуры (при $\Delta V_0 = 0$), представленные элементарными ячейками указанных типов, расположенными в узлах кубической пространственной решетки. На практике композиты с такой идеальной структурой получить весьма сложно, поскольку размеры частиц наполнителя в общем случае не одинаковы, их распределение в связующем веществе неупорядоченно, присутствуют примеси и воздушные полости (см. рис. 3).

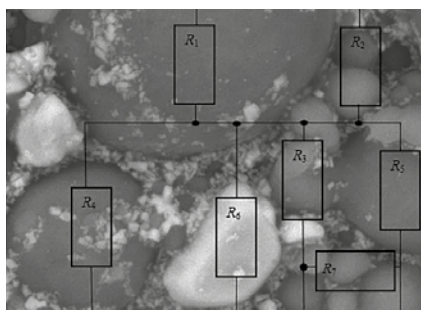


Рис. 4. Пример построения эквивалентной схемы термических сопротивлений для двумерного среза композита. Градиент температур направлен сверху вниз

- В рамках разработанной методики осуществлен расчет коэффициента теплопроводности различных композитов, применяемых на практике.
- Рассмотрим влияние концентрации частиц наполнителя в связующем веществе на значение коэффициента теплопроводности композита. Пространство между частицами наполнителя заполнено связкой. Наполнитель – шарообразные частицы оксида алюминия (Al_2O_3): $\lambda_1 = 40 \text{ Вт/(м·К)}$ [8], связка – силикон $\lambda_0 = 0,13 \text{ Вт/(м·К)}$ [8]. Частицы имеют сферическую форму, средний диаметр частиц $a = 5 \text{ мкм}$. С использованием разработанной методики получаем, что эффективный коэффициент теплопроводности для композитного материала с минимальным содержанием связки $\lambda_{\text{max}} = 9,2 \text{ Вт/(м·К)}$, однако такой композит не может быть получен в условиях производства. Измеренный эффективный коэффициент теплопроводности композита на основе силикона и оксида алюминия для материалов, используемых для изготовления прокладок, равен $2...2,5 \text{ Вт/(м·К)}$ [9], что соответствует объемной доле связки $0,55$. Проведено сравнение результатов (рис. 6), полученных в рамках разработанной модели и моделях, основанных на формуле $\lambda_c = \lambda_0 \cdot v_0 + \lambda_1 \cdot (1 - v_0)$ (взвешенное среднее) и формуле Нильсена [1, с. 63]:

$$\lambda_c = \lambda_0 \cdot \frac{1 + A \cdot B \cdot (1 - v_0)}{1 - B \cdot \psi \cdot (1 - v_0)}, \quad A = k_E - 1, \\ B = \frac{\lambda_1 / \lambda_0 - 1}{\lambda_1 / \lambda_0 + A}, \quad \psi = 1 + \frac{1 + P_f}{P_f^2} \cdot (1 - v_0), \quad (7)$$

где v_0 – объемная доля связки, k_E – коэффициент, определяющий форму частиц наполнителя, $P_f = 0,524$ – максимально возможная объемная доля наполнителя в данной упаковке.

- Рассмотрим композит с наполнителем Al_2O_3 (масса наполнителя $m_1 = 2 \text{ г}$, плотность $\rho_1 = 3970 \text{ кг/м}^3$), в котором присутствуют включения воздуха $\lambda_2 = 0,022 \text{ Вт/(м·К)}$, имеющие сферическую форму в несжатом состоянии и размеры $a_2 = a_1 = 10 \text{ мкм}$, равные размерам частиц наполнителя (рис. 7). Теплопроводность связки $\lambda_0 = 0,13 \text{ Вт/(м·К)}$. Для

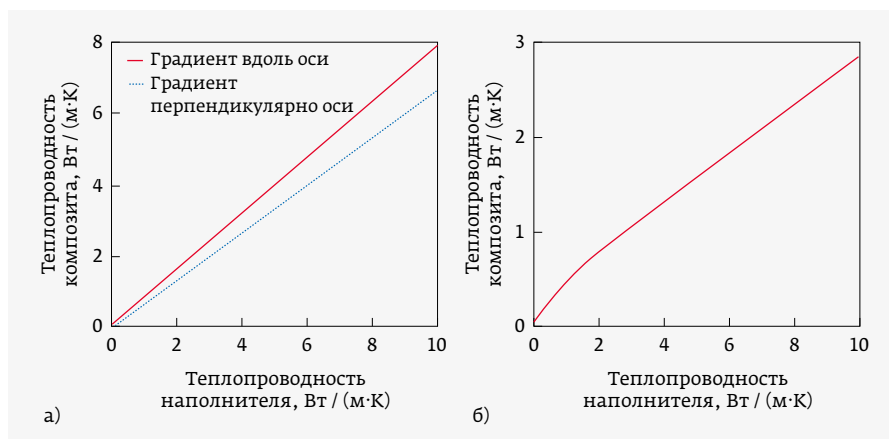


Рис. 5. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от теплопроводности материала частиц наполнителя для плотноупакованной кубической структуры: а – для цилиндрических частиц наполнителя; б – для частиц наполнителя в форме шара. Параметры моделирования: диаметр каждой частицы $0,01 \text{ мм}$, материал связки – силикон, $\lambda_0 = 0,13 \text{ Вт/(м·К)}$

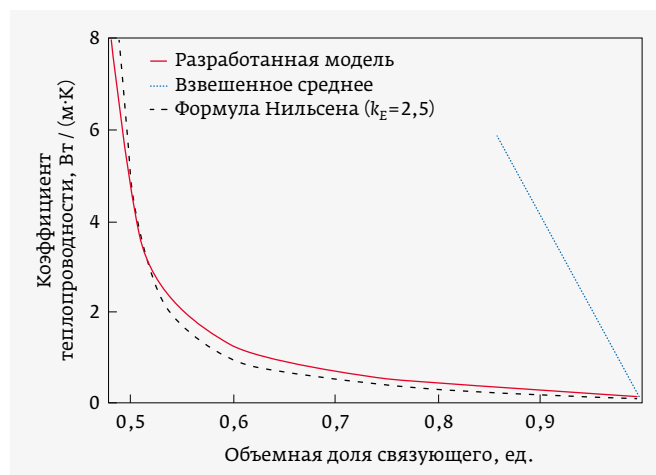


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности однородного композита от объемной доли связующего вещества

описания содержания воздуха, введем параметр k_a , равный отношению числа воздушных полостей к числу частиц наполнителя. Результаты расчета в зависимости от объема связки для различного содержания включений воздуха k_a представлены на рис. 7.

- Произведен расчет термического сопротивления гетерогенной структуры, которая представляет собой пластину композита толщиной $0,2 \text{ мм}$ [9], армированного сеткой из волокон стекла, теплопроводность $\lambda_c = 1,0 \text{ Вт/(м·К)}$ [8]. Композит – однородная смесь из частиц оксида алюминия Al_2O_3 ,

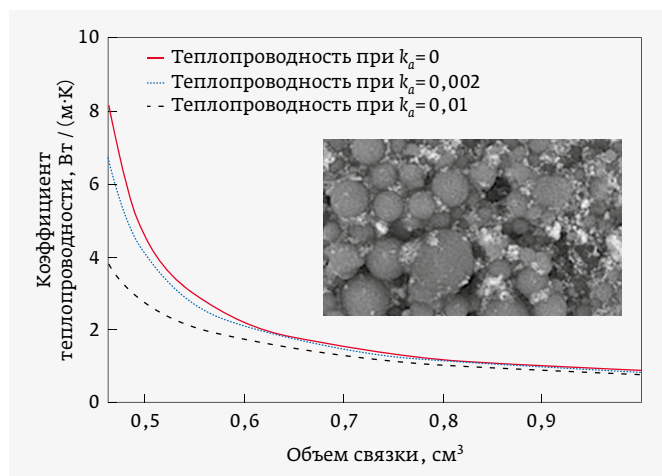


Рис. 7. Эффективная теплопроводность несжатого композита в зависимости от объема связки для различного содержания включений воздуха

связка – силикон. По фотографии структуры прокладки, представленной на рис. 8 [9], определяем, что средний размер частиц наполнителя равен 7 мкм, средняя толщина слоя материала связки между частицами 3 мкм (толщина слоя, добавляемого при расчетах к размену элементарной ячейки $\Delta a = 1,5$ мкм). Диаметр стеклянной нити 6 мкм, размер ячейки армирующей сетки 18 мкм.

Термическое сопротивление единицы площади описанной выше структуры, рассчитанное по разработанной методике, равно $R_{gs_0} = 2,64$ К/Вт/см². При изменении толщины Δa слоя связки между элементарными ячейками от значения 1,5 мкм до 1 мкм, термическое сопротивление становится равным $R_{gs_1} = 2,01$ К/Вт/см², а при уменьшении Δa до значения 0,5 мкм (что соответствует допустимому сжатию) получаем $R_{gs_2} = 1,24$ К/Вт/см². Результаты, полученные на основе применения разработанной методики, коррелируют с результатами, представленными в [9] для изделий в виде пластин из композита, армированного стеклянной сеткой.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Полученные в рамках модели результаты позволяют установить общие закономерности теплопроводности композитов в зависимости от характеристик частиц наполнителя и объемной доли связки. Значения, рассчитанные с использованием методики, согласуются с результатами измерений для изделий, используемых на практике, что подтверждает адекватность разработанных моделей и методики расчета. Результаты расчета коррелируют с результатами, полученными по модели Нильсена, но разработанная методика позволяет

рассматривать многокомпонентные композиты, в том числе с частицами наполнителя произвольной формы, а также учитывать анизотропию теплопроводности композитов.

На основе полученных результатов может быть сформулирован ряд рекомендаций для повышения коэффициента теплопроводности композитов и эффективности изделий, используемых для отвода теплоты с нагретых поверхностей.

- **Предлагается следующая модификация структуры. В композит с равномерно распределенными по объему малыми частицами наполнителя добавляются крупные частицы.** В результате получается структура, роль связки в которой играет не чистый полимер, обладающий малой теплопроводностью, а композит, теплопроводность которого существенно выше, чем у полимера. Полученная структура изображена на рис. 9. Материал изготовлен следующим образом: масса порошка наполнителя Al_2O_3 с частицами малого размера диаметром 1 мкм равна 2 г, связка – силикон ($\lambda_0 = 0,13$ Вт/(м·К)) объемом $V_0 = 1$ см³. Теплопроводность полученного материала, который будет выступать в качестве связки, равна $\lambda_{0n} = 0,84$ Вт/(м·К). Затем в полученный композит вносятся частицы наполнителя Al_2O_3 (масса 1 г) большого размера: диаметр шара 10 мкм. Сравнение рассчитанных коэффициентов при замене $\lambda_0 = 0,13$ Вт/(м·К) на $\lambda_{0n} = 0,84$ Вт/(м·К) представлено на рис. 9.
- **Одним из методов, повышающих эффективность теплопроводящих прокладок, является создание упорядоченных структур в объеме материала.** Как было установлено выше, элементарная ячейка с частицей наполнителя в форме цилиндра обладает минимальным термическим сопротивлением, если градиент температур приложен вдоль оси цилиндра. Соответственно, композитный материал, состоящий из элементарных ячеек такого типа, будет обладать максимальным коэффициентом теплопроводности. Для минимизации термического сопротивления изделий эффективно использовать



Рис. 8. Структура прокладки, сделанной из композита, армированного сеткой

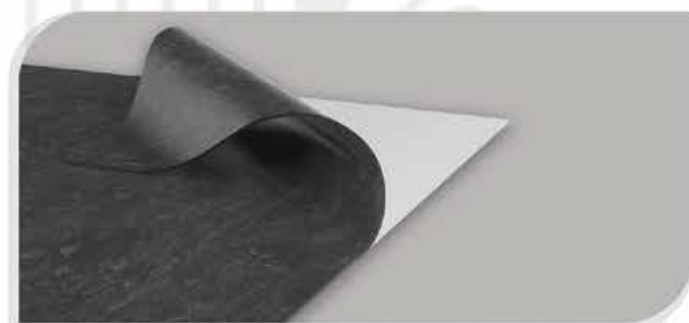
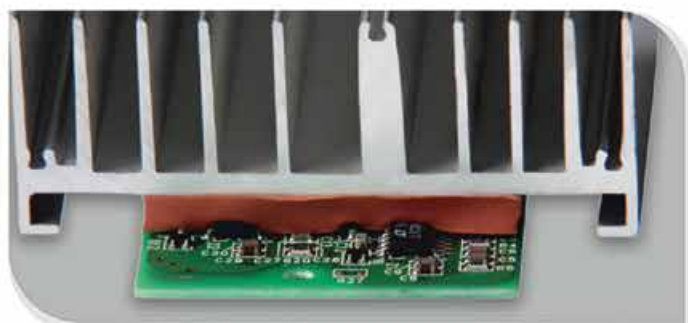
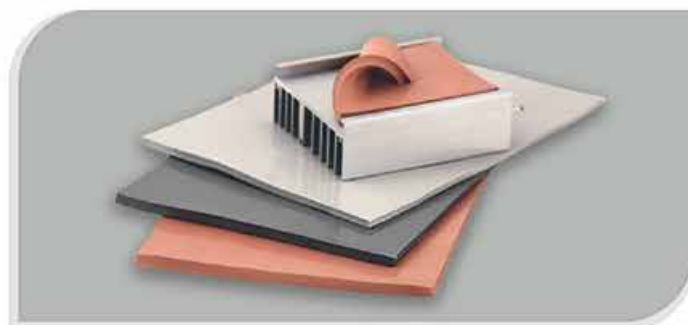
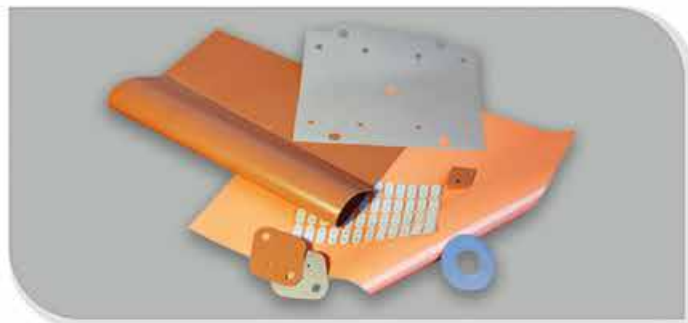
**КПТД – КЕРАМИКО-ПОЛИМЕРНЫЕ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ
ПРОИЗВОДСТВА ОДО "ЕВРОЛИНИЯ".**

ЛИСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОДЛОЖКИ

- ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ – 0,8 – 2,7 Вт/м К;
- ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ – 15 – 20 кВ/мм
- ТОЛЩИНА – 0,2 – 6 мм
- УПРОЧНЕНИЕ – СТЕКЛОТКАНЬ (ДО ТОЛЩИНЫ 2 мм)
- ПОЗИЦИОНИРУЮЩИЙ ЛИПКИЙ СЛОЙ

**ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ КОМПАУНДЫ
И ПАСТЫ ДЛЯ КАПСУЛИРОВАНИЯ
И СБОРОК ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ**

- ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ – 0,2 – 2,5 Вт/мК;
- ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ ОТ 6000 ДО 18000 МПА С
- ТВЕРДОСТЬ ПО ШОРУ – ОТ 35 ДО 80
- ВРЕМЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ – ОТ 3 Ч



ООО «НОМАКОН»

 **+7 (495) 729-59-24**

 **INFO@NOMACON.RU**

 **Г. МОСКВА, НИЖНИЙ СУСАЛЬНЫЙ ПЕР., 5/12**

 **WWW.NOMACON.RU**

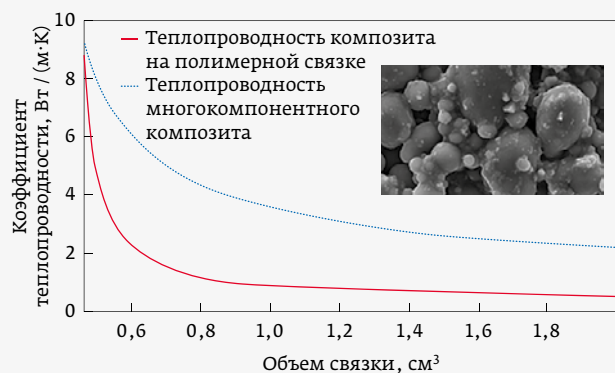


Рис. 9. Композит, включающий смесь крупных и мелких частиц наполнителя. Коэффициенты теплопроводности композита из крупных частиц в силиконовой связке (красная линия) и композита, содержащего мелкую и крупную фракции (синяя линия)

в качестве наполнителя материал в форме волокон с высокой теплопроводностью. Волокна должны быть ориентированы вдоль градиента температур. Разработка технологии создания таких материалов является перспективным направлением исследований компании «Евролиния».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кац Д.С., Милевски Д.В.** Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справочное пособие / Пер. с англ. М.: Химия, 1981. 736 с.
2. **Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С.** Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. № 10-3. С. 459–465.
3. **Михеев В. А., Сулаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д.** Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 7. С. 571–575.
4. **Димитриенко Ю.И., Соколов А.П.** Метод конечных элементов для решения локальных задач механики композиционных материалов: учеб. пособие / М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 66 с.
5. **Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю.** Эффективный коэффициент теплопроводности композита с шаровыми включениями // Тепловые процессы в технике. 2012. № 10. С. 470–474.
6. **Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю.** Эффективный коэффициент теплопроводности композита, армированного волокнами // Известия вузов. Машиностроение. 2013. № 5. С. 75–81.
7. **Марков А.В.** Теплопроводность полимеров, наполненных дисперсными частицами. Модель // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2008. Т. 50. № 4. С. 709–719.
8. TermalInfo. Свойства оксида алюминия Al_2O_3 и магния MgO. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/oksidy/svojstva-oksid-aluminiya-al2o3-i-magniya-mgo>. Теплофизические свойства, теплопроводность силикона. Режим доступа <http://thermalinfo.ru/svojstva-zhidkostej/organicheskie-zhidkosti/teplofizicheskie-svojstva-teploprovodnost-silikona> Дата обращения 01.11.2023
9. Номакон Евролиния. Термическое сопротивление КПДТ-материалов. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://nomacon.by/ru/production/thermally-conductive-dielectric-elastic-materials/> Дата обращения 11.11.2023.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 840 руб.

ЭТАЛОНЫ И СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ. ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ

Лукашкин В. Г., Булатов М. Ф.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России (2012–2018 годы)»

В книге рассмотрены общие вопросы метрологического обеспечения и единицы физических величин. Изложены основные задачи технических средств метрологического обеспечения в области электрорадиоизмерений. Даны оценки погрешности и неопределенности первичных и рабочих эталонов.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам при выборе и обосновании эталонной базы в области электрорадиоизмерений, а также специалистам, занимающимся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2018. – 402 с.,
ISBN 978-5-94836-512-1

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphere.ru, sales@technosphere.ru



22
31
десятилетие
науки и технологий

23—26 апреля 2024

СВЯЗЬ

36-я международная
выставка «Информационные
и коммуникационные технологии»

Экспозиция «Навитех» —
«Навигационные системы, технологии и услуги»

www.sviaz-expo.ru



Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



12+
Реклама

Организатор



При поддержке



Под патронатом



В рамках

