

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В. А. МИХЕЕВ¹, В. Ш. СУЛАБЕРИДЗЕ², В. Д. МУШЕНКО²

¹ Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова,
190005, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vladislav-miheev@mail.ru

² Общество с ограниченной ответственностью „СТОЛП“, 191028, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены вопросы моделирования эффективной теплопроводности трехкомпонентных композиций на основе полимерных связующих СКГН-А, Сурэл-7 и порошков минеральных наполнителей SiO₂, SiC, Al₂O₃, AlN в широком диапазоне значений объемного содержания включений. Актуальность подбора композиций с двумя наполнителями обусловлена потребностями в разработке компаундов с требуемыми теплопроводностью, прочностными и деформационными характеристиками. Предложен практически реализуемый подход к моделированию теплопроводности гетерогенных композиций с различным содержанием двух наполнителей, базирующийся на экспериментальном определении эффективной теплопроводности двухкомпонентных композиций с одинаковым связующим и различными наполнителями, а также дальнейшем расчете эффективной теплопроводности трехкомпонентных смесей на основе множественной регрессии. Адекватность модели обеспечивается проверкой в нескольких точках по объемному содержанию наполнителей, теплопроводность в которых определяется экспериментально. Приведены интерполяционные уравнения, описывающие теплопроводность композиций на основе полимерных связующих с двумя наполнителями. Предложено простое соотношение для практических оценок эффективной теплопроводности трехкомпонентных композиций, основанное на оцененной по экспериментальным данным для двухкомпонентных композиций эффективной теплопроводности агрегатов частиц наполнителя.

Ключевые слова: теплопроводность, полимеры, композиционные материалы, наполнитель, связующее, трехкомпонентная смесь, множественная регрессия

Актуальность подбора композиций с двумя наполнителями (далее — трехкомпонентные композиции) обусловлена потребностью в замене импортных наполнителей на отечественные, в разработке композиций не только с требуемой теплопроводностью, но и с требуемыми прочностными и деформационными характеристиками, а также в достижении заданных значений характеристик при минимальной стоимости компаунда. В настоящей работе исследуются композиции для теплопроводных диэлектрических покрытий.

В работе [1] предложены два пути моделирования теплопроводности многокомпонентных гетерогенных композиций с изолированными включениями:

1) одновременный учет свойств всех компонентов смеси по формуле Оделевского [1]:

$$\lambda = \lambda_{\text{CB}} \left\{ \frac{V_1}{1-V_{\text{CB}}} \left[1 - \frac{1-V_{\text{CB}}}{\frac{1}{(1-v_1)} - \frac{V_{\text{CB}}}{3}} \right] + \frac{V_2}{1-V_{\text{CB}}} \left[1 - \frac{1-V_{\text{CB}}}{\frac{1}{(1-v_2)} - \frac{V_{\text{CB}}}{3}} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $v_1 = \lambda_1/\lambda_{\text{CB}}$; $v_2 = \lambda_2/\lambda_{\text{CB}}$; λ , λ_{CB} , λ_1 , λ_2 — коэффициенты теплопроводности композиции, связующего, первого и второго наполнителя соответственно; V_{CB} , V_1 , V_2 — объемные доли связующего, первого и второго наполнителя соответственно;

2) последовательное включение всех компонентов.

Во многих публикациях, посвященных исследованию гетерогенных структур, отмечается, что частицы наполнителя образуют агрегаты и агломераты, а при наличии нескольких соединений наполнителя — конгломераты. Следовательно, по большей части гетерогенные смеси не являются механическими и это существенно затрудняет моделирование их свойств, в частности эффективной теплопроводности [1—3]. На практике согласие известных аналитических формул эффективной теплопроводности и экспериментальных данных, за исключением модельных экспериментов, достигается путем конструирования формул с использованием метода инверсии компонентов и определения эффективной теплопроводности агломератов наполнителя [3—8]. Теплопроводность агломератов наполнителя существенно ниже теплопроводности его кристаллических частиц. Другими словами, в двухкомпонентных смесях имеет место межфазное взаимодействие, которое необходимо учитывать с помощью эмпирических коэффициентов при моделировании теплопроводности. При контакте частиц и матрицы образуется так называемый межфазный слой — определенный объем полимера-матрицы, прилегающий непосредственно к границе раздела фаз полимер/наполнитель, структура и свойства которого отличаются от свойств самой матрицы. В связующем и поверхностных слоях частиц наполнителей межфазного слоя, как правило, содержатся низкомолекулярные включения [9].

Агрегация и агломерация частиц существенно усложняют картину взаимодействия матрицы и наполнителя на границе раздела фаз. Агрегаты частиц могут иметь значительную удельную открытую поверхность, при этом их внутренняя поверхность в десятки раз больше геометрической. Степень проникновения связующего к внутренней открытой поверхности агрегатов и агломератов твердых частиц зависит от таких свойств компонентов дисперсной композиции, как поверхностное натяжение, адгезия, химические связи и др.

Теоретическое описание и учет вклада всех перечисленных особенностей в перенос тепла в гетерогенном материале с несколькими видами наполнителей практически невозможны [9, 10]. К тому же нет исчерпывающего описания свойств компонентов разрабатываемых гетерогенных композиций. Как правило, в нормативной документации указываются основные свойства материала, позволяющие выбрать его, в частности, для разработки гетерогенной композиции с соответствующими свойствами.

С учетом сказанного представляется рациональным на практике использовать разработанный авторами настоящей статьи метод, предполагающий расчет эффективной теплопроводности трехкомпонентных смесей на основе множественной регрессии. Метод основан на данных об эффективной теплопроводности двухкомпонентных композиций с одинаковым связующим и различными наполнителями. По совокупности экспериментальных данных для различных двухкомпонентных смесей на основе статистического анализа формируются интерполяционные уравнения. Из этих уравнений определяются значения теплопроводности в точках равномерного разбиения на требуемом диапазоне значений объемного содержания наполнителя. Затем для требуемой пары наполнителей в программе статистического анализа (например, Statistica) находится уравнение множественной регрессии, по которому и вычисляется эффективная теплопроводность трехкомпонентной смеси. Корректность полученного уравнения определяется проверкой в нескольких точках (рис. 1) по объемному содержанию наполнителей, теплопроводность в которых определяется экспериментально. Результат обработки представляется в виде регрессионного уравнения.

Моделирование двухкомпонентных систем основано на формулах Оделевского [1] или Миснара [11] с применением инверсии компонентов (так называемое „смешивание проводимостей“). На основе сравнения этих расчетов с экспериментальными данными оценивается эффективная теплопроводность наполнителя, уравнение которой учитывает упомянутые выше характеристики фазы наполнителя и особенности ее взаимодействия с матрицей [4, 5].

Полученное значение эффективной теплопроводности агрегатов наполнителя используется для расчетов по другим известным моделям, в том числе для трехкомпонентных композиций.

С помощью предложенного метода исследовались комбинации порошков наполнителей (табл. 1): кварц молотый пылевидный, алюминий нитрид чистый (серый), алюминий нитрид особо чистый (белый), электрокорунд, материал шлифовальный из карбида кремния и двух связующих: диметилсилоксановый каучук СКТН-А и полиуретан Сурэл-7.

Таблица 1

Наполнитель	Содержание примесей, %	Содержание влаги в порошке, %	Гранулометрический состав
SiO ₂	<2	<2	>160 мкм ≤1 %; >100 мкм ≤2,5 %; >63 мкм ≤10 %; ≤50 мкм ≥82 %
AlN (серый)	<2	<1	<50 мкм ≥98 %
AlN (белый)	<2	<1	<50 мкм ≥98 %
Al ₂ O ₃	<0,5	—	<80 мкм ≥95 %
SiC	<3	—	<80 мкм ≥96 %

Интерполяционные формулы эффективной теплопроводности исследованных композиций ($\lambda_{эф}$) с двумя наполнителями, их коэффициент множественной корреляции (R^2) и дисперсия распределения отклонений расчетных значений от экспериментальных (S) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Связующее	Наполнитель		Формула теплопроводности
	1	2	
СКТН-А	SiO ₂	SiC	$\lambda_{эф} = 0,242 + 0,0079V_1 + 0,0228V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,0003V_1V_2 + 7,78 \cdot 10^{-5}V_2^2$ $R^2=0,991; S=0,029$
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	$\lambda_{эф} = 0,240 + 0,0081V_1 + 0,0175V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,0002V_1V_2 + 1,67 \cdot 10^{-5}V_2^2$ $R^2=0,984; S=0,029$
	SiO ₂	AlN бел.	$\lambda_{эф} = 0,259 + 0,0069V_1 + 0,0446V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,0002V_1V_2 + 4,95 \cdot 10^{-6}V_2^2$ $R^2=0,995; S=0,032$
	SiO ₂	AlN сер.	$\lambda_{эф} = 0,254 + 0,0072V_1 + 0,0182V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,0003V_1V_2 + 0,0001V_2^2$ $R^2=0,987; S=0,034$
	SiC	Al ₂ O ₃	$\lambda_{эф} = 0,226 + 0,0238V_1 + 0,0184V_2 + 6,53 \cdot 10^{-5}V_1^2 + 7,14 \cdot 10^{-5}V_1V_2 + 6,01 \cdot 10^{-6}V_2^2$ $R^2=0,998; S=0,010$
	SiC	AlN бел.	$\lambda_{эф} = 0,245 + 0,0226V_1 + 0,0454V_2 + 8,01 \cdot 10^{-5}V_1^2 + 7,45 \cdot 10^{-5}V_1V_2 - 5,26 \cdot 10^{-6}V_2^2$ $R^2=0,999; S=0,014$
	SiC	AlN сер.	$\lambda_{эф} = 0,241 + 0,0229V_1 + 0,019V_2 + 7,65 \cdot 10^{-5}V_1^2 + 0,0002V_1V_2 + 0,0001V_2^2$ $R^2=0,995; S=0,023$
	Al ₂ O ₃	AlN бел.	$\lambda_{эф} = 0,239 + 0,0176V_1 + 0,0457V_2 + 1,61 \cdot 10^{-5}V_1^2 + 6,13 \cdot 10^{-6}V_1V_2 - 9,97 \cdot 10^{-6}V_2^2$ $R^2=0,999; S=0,0044$
	Al ₂ O ₃	AlN сер.	$\lambda_{эф} = 0,235 + 0,0179V_1 + 0,0193V_2 + 1,25 \cdot 10^{-5}V_1^2 + 0,0002V_1V_2 + 0,0001V_2^2$ $R^2=0,995; S=0,022$
Сурэл-7	AlN бел.	AlN сер.	$\lambda_{эф} = 0,24 + 0,0449V_1 + 0,0182V_2 + 1,96 \cdot 10^{-6}V_1^2 + 0,0001V_1V_2 + 0,0001V_2^2$ $R^2=0,997; S=0,025$
	SiO ₂	SiC	$\lambda_{эф} = 0,425 + 0,0098V_1 + 0,0108V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,0005V_1V_2 + 0,0003V_2^2$ $R^2=0,97; S=0,046$
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	$\lambda_{эф} = 0,433 + 0,0102V_1 + 0,0166V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,0004V_1V_2 + 7,17 \cdot 10^{-5}V_2^2$ $R^2=0,97; S=0,046$
	SiO ₂	AlN бел.	$\lambda_{эф} = 0,434 + 0,0092V_1 + 0,0155V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,001V_1V_2 + 0,0008V_2^2$ $R^2=0,94; S=0,127$
	SiO ₂	AlN сер.	$\lambda_{эф} = 0,436 + 0,0093V_1 + 0,0389V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,0002V_1V_2 + 1,825 \cdot 10^{-5}V_2^2$ $R^2=0,994; S=0,034$
	SiC	Al ₂ O ₃	$\lambda_{эф} = 0,422 + 0,011V_1 + 0,0173V_2 + 0,0003V_1^2 + 0,0003V_1V_2 + 6,3 \cdot 10^{-5}V_2^2$ $R^2=0,98; S=0,040$
SiC	AlN бел.	$\lambda_{эф} = 0,405 + 0,012V_1 + 0,0173V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,001V_1V_2 + 0,0008V_2^2$ $R^2=0,94; S=0,127$	

Продолжение таблицы 2

Связующее	Наполнитель		Формула теплопроводности
Сурэл-7	SiC	AlN сер.	$\lambda_{\text{эф}} = 0,406 + 0,012V_1 + 0,0407V_2 + 0,0002V_1^2 + 0,0002V_1V_2 - 4,639 \cdot 10^{-6}V_2^2$ $R^2=0,992; S=0,040$
	Al ₂ O ₃	AlN бел.	$\lambda_{\text{эф}} = 0,431 + 0,0167V_1 + 0,0157V_2 + 7,05 \cdot 10^{-5}V_1^2 + 0,0009V_1V_2 + 0,0008V_2^2$ $R^2=0,96; S=0,129$
	Al ₂ O ₃	AlN сер.	$\lambda_{\text{эф}} = 0,433 + 0,0166V_1 + 0,039V_2 + 7,16 \cdot 10^{-5}V_1^2 + 8,74 \cdot 10^{-5}V_1V_2 + 1,616 \cdot 10^{-5}V_2^2$ $R^2=0,999; S=0,012$
	AlN бел.	AlN сер.	$\lambda_{\text{эф}} = 0,415 + 0,0167V_1 + 0,0401V_2 + 0,0008V_1^2 + 0,0008V_1V_2 + 2,352 \cdot 10^{-6}V_2^2$ $R^2=0,963; S=0,130$

При построении графиков эффективной теплопроводности двухкомпонентных композиций SiO₂+AlN+СКТН-А (рис. 1, а) и SiO₂+AlN+Сурэл-7 (рис. 1, б) использовались формулы из табл. 2.

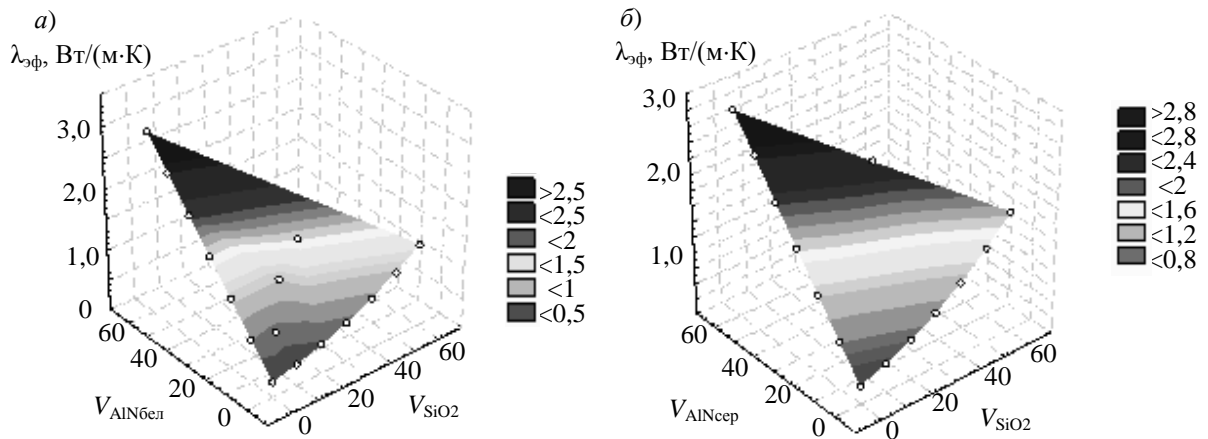


Рис. 1

Сравнение данных, приведенных в табл. 2, с расчетами по формуле (1) показало: если использовать значения теплопроводности агрегатов наполнителей, полученные по формулам Оделевского и Миснара для двухкомпонентных составов предложенным выше методом, то расчеты дают заниженные значения эффективной теплопроводности композиций (значения занижены тем сильнее, чем больше объемное содержание наполнителя (V_n) и отношение λ_n/λ_{cb}). Причем чем выше λ_n по сравнению с λ_{cb} , тем меньше от λ_n зависит расчетное значение λ , определяемое V_{cb} , V_1 , V_2 и величиной λ_{cb} . При $\lambda_n/\lambda_{cb} \geq 100$ формула (1) занижает значение λ более чем на 40 %, при $\lambda_n/\lambda_{cb} \geq 250$ — более чем на 60 % и т.д.

Из отношений коэффициентов K_i и K_j при переменных V_1 и V_2 (K_i/K_j) в формулах для трехкомпонентных смесей (табл. 2) следуют закономерная связь с отношениями теплопроводности наполнителей (λ_i/λ_j) и практически прямо пропорциональная зависимость от произведения $[(\lambda_i/\lambda_j)(\rho_j/\rho_i)]$ (рис. 2). Это соответствует теоретическим представлениям о механизме теплопроводности твердого тела (формула Дебая). На этом основании необходимо в указанное произведение добавить отношение удельных теплоемкостей наполнителей C_j/C_i , но для рассматриваемых в работе наполнителей они примерно одинаковы, поэтому включение этого множителя несущественно уточняет выявленную закономерность.

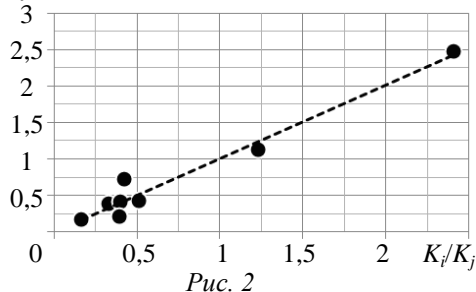


Рис. 2

Из указанной пропорциональной зависимости следует, что коэффициент K_i при V_i связан со свойствами i -го наполнителя следующим образом: $K_i = c\lambda_i/(\rho_i C_i) = ca_i$ ($c = \text{const}$ — безразмерный коэффициент, a_i — температуропроводность i -го компонента). Универсальность и

применимость этой взаимосвязи для расчетов эффективной теплопроводности различных трехкомпонентных смесей показана ниже.

Из табл. 2 следует, что в большинстве случаев для приблизительных расчетов можно ограничиться двумя линейными членами уравнения регрессии, тогда можно записать выражение:

$$a = a_{\text{св}} V_{\text{св}} + c [a_1 V_1 + a_2 V_2], \quad (2)$$

где a , $a_{\text{св}}$, a_1 , a_2 — температуропроводность композиции, связующего, первого и второго наполнителя соответственно.

Формула (2) удовлетворяет лишь одному предельному переходу [1], а именно при $V_1=V_2=0$ $a \equiv a_{\text{св}}$. Для того чтобы она удовлетворяла второму предельному переходу при $V_{\text{св}}=0$ $a \equiv a_{\text{н}}$, необходимо, по аналогии с формулой Бургера для одного наполнителя [12], в левой части выражения добавить множитель: $[V_{\text{св}} + c(V_1 + V_2)]$. На рис. 3 приведены результаты оценок коэффициента c модифицированной таким образом формулы (2) для исследованных композиций наполнителей и связующих. Хорошо прослеживается степенная зависимость c от $\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{св}}$. В трехкомпонентных композициях значения $\lambda_{\text{н}}$ принимались как средневзвешенные для конкретных пропорций наполнителей.

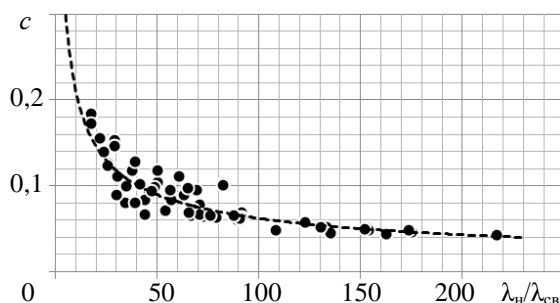


Рис. 3

Следует заметить, что для соответствия третьему предельному переходу [1] должно соблюдаться условие при $\lambda_{\text{н}}=\lambda_{\text{св}}$ $c=1$.

Сравнение расчетов по модифицированной формуле (2) и формуле Бургера для одного наполнителя показало, что отношение коэффициентов c в них для SiO_2 равно 1, а для остальных наполнителей меняется от 0,75 до 0,9. В расчетах эффективной теплопроводности трехкомпонентных композиций это характеризует степень влияния теплоемкостей компонентов и самой композиции. К этому следует добавить, что в диапазоне объемного содержания наполнителя от 0,1 до 0,6 в композициях с разными наполнителями SiO_2 — $\rho C=1,1$; AlN и SiC — 1,2; Al_2O_3 — 1,35 (ρ и C — плотность и теплоемкость композиции). Чем выше плотность наполнителя, тем больше это изменение. Такие незначительные изменения значения ρC , а следовательно и отношений $(\rho C)/(\rho_i C_i)$, позволяют предположить, что упрощение формулы (2) путем исключения из нее этих отношений не повлияет существенно на расчетные значения эффективной теплопроводности исследованных композиций. После исключения отношений $(\rho C)/(\rho_i C_i)$ выражение для эффективной теплопроводности композиции с двумя наполнителями запишется в виде:

$$\lambda_{\text{эф1}} [V_{\text{св}} + c(V_1 + V_2)] = \lambda_{\text{св}} V_{\text{св}} + c [\lambda_1 V_1 + \lambda_2 V_2]. \quad (3)$$

В такой форме выражение (3) практически повторяет формулу Бургера, но записанную для композиции с двумя наполнителями. Для всех композиций, приведенных в табл. 2, проведены расчеты по формулам (2) и (3). Результаты расчетов по формуле (2) отличались от интерполяционных значений эффективной теплопроводности на 20 % при доверительной вероятности 0,95. При этом коэффициент c рассчитывался по формуле $c=(\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{св}})^{-0,6}$. Аналогичный результат получен и в расчетах по формуле (3), но при $c=(\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{св}})^{-0,65}$. На рис. 4 сравниваются результаты расчетов ($\lambda_{\text{эф1}}$) по формуле (3) при $c=(\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{св}})^{-0,65}$ с данными табл. 2. Таким обра-

зом, исключение отношений $(\rho C)/(\rho_i C_i)$ при соответствующей корректировке коэффициента c не влияет существенно на результаты расчетов эффективной теплопроводности трехкомпонентных композиций.

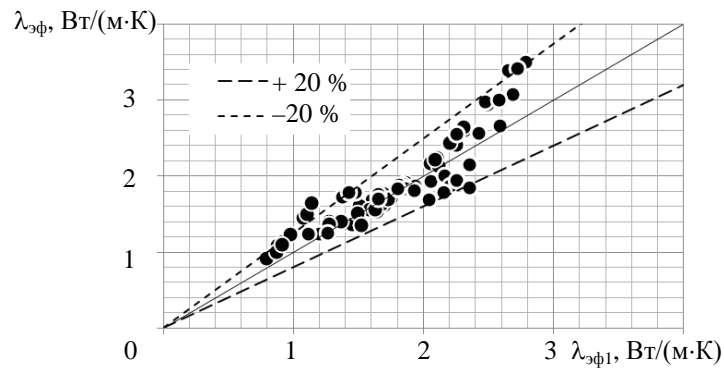


Рис. 4

Отметим еще раз, что формула (3) удовлетворяет всем предельным переходам [1]. Отличительной особенностью расчетов по формуле (3) от расчетов по формулам Оделевского и Миснара является то, что применение метода инверсии компонентов не требуется, но вводится зависимость $c=f(\lambda_n/\lambda_{св})$. Формула (3), таким образом, вполне применима для практических расчетов эффективной теплопроводности трехкомпонентных композиций в широком диапазоне значений наполнителя. Однако нужно иметь в виду, что на практике (не в модельных экспериментах) агломерация частиц наполнителя существенно влияет на эффективную теплопроводность наполнителя. Оценить ее можно в расчетно-экспериментальных исследованиях композиций с одним наполнителем, как предложено выше.

Таким образом, реализованный в работе подход к моделированию теплопроводности трехкомпонентных композиций позволяет по экспериментальным данным для композиций с одним наполнителем и на основе измерений теплопроводности композиций с двумя наполнителями в контрольных точках построить уравнение множественной регрессии, адекватно описывающее их эффективную теплопроводность в широком диапазоне содержания наполнителей.

Эффективность статистического моделирования теплопроводности сложных композиций подтверждается и в других работах [10, 13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974.
2. Chen H., Ginzburg V. V., Yang J., Yang Y., Liu W., Huang Y., Du L., Chen B. Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications // Progress in Polymer Science [Электронный ресурс]: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670016000216>>.
3. Михеев В. А., Сулаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д. Зависимость теплопроводности композиционного материала на основе силикона от объемного содержания нитрида бора // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 4. С. 317—322.
4. Михеев В. А., Сулаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 167—172.
5. Михеев В. А., Сулаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д. Теплопроводность заливочных компаундов на основе силикона для диэлектрических теплопроводящих покрытий в электронике // Сб. тез. 5-й Междунар. конф. по проблемам термометрии „Температура-2015“. СПб: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2015. С. 245—247.
6. Xu J. Z., Gao B. Z., Kang F. Y. A reconstruction of Maxwell model for effective thermal conductivity of composite materials // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 102, N 6. P. 972—979.

7. Zhou F., Cheng G. Lattice Boltzmann model for predicting effective thermal conductivity of composite with randomly distributed particles: Considering effect of interactions between particles and matrix // *Computational Materials Science*. 2014. Vol. 92. P. 157—165.
8. Gao B. Z., Xua J. Z., Peng J. J., Kanga F. Y., Dua H. D., Lia J., Chianga S. W., Xua C. J., Hua N., Ninga X. S. Experimental and theoretical studies of effective thermal conductivity of composites made of silicone rubber and Al₂O₃ particles // *Thermochimica Acta*. 2015. Vol. 614, N 20. P. 1—8.
9. Кербер М. Л. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технологии. СПб: Профессия, 2008.
10. Agrawal A., Satapathy A. Mathematical model for evaluating effective thermal conductivity of polymer composites with hybrid fillers // *Intern. J. of Thermal Sciences*. 2015. Vol. 89. P. 203—209.
11. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир, 1968.
12. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962.
13. Xua J., Gaoa B., Dua H., Kanga F. A statistical model for effective thermal conductivity of composite materials // *Intern. J. of Thermal Sciences*. 2016. Vol. 104. P. 348—356.

Сведения об авторах

- Владислав Александрович Михеев** — соискатель; БГТУ „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра инжиниринга и менеджмента качества; преподаватель; АО „Северный пресс“; инженер-конструктор 2-й категории;
E-mail: vladislav-miheev@mail.ru
- Владимир Шалвович Сулаберидзе** — д-р техн. наук; ООО „СТОЛП“
- Василий Дмитриевич Мушенко** — канд. хим. наук; ООО „СТОЛП“; генеральный директор

Рекомендована кафедрой
инжиниринга и менеджмента качества

Поступила в редакцию
10.03.16 г.

Ссылка для цитирования: Михеев В. А., Сулаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д. Моделирование теплопроводности трехкомпонентных композиций // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 7. С. 584—591.

SIMULATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF THREE-COMPONENT COMPOSITION

V. A. Mikheev¹, V. Sh. Sulaberidze², V. D. Mushenko²

¹D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH,
190005, St. Petersburg, Russia
E-mail: vladislav-miheev@mail.ru

²STOLP Ltd., 191028, St. Petersburg, Russia

The problems of modeling of effective thermal conductivity of three-component compositions on the base of polymer binding agents SKTN-A, Sural-7 and powder mineral fillers SiO₂, SiC, Al₂O₃, AlN in a wide range of values of the volume content of inclusions. The relevance of the selection of compositions with two fillers is said to meet the needs in the development of compounds with the desired conductivity, strength and deformation characteristics. A practical and feasible approach to simulation of thermal conductivity of heterogeneous composites with different content of the two fillers is proposed on the base of experimental determination of effective thermal conductivity of two-component compositions with the same binder and various fillers and further calculating the effective thermal conductivity of three-component mixtures with the use of multiple regression. The adequacy of the model is ensured by checking at several points in the volumetric content of fillers, with the thermal conductivity of corresponding compositions determined experimentally. An interpolation equation that describes thermal conductivity of composites based on polymer binders and having two fillers is presented. A simple formula for practical estimates of effective thermal conductivity of three-component compositions is also proposed; the formula uses effective thermal conductivity for two-component compositions of aggregates of filler particles evaluated from experimental data.

Keywords: thermal conductivity, polymers, composite, filler, binder, three-component composition, multiple regression

Data on authors

- Vladislav A. Mikheev** — Applicant; D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Department of Engineering and Quality Management; Lecturer; NORDPRESS; Design Engineer of the 2nd Category;
E-mail: vladislav-miheev@mail.ru
- Vladimir Sh. Sulaberidze** — Dr. Sci.; STOLP Ltd.
- Vasily D. Mushenko** — PhD; STOLP Ltd.; Director General

For citation: *Mikheev V. A., Sulaberidze B. Sh., Mushenko V. D.* Simulation of thermal conductivity of three-component composition // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 7. P. 584—591 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-584-591