

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, КАЧЕСТВО И СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОДУКЦИИ ЛЁГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 677.04:536.2

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПЛАСТИНЫ

асп. Котович А.В., канд. техн. наук, проф. Ольшанский В.И.

Витебский государственный технологический университет

e-mail: anton.kotovitch97@gmail.com

В данной статье предложен альтернативный метод расчета коэффициента теплопроводности плоских композиционного материала с равномерно распределённым наполнителем путем перехода к стандартному методу эквивалентной пластины. Результаты сопоставления экспериментальных данных с теоретическими, полученными по данной методике, показывают, что отклонение расчётных данных от экспериментальных составило менее 5%.

Ключевые слова: композиционный материал, композит, метод расчета теплопроводности, матрица, силикон, наполнитель, костра льна.

Введение

Композиционный материал – природный либо искусственно созданный неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов с существенно различными свойствами и с четкой границей раздела между ними, которые, в сочетании, приводят к появлению нового материала с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов.

Компонент композита, непрерывный во всем объеме, называется матрицей (связующим) композиционного материала. Порошки, волокна и частицы, включенные в композит, называются армирующим элементом (наполнителем). Матрица в композите обеспечивает монолитность, пластичность материала, распределение напряжений, определяет тепло-, влаго-, огне-, химическую стойкость. Армирующие элементы используются для

улучшения эксплуатационных свойств композита, придания ему специальных свойств, снижения стоимости. В случае, если один наполнитель не соответствует всем требованиям, предъявляемым к композиционному материалу, то вводят несколько наполнителей, имеющих различные свойства [1-3].

Все композиционные материалы можно классифицировать по нескольким признакам [1, 2]:

По материалу матрицы: металлические, полимерные, жидкокристаллические, керамические. В свою очередь полимерные материалы матрицы можно разделить на термореактивные и термопластичные. Термореактивные материалы после отверждения утрачивают способность переходить в вязкотекучее состояние. Они являются результатом отверждения эпоксидных,

эфирных, имидных, кремнийорганических и иных смол. Термопластичные материалы при повторном нагреве способны вновь переходить в вязкотекучее состояние. К ним относятся полиэтилены, полиамиды, полипропилены, фторопласты и другие материалы.

По структуре композита: каркасные, матричные, слоистые, комбинированные.

По геометрии армирующих компонентов: порошковые и армированные частицами, волокнистые, слоистые. В волокнистых композитах в качестве армирующего материала могут выступать как отдельные нити, органические или неорганические, в том числе металлические, так и ленты, жгуты, ткани, нетканые материалы. Слоистые композиты получают путем прессования или прокатки разнородных материалов, либо соединением различных материалов путем склеивания.

По расположению компонентов: изотропные и анизотропные. К числу изотропных композитов относятся псевдосплавы и хаотично армированные материалы.

По количеству компонентов: полиматричные и полиармированные.

Среди прочих физико-механических и химических свойств композитов в некоторых случаях важно знать и некоторые теплофизические свойства материала, такие как коэффициент теплопроводности и термическое сопротивление.

Коэффициент теплопроводности

– это количество теплоты, передаваемое за единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице.

Термическое сопротивление – это способность тела препятствовать распространению теплового движения молекул.

Коэффициент теплопроводности и связанное с ним термическое сопротивление важны для материалов, использующихся в строительстве, триботехнических изделиях, в производстве одежды и обуви, использующихся при низких температурах, и других.

В общем случае теплопроводность композиционного материала зависит от его состава, распределение наполнителя в матрице и размеров частиц наполнителя. Но в настоящее время влияние структуры наполнителя нельзя учесть в рамках одной модели. В особенности в тех случаях, когда коэффициент теплопроводности матрицы и наполнителя отличаются на порядок [4]. В данной статье рассматривается полимерный композиционный материал, упрочненный частицами величиной до 7 мм.

Существуют различные методы (формулы) для расчета коэффициента теплопроводности композиционных материалов. Но каждый метод учитывает лишь определенную форму частиц и характер их распределения в композите. Максвелл предложил уравнение для расчета коэффициента теплопроводности двухкомпонентной среды с частицами сферической формы [5].

$$\lambda_{эф} = \lambda_m \left[\frac{\lambda_c + 2\lambda_m - 2(1-A)(\lambda_m - \lambda_c)}{\lambda_c + 2\lambda_m + (1-A)(\lambda_m - \lambda_c)} \right] \quad (1)$$

где $\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности композита,

$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; λ_m – коэффициент теплопроводности матрицы, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; λ_c – коэффициент

Котович А.В., Ольшанский В.И. РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПЛАСТИНЫ

теплопроводности наполнителя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; A – объемное содержание наполнителя:

$$A = \frac{V_c}{V_M + V_c} \quad (2)$$

где V_c – объем наполнителя, м^3 ; V_M – объем матрицы, м^3 .

В. И. Оделевский [6] предложил для расчета эффективного коэффициента теплопроводности композита с хаотическим распределением включений кубической формы следующее соотношение:

$$\lambda_{эф} = \lambda_1 \left[0,215 - \frac{1,57}{1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \left(\frac{1}{1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

В работах Лихтенеккера описывается два типа структур: равноправные и неравноправные. В структуре с неравноправными компонентами форма включения может быть квадратной или эллиптической в проекции на плоскость, либо в форме параллелепипеда, сферы или эллипса в пространстве. Лихтенеккер вводит понятие пластины, под которым понимают плоскую границу между двумя материалами: матрицей и наполнителем. В случае, если тепловой поток направлен параллельно пластине, то говорят о ее параллельной ориентации, если перпендикулярно – о перпендикулярной ориентации [7, 8].

Модель обобщенной проводимости Лихтенеккера для смесей с неравноправными компонентами при параллельной ориентации пластин описывается уравнением [8]:

$$\lambda_{//} = (1 - m_2) \cdot \lambda_1 + m_2 \cdot \lambda_2 \quad (5)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности матрицы, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; λ_2 – коэффициент теплопроводности наполнителя,

$$\lambda_{эф} = \lambda_M \left[1 - \frac{A}{1 - \frac{1 - A}{1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_M}}} \right] \quad (3)$$

Согласно двухкомпонентной модели [5, 7] состоящей из двух типов плотно уложенных кубов: кубов с теплопроводностью связующего компонента (матрицы) и кубов, охватывающих частицы наполнителя с теплопроводностью, коэффициент теплопроводности композиционного материала имеет вид:

$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; m_2 – объемное содержание наполнителя.

Модель обобщенной проводимости Лихтенеккера для смесей с неравноправными компонентами при перпендикулярной ориентации пластин [8]:

$$\lambda_{\perp} = \left(\frac{(1 - m_2)}{\lambda_1} + \frac{m_2}{\lambda_2} \right)^{-1} \quad (6)$$

Модель обобщенной проводимости Лихтенеккера для смесей с равноправными компонентами описывается уравнением [8]:

$$\lambda = \lambda_1^{1 - m_2} + \lambda_2^{m_2} \quad (7)$$

Балагуров Б.Я. и Виноградов Г.А. [9] описывает приближенный подход для расчета коэффициента теплопроводности композиты с иглообразными включениями и структурной анизотропией, называемый теорией эффективной среды. Каждый компонент характеризуется постоянной изотропной теплопроводностью, а граница между ними считается беско-

нечно тонкой. Задача расчета коэффициента теплопроводности была сведена к определению напряженности температурного поля внутри анизотропного сферического включения, находящегося внутри анизотропной среды (матрицы) композита.

Шилько С.В. и соавт. [10] исследовали теплофизические свойства композиционных материалов, используемых в трибосопряжениях. Для расчета усредненного коэффициента теплопроводности композиционного материала с хаотической ориентацией частиц было выведено следующее соотношение:

$$\lambda_c = \frac{1}{3} (2 \cdot \lambda_1 + \lambda_3) \quad (8)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности материала покрытия по 1-ой оси, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; λ_2 – коэффициент теплопроводности материала покрытия по 3-ей оси, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

В другой работе того же автора [11] на основе микромеханической модели дисперсно-наполненного композита разработан аналитический метод

определения эффективного коэффициента теплопроводности. Также авторами предложен уточненный метод расчета граничного термического сопротивления межфазного слоя дисперсно-наполненных композиционных материалов с высокой теплопроводностью. В рамках данного способа рассматривались два встречных тепловых потока – от матрицы к наполнителю и обратно.

Черных А.А. и Шмырин А.М. в своей работе [12] получили аналитическую формулу для вычисления коэффициента теплопроводности композита с наполнителем шаровой формы. Данная формула содержит отношение коэффициентов теплопроводности материалов матрицы и наполнителя, учитывает размер дисперсных включений, их форму. Расчетная модель основывается на изменении термического сопротивления на границе «матрица-дисперсное включение» и использовании усреднённых значений параметров. Полученная формула имеет следующий вид:

$$\lambda = \left(1 - \frac{d}{a}\right) \cdot \lambda_1 + 2 \sum_0^d \frac{\delta \cdot \left(1 - \frac{d}{a}\right) \cdot \lambda_1}{a} + \sum_0^d \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \delta}{a \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)} \cdot \left[\pi - \frac{4 \cdot \lambda_2}{\sqrt{(\lambda_2)^2 - \left(\frac{d}{a} \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)\right)^2}} \cdot \arctg \sqrt{\frac{\lambda_2 - \frac{d}{a} \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + \frac{d}{a} \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)}} \right] \quad (9)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности матрицы, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; λ_2 – коэффициент теплопроводности дисперсных включений, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; a – длина ребра элементарной ячейки (куба), в которую помещен наполнитель, м; d – диаметр шарового включения, м; δ – толщина элементарной площадки, на которые разделен образец, м.

Результаты расчетов по данной формуле и по формуле Оделевского

дают близкие, практически совпадающие результаты. Проведено сравнение с результатами, полученными в пакете ANSYS.

Башков А.П. и соавт. [13] предлагают методику расчета теплопроводности текстильных композитов как пористого (несплошного) тела с учетом передачи теплоты в пористом теле на основе макроквантового термического метода.

**Котович А.В., Ольшанский В.И. РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ
ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПЛАСТИНЫ**

$$\lambda_{эф} = \frac{2 \cdot k \cdot T \cdot r^2}{h} \left(\rho \cdot c_p \cdot K_r + \frac{2 \cdot k \cdot T}{F_{эф} \cdot r \cdot K_V \cdot K_T \cdot \Delta T} \right) \quad (10)$$

где T – термодинамическая температура, К; k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, представляющая макроквант энтропии; $k \cdot T = \Delta Q$ – макроквант (приращение) тепловой энергии; h – постоянная Планка, $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; r – характерный размер (радиус) макроячейки материала; ρ – плотность материала; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); K_r – коэффициент релаксации, выражающий степень динамического воздействия макроячейки на теплопередачу: $K_r = \frac{w_r}{3 \cdot c_p}$; w_r – скорость распространения теплоты в веществе, м/с: $w_r = \sqrt{a \cdot \tau_r}$; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; τ_r – продолжительность релаксации, с; $F_{эф}$ – внутренняя эффективная (смачиваемая) поверхность материала; K_V – формфакторный коэффициент, корректирующий объем макроячейки; K_T – температурный корректирующий коэффициент: $K_T = \frac{T_{экс}}{T_0}$; $T_{экс}$ – температура материала в условиях эксперимента; $T_0 = 273$ К – эталонная температура.

Грищенко А.И. и соавт. [14] использовали нейронную сеть для расчета модуля Юнга и коэффициента теплопроводности композиционного материала дисперсно-армированного шаровыми включениями.

Мишаков В.Ю. и соавт. в своей

$$\lambda_{эф} = \left(\frac{(3 \cdot \rho_1 - 1) \cdot \lambda_1 + (3 \cdot \rho_2 - 1) \cdot \lambda_2}{4} \right) + \left[\left(\frac{(3 \cdot \rho_1 - 1) \cdot \lambda_1 + (3 \cdot \rho_2 - 1) \cdot \lambda_2}{4} \right)^2 + \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2} \right]^{0,5} \quad (12)$$

где ρ_1 – объемная концентрация матрицы.

Для расчета эффективного коэффициента теплопроводности ячейки композита с включениями шаровидной формы одинакового диаметра с учетом наличия межфазного слоя

работе [15] предлагают метод анализа и расчета эффективного коэффициента теплопроводности нетканого теплоизоляционного материала. Данный метод подходит для всех материалов, имеющих капиллярно-пористую или пористую структуру.

Бачурина А.Ю. и соавт. [16] рассмотрели несколько вариантов расчета эффективного коэффициента теплопроводности композиционных материалов. Матричная модель для системы с включениями в форме правильных кубов, центры которых образуют простую кубическую решетку, а ребра параллельны, имеет вид:

$$\lambda_{эф} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\rho_2}{\frac{(1-\rho_2)}{3} + \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)}} \right) \quad (11)$$

где $\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности композиционной системы, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; λ_1 – коэффициент теплопроводности матрицы, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; λ_2 – коэффициент теплопроводности наполнителя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; ρ_2 – объемная концентрация наполнителя.

Для статических смесей, когда частицы наполнителя распределены хаотично и не образуют никаких регулярных структур, а на форму и размер не накладываются никакие ограничения, коэффициент теплопроводности можно рассчитать по формуле:

определенной толщины и имеющего теплопроводность, отличную от теплопроводности матрицы, авторами предложено следующее соотношение:

$$\lambda_c = \frac{1}{4 \cdot (R_1 + R_2) \cdot (r + d)} \quad (13)$$

где R_1 – тепловое сопротивление

матрицы, $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$; R_2 – тепловое сопротивление наполнителя, $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$; r – радиус частицы, м; d – толщина слоя, м.

Зарубин В.С. и соавт. В своих работах [17, 18] строили варианты математических моделей переноса тепловой энергии путем теплопроводности в композитах с шаровыми включениями при условии, что включения не контактировали между собой, т. е. окружены слоем материала матрицы.

Также существуют программы, такие как ANSYS, COMSOL Multiphysics, FloEFD, Autodesk CFD, SolidWorks Flow Simulation, Kompas APM FEM, FloEFD и другие, позволяющие при некоторых условиях проводить тепловой анализ композиционных материалов.

Из приведённых методов расчета видно, что они рассматривают композиционный материал либо как материал с хаотически распределенными частицами наполнителя, либо как материал с включениями сферической и кубической формами с различным объёмным содержанием наполнителя, либо, в редких случаях, как расчет специфических композиций с учетом термического сопротивления в межфазные слои. Такое разнообразие существующих методов расчета показывает, на сколько различный подход необходим к расчёту коэффициента теплопроводности различных композиционных материалов. Для численного моделирования необходимо выбрать модель, адекватную реальной композиционной системе и отражающую ее основные свойства. Вследствие всего вышеизложенного, а также из-за разнообразия материалов, применяемых для матриц и наполнителей, в настоящее время основным источником информации о реальном значении коэффициента теплопроводности компози-

ционного материала является эксперимент.

Целью данной работы является разработка методики расчета коэффициента теплопроводности композиционного материала с равномерно распределенными частицами.

Экспериментальные данные

Методом прессования были изготовлены образцы композиционного материала. Образцы изготовлены в следующем массовом соотношении компонентов: 79,5% связующего и 20,5% армирующего материала. В качестве связующего использовался силикон жидкий двухкомпонентный на основе платины, имеющий твердость по Шору А 10, плотность $1050 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. В качестве армирующего материала использовалась костра льна, частицы которой имели длину 3-7 мм, толщину 0,3-0,8 мм. Толщина образцов композиционного материала 4 мм.

Образцы прошли испытание на теплопроводность методом пластины на стенде НТЦ-22.05.1.Б. Данные о температуре горячей и холодной стороны материала, мощности нагрева и плотности теплового потока, представленные в таблице 1, получены на стенде. Коэффициент теплопроводности рассчитан исходя из полученных данных и толщины композита. Для подтверждения достоверности проводился эксперимент с 6 образцами одного материала. Для достоверной вероятности $P=0,95$ в данном случае минимально необходимое количество опытов является 4 [19]. t_1 – температура холодной стороны материала, °С; t_2 – температура горячей стороны материала, °С; P – мощность нагрева, Вт; q – плотность теплового потока, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; λ – коэффициент теплопроводности материала, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $\lambda_{\text{ср}}$ – среднее значение ко-

Котович А.В., Ольшанский В.И. РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПЛАСТИНЫ

коэффициента теплопроводности 6 образцов, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Таблица 1. Результаты испытания образцов

№	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	P, Вт	$q, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\lambda_{\text{ср}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
1	23,5	31	10	288	0,154	0,155
2	25	36		430	0,156	
3	25,5	38		481	0,154	
4	25	35		383	0,153	
5	26	36,5		410	0,156	
6	26,5	38		450	0,157	

Методика расчета

Методика заключается в приведении теоретической задачи расчёта теплофизических характеристик композиционного материала к стандартному методу расчёта теплопроводности многослойных материалов методом пластины.

Если представить расположение фрагментов армирующего материала как равномерно распределенные в матрице, где материал матрицы заполняет пространство между фрагментами наполнителя, то тепловой поток, направленный перпендикулярно ориентации фрагментов армирующего материала, будет поочередно проходить через армирующий материал и матрицу, представляющие собой минимальные слои внутри композиционного материала. Тогда расчет коэффициента теплопроводности можно вести методом пластины, заменив минимальные слои внутри композита на слои, эквивалентные толщине каждого материала в сечении композита, рассчитываемые теоретически. Условный вид сечения композиционного материала показан на рис. 1.

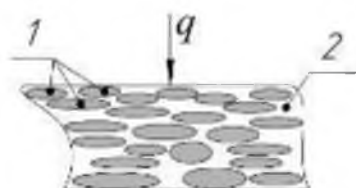


Рисунок 1. Сечение композиционного материала

1 – наполнитель; 2 – матрица; q – тепловой поток.

Для проведения расчета коэффициента теплопроводности эквивалентной пластины необходимо теоретически разделить композиционный материал на слои, рассчитать их толщины и знать коэффициент теплопроводности каждого из слоев. Будем считать, что армирующий материал (наполнитель) равномерно распределен в материале матрицы.

На основании априорной информации, исследований публикаций по композитам, научных статей и предварительных исследований можно представить композит как равномерно распределенный армирующий компонент в матрице в виде слоистого материала [7-9].

Исследуемый подход отличается тем, что нет сложных дифференциальных уравнений, когда каждый слой рассматривается отдельно, конечные результаты каждого слоя являются исходными данными для следующего, сокращается время оценки при расчете теплопроводности.

Имеется композиционный материал, средняя масса 6 образцов которого $m_k = 27,147 \cdot 10^{-3}$ кг, толщина $\delta_k = 4 \cdot 10^{-3}$ м, площадь образцов $S =$

$7,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. На данную площадь образцов приходится масса армирующего материала, а именно кострыльна, $m_{\text{арм}} = 3,925 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$. Масса композита состоит из массы армирующего материала, и массы связующего. Тогда масса связующего $m_{\text{св}}$, приходящегося на площадь образца, будет равняться: $m_{\text{св}} = m_{\text{к}} - m_{\text{арм}} = 23,222 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$. Объём образца композиционного материала будет равняться:

$$V_{\text{к}} = \delta_{\text{к}} \cdot S = 31,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Плотность композиционного материала: $\rho_{\text{к}} = \frac{m_{\text{к}}}{V_{\text{к}}} = 865 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Объём связующего в композите будет равняться: $V_{\text{св}} = \frac{m_{\text{св}}}{\rho_{\text{св}}} = 22,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, где $\rho_{\text{св}} = 1050$ – плотность связующего (силикон), $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Тогда объём армирующего материала композита вычисляется по формуле: $V_{\text{арм}} = V_{\text{к}} - V_{\text{св}} = 9,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Для расчёта теплопроводности методом эквивалентной пластины необходимо знать толщину каждого слоя. Приведенная толщина армирующего слоя композиционного материала будет равняться: $\delta_{\text{арм}} = \frac{V_{\text{арм}}}{S} = 1,183 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Тогда приведенная толщина слоя связующего материала: $\delta_{\text{св}} = \delta_{\text{к}} - \delta_{\text{арм}} = 2,817 \cdot$

10^{-3} м . Плотность армирующего материала: $\rho_{\text{арм}} = \frac{m_{\text{арм}}}{V_{\text{арм}}} = 423 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Для дальнейшего расчета необходимо знать коэффициенты теплопроводности материалов, входящих в композит, при рассчитанных толщинах. Ввиду того, что костра — это небольшие частицы величиной до 7 мм, ее теплопроводность изначально является неизвестной величиной.

Для определения коэффициента теплопроводности костры в композиционном материале были использованы образцы композита, представленные в [20]. Методом, приведенным в данной статье, в указанных образцах рассчитывалась плотность и коэффициент теплопроводности костры. Масса костры в образцах заранее известна. Из данных параметров получено уравнение регрессии коэффициента теплопроводности костры от ее массы и плотности. В уравнении отсутствует толщина слоя костры ввиду того, что на рассматриваемом диапазоне толщин от 1 до 3 мм коэффициент теплопроводности костры изменяется незначительно.

Уравнение регрессии теплопроводности костры имеет вид:

$$y = 0,128 - 0,479 \cdot x_1 - 0,000058 \cdot x_2 \quad (R^2 = 0,8819)$$

где x_1 – масса костры, приходящаяся на площадь $36 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, кг; x_2 – плотность костры, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Коэффициент теплопроводности силикона рассчитывается из ранее полученной логарифмической зависимости теплопроводности силикона от толщины [20]. Уравнение имеет вид: $y = 0,041 \cdot \ln(x) + 0,18$ (23). После приведения композиционного материала к виду слоистого материала для удобства расчета необходимые параметры данных слоев представлены в табл. 2.

Таблица 2. Слои композиционного материала

Материал слоя	Толщина δ , 10^{-3} , м	Коэффициент теплопроводности λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Силикон	2,817	0,222
Костра	1,083	0,095

Эквивалентный коэффициент теплопроводности композиционного

Котович А.В., Ольшанский В.И. РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПЛАСТИНЫ

$$\text{материала: } \lambda_{\text{экв}} = \frac{\delta_{\text{экв}}}{\frac{\delta_{\text{св}}}{\lambda_{\text{св}}} + \frac{\delta_{\text{арм}}}{\lambda_{\text{арм}}}} = 0,159 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Тогда расхождение расчётного эквивалентного коэффициента теплопроводности со средним измеренным коэффициентом теплопроводности. Зная коэффициент теплопроводности различных слоев материала и их толщину, можно рассчитать эквивалентный коэффициент теплопроводности композиционного материала. Толщиной композиционного материала является суммарная толщина всех его слоев: $\delta_{\text{экв}} = \sum \delta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

образцов композиционного материала составляет: $\Delta\lambda = \left| \frac{\lambda_{\text{ср}} - \lambda_{\text{экв}}}{\lambda_{\text{ср}}} \right| \cdot 100\% = 2,51\%$. Отклонение расчетного значения от экспериментального менее 5%, что подтверждает эффективность данного метода расчета эквивалентного коэффициента теплопроводности композиционных материалов, упрочненных равномерно распределенными частицами. Данная погрешность связана, в первую очередь, вероятно, с точностью регрессионной

модели коэффициента теплопроводности костры (R-квадрат равен 0,8819).

Дальнейшие теплофизические характеристики рассчитываются без изменений относительно стандартного метода расчета, представленного в [20].

Выводы В данной статье предложен альтернативный метод расчета коэффициента теплопроводности композиционного материала, отличающийся от известных тем, что в двухкомпонентной среде частицы наполнителя имеют плоскую форму, распределены условно равномерно по всему объёму композиционного материала, что позволяет привести задачу расчета коэффициента теплопроводности композиционных материалов к стандартному методу расчета коэффициента теплопроводности эквивалентной пластины.

Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными показало отклонение на 2,51 %, что является хорошим результатом при расчете коэффициента теплопроводности композиционных материалов.

Список литературы:

1. **Рогов, В.А., Шкарупа, М.И., Велис, А.К.** Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении // Вестник Российского университета дружбы народов. – 2012. – № 2. – С. 41-49.
2. **Адашкин, А.М.** Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов: учеб. пособие. – Москва: ИНФРА-М, 2021. – 241 С.
3. **Рывкина, Н.Г., Нежный, П.А., Кудинова, О.И., Чмутин, И.А., Гринев, В.Г., Новокшенова, Л.А.** Электро- и теплопроводящие свойства полимеризационно-наполненных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и наноразмерных и микронных частиц алюминия // *Химическая физика*. – 2019. – Т. 38, № 9. – С. 60-66.
4. **Бачурина, А.Ю. Никитин, А.В.** Численный метод расчета коэффициента теплопроводности композиционной системы // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. – 2010. – № 2. – С. 93–99.
5. **Заричняк, Ю.П., Иванов, В.А.** Расчет теплопроводности наполненных фторопластов методами теории обобщенной проводимости // Пластические массы. – 2013. – № 6. – С. 23-26.

6. **Калиниченко, А.С., Абраменко, А.Н., Воронин, Е.А., Кожемякина, А.С.** Определение коэффициента теплопроводности металлического композиционного материала с макрогетерогенной структурой // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – 1999. – №1. – С. 91-97.
7. **Дульнев, Г.Н., Заричняк, Ю.П.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов: учеб. пособие. – Ленинград, Энергия, 1974. – 367 С.
8. **Мендоса О., Каренгин, А.Г., Новоселов, И.Ю., Шаманин, И.В.** Определение теплофизических свойств композиционного материала с использованием различных моделей // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14, № 2. – С. 178-183.
9. **Балагуров, Б.Я., Виноградов, Г.А.** Транспортные процессы в композитах с включениями иглообразной формы. Теория эффективной среды // Химическая физика. – 2004. – Т. 23, № 11. – С. 73-77.
10. **Шилько, С.В., Черноус, Д.А., Панин, С.В.** Метод расчета коэффициента теплопроводности дисперсно-наполненных антифрикционных композитов с модифицированным межфазным слоем // Тезисы докладов Международной конференции. – Томск, 2023. – С. 349-350.
11. **Шилько, С.В., Черноус, Д.А., Столяров, А.И., Чжан, Ц.** Термомеханика дисперсно-наполненных композитов и компьютерный дизайн материалов с рекордно высокой теплопроводностью // Механика машин, механизмов и материалов. – 2023. – №4(65). – С. 63-75.
12. **Черных, А.А., Шмырин, А.М.** Исследование теплопроводности композиционных материалов с шаровидным наполнителем // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, № 1. – С. 34-43.
13. **Башков, А.П., Башкова, Г.В., Румянцева, О.С., Евдокимов, А.В.** Расчет теплотехнических свойств текстильных композитов // Информационная среда вуза. – 2016. – № 1(23). – С. 157-160.
14. **Грищенко, А.И., Игнатович, И.А., Петросян, О.Л.** Оптимизация микроструктуры композиционных материалов с учетом ограничений на их свойства // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 73-86.
15. **Мишаков, В.Ю., Советников, Д.А., Павлов, М.А., Кирсанова, Е.А.** Разработка метода анализа и расчета эффективного коэффициента теплопроводности нетканого теплоизоляционного материала // Теоретическая и прикладная наука. – 2017. – № 7(51). – С. 21-27.
16. **Бачурина, А.Ю., Никитин, А.В., Белко, А.В.** Численные методы расчета теплопроводности наполненных полимеров // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. – 2011. – № 1(107). – С. 106-111.
17. **Зарубин, В.С., Котович, А.В., Кувыркин, Г.Н.** Оценка эффективного коэффициента теплопроводности композита с анизотропными шаровыми включениями // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – № 6. – С. 118-126.
18. **Зарубин, В.С., Котович, А.В., Кувыркин, Г.Н.** Эффективный коэффициент теплопроводности композита при наличии промежуточного слоя между матрицей и анизотропными шаровыми включениями // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – № 1. – С. 128-134.

**Котович А.В., Ольшанский В.И. РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ
ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПЛАСТИНЫ**

19. **Спирин, Н.А., Ларов, В.В., Зайнуллин, Л.А., [и др.].** Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учеб. пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург, ООО «УИНЦ», 2015. – 289 С.

20. **Котович, А. В., Ольшанский, В. И.** Теплофизические свойства композиционного материала, армированного кострой льна // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2023. – № 3(46). – С. 28-36.

**CALCULATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF A
COMPOSITE MATERIAL BY THE EQUIVALENT PLATE METHOD**

Kotovich A.V., Alshansky V.I.
Vitebsk State University of Technology
e-mail: anton.kotovich97@gmail.com

This article proposes an alternative method for calculating the thermal conductivity coefficient of a composite material with a uniformly distributed filler by switching to the standard equivalent plate method. The results of comparing experimental data with theoretical data obtained by this method show that the deviation of the calculated data from the experimental data was less than 5%.

Keywords: composite material, composite, method of calculating thermal conductivity, matrix, silicone, filler, flax shive.