

Анализ механических и теплопроводящих свойств керамико-полимерных диэлектрических материалов

В. Тарасик¹, И. Козловский², Д. Ционенко³, А. Лешок⁴

УДК 621.38 | ВАК 2.2.8

Проведен анализ механических свойств и характеристик теплопроводности керамико-полимерных теплопроводящих диэлектрических (КПТД) материалов и изготовленных из них теплопроводящих прокладок, применяемых при производстве радиоэлектронного оборудования. Рассмотрены свойства различных изделий, выполненных из композитных материалов, отличающихся связующим, материалом наполнителя и формой его частиц. Предложена обобщенная методика расчета упругих свойств композитов, позволяющая на основе единого подхода оценить теплопроводность КПТД-материалов и проанализировать их механические свойства (плотность, модуль упругости по отношению к сжатию).

Широкое использование теплопроводящих прокладок, изготовленных из композитных материалов [1], в частности, из керамико-полимерных теплопроводящих диэлектрических (КПТД) материалов, обусловлено не только приемлемым значением коэффициента теплопроводности (от 0,7 до 5 Вт/(м·К)), но и рядом их технологических свойств. К этим свойствам относятся упругость и способность к адгезии с различными поверхностями, что обеспечивает существенное понижение термического сопротивления системы «нагреватель – теплопроводящая прокладка – радиатор». Важную роль играют в ряде случаев диэлектрические свойства композитов, обеспечивающие отсутствие электрического пробоя между контактами радиоэлектронных компонентов.

Изучению методов, позволяющих согласованно максимизировать коэффициент теплопроводности композитных материалов и обеспечить требуемые механические свойства изделий из них, посвящено большое количество работ, основанных как на аналитических [2–5], так и на экспериментальных [6–8] подходах.

Данная статья посвящена разработке обобщенной методики расчета упругих свойств композитов, позволяющей на основе единого подхода оценить теплопроводность КПТД-материала и проанализировать его механические свойства (плотность, модуль упругости по отношению к сжатию). В работе также представлены результаты измерений величины относительной деформации, возникающей при сжатии образцов, выполненных из различных КПТД-материалов и коэффициента теплопроводности образцов в зависимости от приложенного давления.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УПРУГИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ

В работе [9] представлена методика расчета эффективного коэффициента теплопроводности композитных материалов, основанная на комбинации численных и аналитических методов. В данной работе эта методика обобщена для анализа упругих свойств изделий из КПТД-материалов при их сжатии.

В рамках методики расчета определяются минимальные ячейки, пространственной трансляцией которых может быть представлена структура композита. Элементарная ячейка формируется следующим образом: частицы наполнителя дополняются материалом связующего до куба (параллелепипеда) соответствующих размеров. Примеры осколочных частиц и геометрическая модель элементарной ячейки для частиц этого типа представлена на рис. 1.

¹ ОДО «Евролиния», инженер-электроник, eurolinia@mail.ru.

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

³ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, старший научный сотрудник, tsiond@tut.by.

⁴ ГНУ Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, старший научный сотрудник, sdilav@tut.by.

Исходными данными для расчета являются: форма и характерные размеры a , (a, b) частиц наполнителя, плотность материала наполнителя ρ_1 , коэффициент упругости E_1 материала наполнителя, материал связующего и его характеристики (плотность ρ_0 , коэффициент упругости E_0), масса связующего m_0 и наполнителя m_1 (или их массовые доли).

Методика расчета аналогична методике расчета эффективного коэффициента теплопроводности, которая представлена в [9]. Расчет осуществляется следующим образом.

1. Рассчитать численным методом или аналитически коэффициент жесткости элементарной ячейки в зависимости от формы частиц наполнителя и направления приложенного сжимающего усилия. Для этого:

- 1.1. Разбить элементарную ячейку на слои при помощи плоскостей, перпендикулярных направлению приложенного усилия. Например, (см. рис. 1), слои расположены на расстоянии dz друг от друга при приложении усилия вдоль оси Oz .

- 1.2. В каждом i -м сечении толщиной dz определить жесткость элемента частицы наполнителя

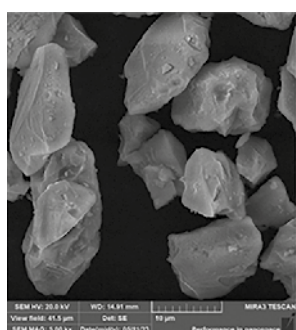
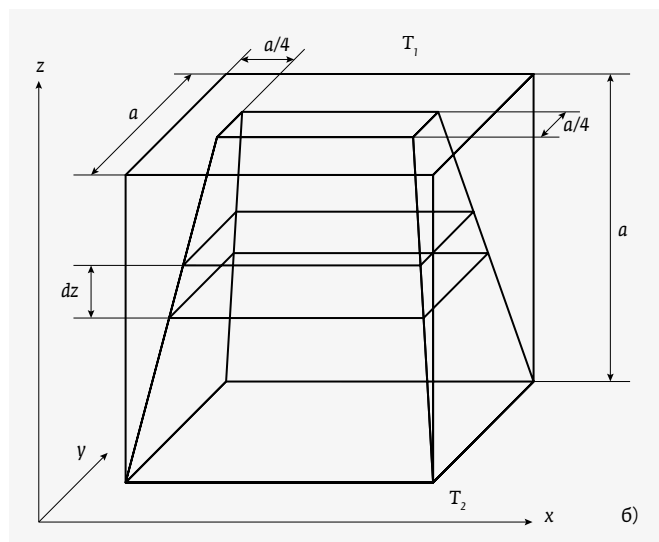


Рис. 1. Примеры осколочных частиц наполнителя и геометрическая модель элементарной ячейки для осколочной частицы в виде усеченной пирамиды с основаниями $a \times a$ и $a/2 \times a/4$: а – форма частиц керамического порошка; б – геометрическая модель частицы порошка

а)



б)

площадью $S_i(z)$ и элемента связки площадью $a^2 - S_i(z)$ (или $a \cdot b - S_i(z)$ для частиц цилиндрической или конической формы [9]) по формулам:

$$dk_{li} = \frac{E_1 \cdot S_i(z)}{dz}, dk_{oi} = \frac{E_0 \cdot (a^2 - S_i(z))}{dz}. \quad (1)$$

- 1.3. Вычислить жесткость i -го слоя ячейки толщиной dz , считая что элемент частицы наполнителя и элемент связующего находятся под действием одного и того же сжимающего усилия, то есть, соединены параллельно:

$$dk_{li} = \frac{E_1 \cdot S_i(z) + E_0 \cdot (a^2 - S_i(z))}{dz}. \quad (2)$$

- 1.4. Учитывая, что слои соединены последовательно, выполнить (аналитически или численно) интегрирование по переменной dz в пределах высоты элементарной ячейки:

$$k_{cz} = \left(\int_0^a \frac{dz}{E_1 \cdot S_i(z) + E_0 \cdot (a^2 - S_i(z))} \right)^{-1}. \quad (3)$$

2. Выполнить п. 1.1–1.3 данного алгоритма для направлений вдоль осей Ox и Oy .
3. Полученные значения k_{cx} , k_{cy} , k_{cz} подставить в формулу:

$$\langle k \rangle = \frac{k_{cx} + k_{cy} + k_{cz}}{3} \quad (4)$$

для усреднения по направлениям, под которыми элементарные ячейки могут быть ориентированы по отношению к направлению приложенного усилия, сжимающего образец.

4. Рассчитать минимальный объем связующего, который необходим для формирования образца, в котором отсутствуют незаполненные (воздушные) полости.

- 4.1. Для частиц наполнителя шарообразной и цилиндрической формы минимальный объем связующего вычисляется по следующим формулам соответственно [9]:

$$V_{min\ ball} = \frac{6m_1}{\pi \cdot \rho_1} \cdot (1 - \pi/6), V_{min\ cyl} = \frac{4m_1}{\pi \cdot \rho_1} \cdot (1 - \pi/4). \quad (5)$$

5. Для осколочных частиц в соответствии с моделью усеченной пирамиды, представленной на рис. 1б, минимальный объем связующего определяется формулой:

$$V_{min\ frag} = \frac{m_1}{3 \cdot \rho_1}. \quad (6)$$

6. Для обеспечения требуемой эластичности, объем связующего должен быть больше минимального, рассчитанного по формулам (5) и (6). При

построении модели полагается, что объем связующего ΔV_0 , дополнительный по отношению к минимальному, делится поровну между N элементарными ячейками одинакового размера. К каждой ячейке размером a добавляется слой связующего толщиной Δa :

$$\Delta a = a \cdot \left(\left(1 + \frac{\Delta V_0}{N} \right)^{1/3} - 1 \right). \quad (7)$$

6.1. Полученные соотношения очевидным образом обобщают 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 $N_f = N_1 + N_2 + \dots + N_n$. При этом дополнительный объем связующего ΔV_0 делится между элементарными ячейками одинакового размера пропорционально площадям их поверхностей, тогда получаем систему уравнений:

$$\Delta a_k = a_k \cdot \left(\left(1 + \frac{\Delta V_{0k}}{N_k} \right)^{1/3} - 1 \right),$$

$$\Delta V_0 = \sum_{k=1}^n \Delta V_{0k} p_k, \quad \Delta V_{0k} / \Delta V_{0j} = a_k^2 / a_j^2. \quad (8)$$

6.2. Модель позволяет рассматривать частицы различных форм, поскольку расчет термического сопротивления элементарной ячейки может осуществляться и аналитически, и численно.

7. Рассчитать жесткость полученной ячейки с дополнительным слоем связующего толщиной Δa (выраженной по (7) или (8)) по формуле:

$$k_{ck} = \left[\left(\langle k \rangle + 4E_0 \Delta a_k \left(1 - \frac{\Delta a_k}{a_k} \right) \right)^{-1} + \frac{\Delta a_k}{2E_0 \cdot (a_k + 2\Delta a_k)^2} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где $\langle k \rangle$ – жесткость элементарной ячейки, рассчитанная по формуле (4).

8. Из элементарных ячеек скомпоновать образец, форма которого максимально близка к форме куба, в каждом двумерном слое которого доля ячеек размером $a_1 + \Delta a_1$ равна p_1 , доля ячеек размером $a_2 + \Delta a_2$ равна p_2 и т. д. (рис. 2).

8.1. Примечание. Если $a_1/a_2 > 5$, то для анализа рассмотреть модифицированное связующее, представляющее собой однородный композит с наполнителем из частиц малого размера (a_2). Считать, что в него погружены частицы большого размера (a_1).

9. Рассчитать жесткость слоя, представив его как параллельное соединение ячеек, жесткость которых

определена формулой (9). Рассчитать эффективную жесткость $\langle k_{eff} \rangle$ образца в форме куба, соединив слои последовательно.

10. Определить усредненный по объему (эффективный) коэффициент упругости композита при сжатии:

$$E_{eff} = \frac{\langle k_{eff} \rangle}{l_0}, \quad l_0 = \sum_{k=1}^n N_k (a_k + \Delta a_k), \quad (10)$$

где $\langle k_{eff} \rangle$ определено в п. 9, Δa_k рассчитывается по формуле (8) и $N_k = p_k N_{side}$, N_{side} – полное число ячеек в одной стороне куба, представляющего образец моделируемого композита.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Измерения относительного сжатия образцов и коэффициента теплопроводности (на основе термического сопротивления системы «нагреватель – прокладка – радиатор») проводились в лаборатории контроля качества группы компаний «Номакон-Евролиния». Методика измерения коэффициента теплопроводности соответствовала стандарту ASTM D 5470-06 (рис. 3). Инструментальная погрешность измерений, регламентированная производителем оборудования, составляет 0,03%.

Измерения проводились при следующих значениях параметров: температура нагревателя (верхний цилиндр) постоянна и равна 70 °С, температура радиатора (нижний цилиндр) постоянна и равна 20 °С. Сжимающее усилие изменялось с шагом 10 Н от 10 Н до 70 Н для образцов со связующим в виде геля и от 10 Н до 100 Н для образцов с каучуковым связующим. Установка обеспечивает автоматическое поддержание постоянного значения усилия в процессе измерения. Толщина образцов в несжатом состоянии определена при помощи микромера, а при приложении нагрузки – посредством индукционного датчика относительного перемещения цилиндров, сжимающих образец. Время измерения, в течение которого обеспечивается стационарность теплового потока выбрано равным 100 с. Образцы представляют собой цилиндры малой высоты и диаметра

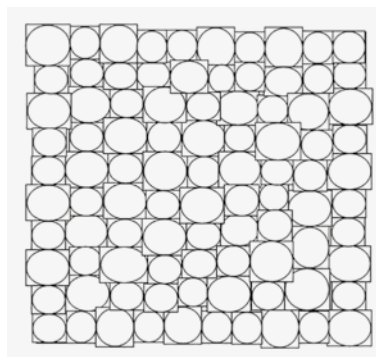


Рис. 2.
Пример
двумерного слоя
двухкомпонентного
композита
с минимальным
объемом связующего.
Соотношение
размеров частиц
 $a_1/a_2 = 5/4$, $p_1 = 0,4$,
 $p_2 = 0,6$



Рис. 3. Измеритель теплопроводности методом теплового потока по стандарту ASTM D 5470-06

30 мм. Плотность образцов измерена аналитическими весами FA Series Analytical Balance Model FA1004XN, инструментальная погрешность 0,02.

Результаты, полученные для образцов с каучуковым наполнителем. При изготовлении образцов использовался синтетический кремнийорганический низкомолекулярный термостойкий каучук, керамические порошки осколочной формы. Составы и свойства исследуемых материалов приведены в табл. 1.

Полученные графики зависимости для относительного сжатия образца ($\epsilon = (l_0 - l)/l_0$), где l_0 – толщина недеформированного образца и коэффициента теплопроводности, от приложенного усилия, сжимающего образец, приведены на рис. 4.

Нелинейность упругих свойств композитного материала, не описываемая представленной выше моделью, объясняется поверхностными эффектами и флуктуациями в распределении частиц наполнителя внутри объема материала. Первый фактор определяется технологией изготовления образцов: газы, образующиеся при полимеризации каучука, не могут свободно покинуть

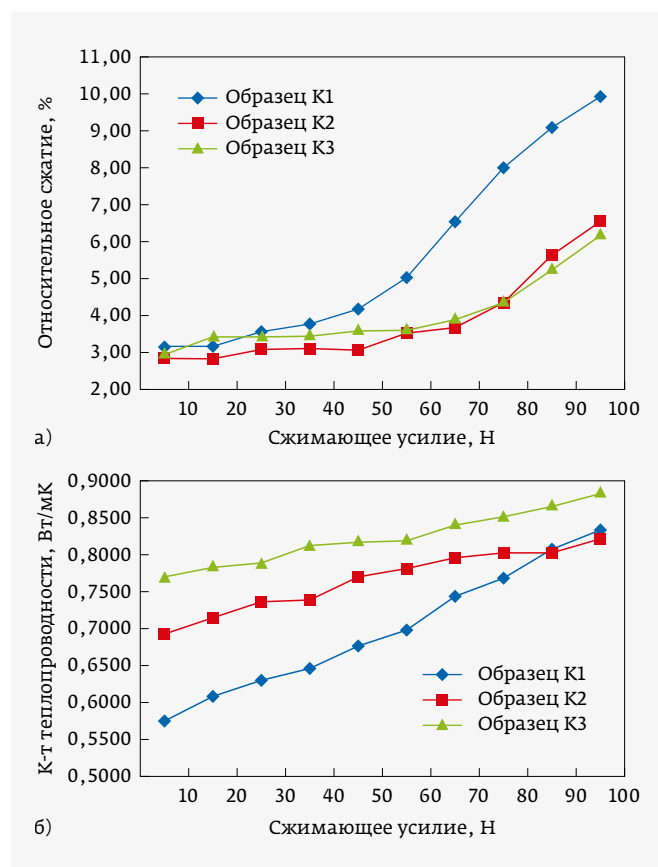


Рис. 4. Результаты измерения для образцов K1, K2, K3: а – зависимость относительного сжатия от приложенной нагрузки; б – зависимость коэффициента теплопроводности от приложенной нагрузки

объем и создают микropopы на поверхности. Второй фактор приводит к тому, что, помимо деформаций сжатия, реализуются сдвиги частиц друг относительно друга, что приводит к образованию более плотной упаковки структуры. Результаты измерения теплопроводности для образца K2, поверхность которого покрыта теплопроводящей смазкой для предотвращения поверхностных эффектов, в сравнении с результатами для образца без смазки, представлены на рис. 5.

Таблица 1. Составы материалов на связке из термостойкого каучука

Обозначение материала	Содержание каучука, об. %	Содержание керамических порошков, об. %	Исходная толщина образца, мм	Размер частиц порошка, мкм	Плотность материала, г/см ³
K1	56	44	1,18	2,7–9,5	2,06
K2	53	47	1,15	2,7–4,2	2,29
K3	50	50	1,08	2,7–9,5	2,22

Результаты, полученные для образцов с наполнителем в виде геля. При изготовлении образцов использовался синтетический кремнийорганический низкомолекулярный термостойкий гель. В образцах G1 и G2 использовались порошки осколочной формы, в образце G3 использовались порошки сферической формы с размером частиц 5–70 мкм. Составы и свойства исследуемых материалов приведены в табл. 2.

Графики зависимости относительного сжатия и коэффициента теплопроводности от приложенного усилия для образцов на связке из термостойкого геля представлены на рис. 6.

Нелинейность упругих свойств в случае композитов на гелевом связующем наблюдается только для высоконаполненного образца со сферическими частицами наполнителя и связана с активацией сдвиговых деформаций при достижении критического давления. Поверхностные эффекты не играют существенной роли в этом случае.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Разработанная обобщенная модель оценки теплопроводности и коэффициента упругости композитов [9]

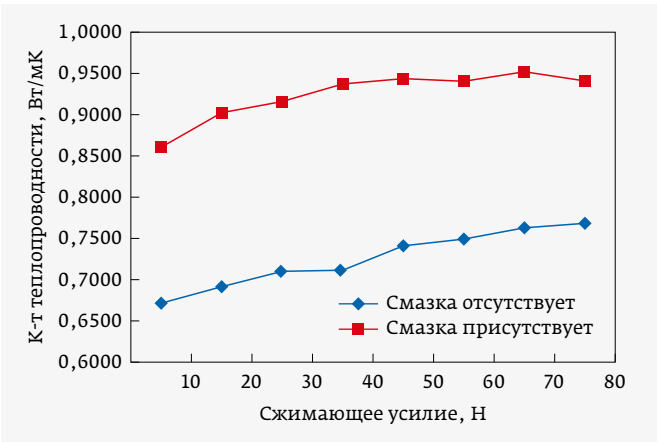


Рис. 5. Влияние теплопроводящей смазки, нанесенной на поверхность образца K2, на измеренные значения теплопроводности

Таблица 2. Составы материалов на связке из термостойкого геля

Обозначение материала	Содержание геля, об.%	Содержание керамических порошков, об.%	Исходная толщина образца, мм	Размер частиц порошка, мкм	Плотность материала, г/см ³
G1	60	40	3,39	2,7–9,5	1,96
G2	54	46	2,63	2,7–9,5	1,95
G3	36	74	2,75	4,6–32,3	2,60

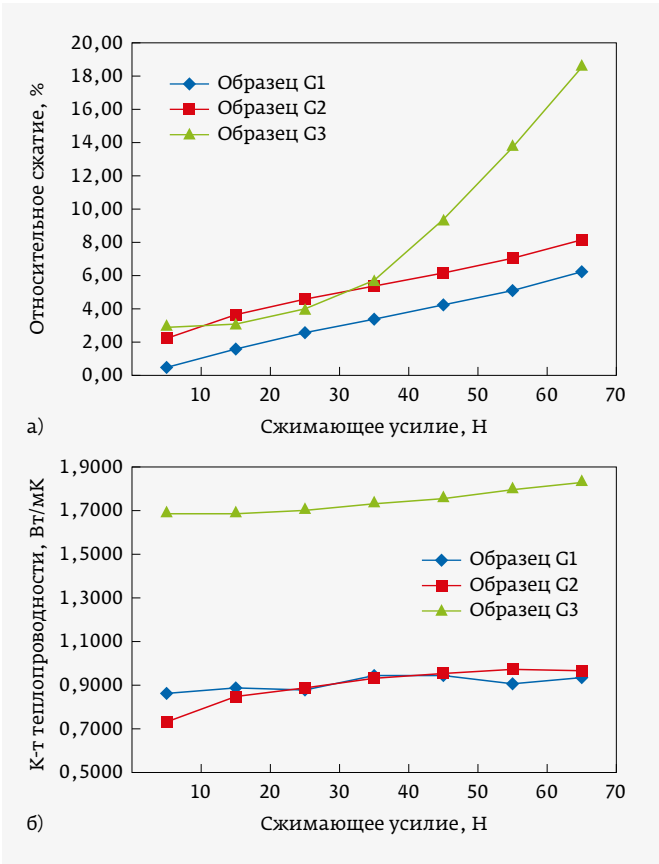


Рис. 6. Результаты измерения для образцов G1, G2, G3: а – зависимость относительного сжатия от приложенной нагрузки; б – зависимость коэффициента теплопроводности от приложенной нагрузки

в зависимости от характеристик частиц наполнителя и связующего позволяют на основе единого подхода проанализировать основные характеристики теплопроводящих прокладок, необходимые для их практического использования.

На основе полученных результатов могут быть сформулированы следующие рекомендации по эффективному использованию прокладок различных типов, используемых для отвода теплоты с нагретых поверхностей.



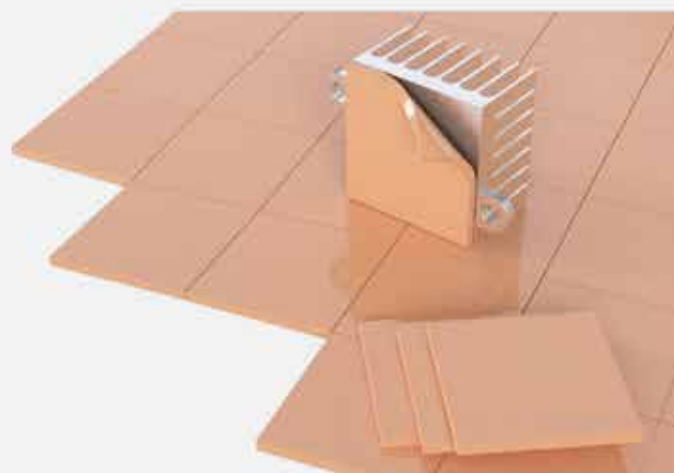
КПТД материалы

-это 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 ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И СБОРОК

- ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ 0,2-2,5 Вт/М К
- ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ от 6000 до 18 000 мПа с
- ТВЕРДОСТЬ ПО ШОРУ от 15 до 80
- ВРЕМЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ от 20 мин



+7 (495) 729-59-24



info@nomacon.ru



www.nomacon.ru

г. Москва, Нижний сусальный пер., 5/12

ООО «НОМАКОН»

Во-первых, прокладки с каучуковым связующим являются достаточно жесткими. Это является технологическим преимуществом, поскольку позволяет их многократное использование. Однако эффективность использования этих прокладок очень сильно зависит от качества сопрягаемых поверхностей [10]. Для минимизации поверхностных эффектов этот тип прокладок рекомендуется использовать в комбинации с теплопроводящей смазкой, которая устраняет поры на поверхности и обеспечивает плотное прилегание прокладки даже в случае неидеальной плоскостности поверхности, с которой осуществляется отвод тепла. Данный тип прокладок выдерживает давление до 80 МПа, что может быть использовано для повышения их теплопроводности по месту установки.

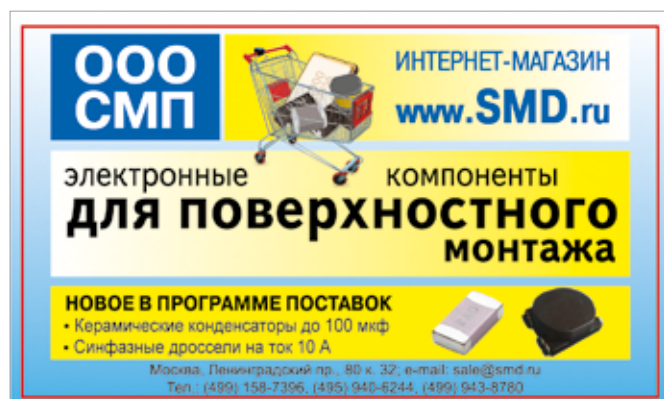
Во-вторых, прокладки с гелевым связующим являются более эластичными и принимают форму поверхности, на которую они устанавливаются, даже при небольших усилиях. Это обеспечивает минимизацию поверхностных эффектов. Данный тип прокладок обладает остаточной липкостью, что также в некоторых случаях обеспечивает удобство их монтажа.

В-третьих, как было отмечено в [9], для повышения коэффициента теплопроводности композита следует использовать смесь сферических частиц существенно различающихся по размеру. Этот вывод был подтвержден экспериментально для высоконаполненного материала на гелевом связующем (образец G3). У некоторых образцов, выполненных из этого материала, наблюдалось длительное последствие, то есть увеличение теплопроводности после предварительного нагрева под давлением, но это эффект требует дополнительного изучения.

Авторы выражают благодарность начальнику лаборатории контроля качества ОДО «Евролиния» Халецкой М.Л. за помощь в подготовке экспериментальных образцов и проведении измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кац Д.С., Милевски Д.В.**
Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справочное пособие:
Пер. с англ. М. Химия, 1981. 736 с.
2. **Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю.**
Эффективный коэффициент теплопроводности композита, армированного волокнами // Изв. вузов. Машиностроение. 2013. № 5. С. 75–81.
3. **Зарубин В.С., Новожилова Щ.В., Шишкина С.И.**
Оценки упругих характеристик композита с короткими изотропными волокнами // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки». 2017. №1. С. 4–15.
4. **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.
5. **Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю.**
Сравнительный анализ оценок модулей упругости композита. Изотропные шаровые включения // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение», 2014. №5. С. 53–69.
6. **Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Мүшенко В.Д.**
Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 7. С. 571–575.
7. **Карпович О.И., Наркевич А.Л., Хрол Е.З., Петрушеня А.Ф., Поженко Я.И.**
Физико-механические свойства композиционных материалов на основе полимерсодержащих отходов ОАО «Белцветмет» // Труды БГАТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2015. № 4. С. 78–82.
8. **Фатыхов М.А., Еникеев Т.И., Акимов Е.А.**
Механические свойства композиционных материалов в зависимости от температурного режима их изготовления // Вестник ОГУ, Том 2. Естественные и технические науки. 2006. №2. С. 87–92.
9. **Ционенко Д.А., Козловский И.Л.**
Методика для расчета коэффициента теплопроводности композиционных материалов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука. Технологии. Бизнес. 2024. №2. С. 53–61.
10. **Номакон Евролиния [Электронный ресурс]**
Термическое сопротивление КПДТ-материалов. Режим доступа <https://nomacon.by/ru/production/thermally-conductive-dielectric-elastic-materials/>
Дата обращения 16.08.2024.





АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭЛЕКОНД

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	3,2 ... 485
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ,	1,0 ... 470 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 125



Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	3,2 ... 200
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ,	1,5 ... 60 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 175



Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	2,5 ... 63
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ,	0,033 ... 2 200
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 175



Суперконденсаторы K58-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	2,5 ... 2,7
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф,	1,0 ... 4 700
Диапазон температур среды и эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 65



Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	5,0 ... 48
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф,	0,08 ... 783
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 65



Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, д. 3
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48
e-mail: elecond-market@elcudm.ru; www.elecond.ru