

УДК 539.3
AYQGMU (<https://elibrary.ru/ayqgmu>)
DOI 10.33113/mkmk.ras.2023.29.01.06



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ*

Кривень Г.И., Шавелкин Д.С.

*ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)», г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

В работе исследуются термомеханические характеристики модифицированных композитов, армированных волокнами, на поверхности которых выращены хаотично расположенные и переплетающиеся между собой специальные наноструктуры – вискерсы. Такой композит рассматривается, как трансверсально изотропный материал с осью симметрии вдоль волокна. Предполагается, что фазы композита – волокно, вискеризованный межфазный слой и матрица являются изотропными материалами. Исследуется влияние объемного содержания включений в межфазный слой, толщины межфазного слоя и объемного содержания модифицированного волокна на эффективный коэффициент теплопроводности изучаемого композита. Также исследуется эффективный коэффициент температурного расширения межфазного слоя. Оценивается степень влияния объемного содержания вискерсов и коэффициентов температурного расширения вискерсов и матрицы на эффективный коэффициент температурного расширения межфазного слоя. Рассматриваются частные примеры, где вискерсами являются УНТ.

Эффективный коэффициент теплопроводности моделируется при помощи процедуры двухэтапной гомогенизации. На первом этапе определяются эффективные свойства вискеризованного межфазного слоя. На втором этапе определяются эффективные свойства всего композита с использованием модели среды с цилиндрическими включениями, обобщенной на многофазную среду.

Эффективный коэффициент температурного расширения межфазного слоя исследовался при помощи формулы Левина. Для рассматриваемых композитов в работе предложена упрощенная зависимость между эффективными коэффициентами расширения и эффективными модулями упругости.

В работе предложены способы изменения эффективного коэффициента теплопроводности модифицированного композита и эффективного коэффициента температурного расширения вискеризованного межфазного слоя модифицированного композита за счет характеристик микроструктурных параметров. Установлено, что модификация поверхности волокна углеродными нанотрубками позволяет увеличить эффективный коэффициент теплопроводности волокнистого композита в плоскости перпендикулярной оси волокна более чем в 7 раз, а в направлении вдоль оси волокна более чем в 1,3 раза.

Ключевые слова: модифицированные волокнистые композиты; нановолокна; вискерсы; эффективный коэффициент теплопроводности; эффективный коэффициент температурного расширения; полидисперсная модель

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта №21-38-70008.

MODELING OF THERMAL PROPERTIES OF MODIFIED COMPOSITE MATERIALS WITH WHISKERIZED FIBERS

Kriven G.I., Shavelkin D.S.

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper investigates the thermomechanical characteristics of modified fiber-reinforced composites, on the surface of which randomly located and intertwining special nanostructures, whiskers, are grown. Such a composite is considered as a transversally isotropic material with a symmetry axis along the fiber. It is assumed that the phases of the composite – the fiber, the whiskerized interfacial layer and the matrix - are isotropic materials. The influence of the volume content of inclusions in the interfacial layer, the thickness of the interfacial layer, and the volume content of the modified fiber on the effective thermal conductivity of the studied composite is studied. The effective coefficient of thermal expansion of the interfacial layer is also investigated. The degree of influence of the volume content of whiskers and the coefficients of thermal expansion of whiskers and the matrix on the effective coefficient of thermal expansion of the interfacial layer is estimated. Particular examples are considered where the whiskers are CNTs.

The effective thermal conductivity is modeled using a two-stage homogenization procedure. At the first stage, the effective properties of the whiskerized interfacial layer are determined. At the second stage, the effective properties of the entire composite are determined using a model of a medium with cylindrical inclusions, generalized to a multiphase medium.

The effective coefficient of thermal expansion of the interfacial layer was studied using the Levin formula. For the composites under consideration, a simplified relationship between effective expansion coefficients and effective elastic moduli is proposed in the work.

The paper proposes ways to change the effective thermal conductivity of the modified composite and the effective coefficient of thermal expansion of the whiskerized interfacial layer of the modified composite due to the characteristics of microstructural parameters. It has been established that the modification of the fiber surface with carbon nanotubes makes it possible to increase the effective thermal conductivity of the fibrous composite in the plane perpendicular to the fiber axis by more than 7 times, and in the direction along the fiber axis by more than 1.3 times.

Keywords: modified fiber composites; nanofibers; whiskers; effective coefficient of thermal conductivity; effective coefficient of thermal expansion; polydisperse model

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшней день актуальной является задача разработки композиционных материалов с высокой теплопроводностью для быстрого отвода тепла и приемлемым коэффициентом теплового расширения для снижения остаточных напряжений.

Композиты с полимерной матрицей являются плохими проводниками тепла, в связи с этим затруднено их использование в авиастроении, где непроводящие конструкции могут быть повреждены ударами молнии. Также повышенная теплопроводность композитов важна для охлаждения электронных схем и двигательных установок. В ряде работ [1-4] было показано, что добавление небольшого количества углеродных нанотрубок (УНТ) приводит к непропорциональному увеличению теплопроводности композита, тем самым полимерные композиты могут быть преобразованы в проводящие материалы,

что повышает их многофункциональность. Например, в работе [1] было обнаружено, что при добавлении 1% одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от общего веса в эпоксидную смолу приводит к увеличению теплопроводности материала на 125% при комнатной температуре, а в работе [2] измерили увеличение теплопроводности на 55% для композита, содержащего 7% ОУНТ от общего веса полимерной матрицы. Ким и соавторы [3] сообщили об увеличении теплопроводности на 57% при добавлении 7% многослойных УНТ от общего веса фенольной смолы. Сихн и соавторы [4] установили, что теплопроводность эпоксидного связующего может быть увеличена на несколько порядков при выращивании леса многослойных УНТ.

Использование материалов с низким коэффициентом температурного расширения позволяет снизить степень воздействия температурных факторов на геометрическую стабильность конструкции. Углеродные волокна имеют фактически отрицательный коэффициент температурного расширения поэтому углеродное волокно в сочетании с другими волокнами и эпоксидной матрицей позволяет изготавливать конструкционные элементы практически с нулевой температурной деформацией [5].

В настоящее время активно развиваются технологии получения современных волокнистых композитов, в которых для повышения сдвиговых прочностных свойств композита на поверхности углеродных волокон выращены специальные микроструктуры, содержащие нановолокна (вискерсы) – нанопроволоки [6-8] и углеродные нанотрубки (волокна «Фуззи») [9-11]. Улучшение свойств композитов зависит от характеристик вискерсов, выращенных на поверхности волокна, и поэтому вискеризованная волокнистая система является функциональной [7-10,12,13]. Композиционные материалы с вискеризованной волокнистой системой называются мультифункциональными современными композиционными материалами потому, что различные свойства композитов: прочность, жесткость, демпфирование, усталость, и электро- и теплопроводность могут быть улучшены одновременно [14]. В связи с этим прогнозирование свойств таких будущих мультифункциональных волокнистых композитов представляет теоретический и практические интерес.

Аналитические модели, позволяющие интерпретировать экспериментальные результаты и оптимизировать структуры многофункциональных материалов для конкретных тепловых задач, были предложены авторами работ [15-17]. В работе [15] исследовался эффективный коэффициент теплопроводности модифицированного композита с волокнами, на которых, перпендикулярно поверхности, выращены равномерно расположенные УНТ. Для этого использовался процесс трехэтапной гомогенизации. На первом этапе определялись свойства вискеризованного слоя с помощью подхода эффективной среды, а после исследовались свойства составного цилиндра и всего композита, состоящего из волокна, вискеризованного слоя и матрицы. При анализе влияния объемного содержания УНТ на эффективный коэффициент теплопроводности учитывались только малые объемные содержания (< 20%). Позже в работе [16] исследовалось влияние волнистых УНТ на эффективный коэффициент теплопроводности модифицированных композитов с вискеризованными волокнами. В работе [17] для моделирования эффективной теплопроводности композитов из углеродного волокна с выращенными на его поверхности УНТ используется многоэтапный микромеханический метод, включающий в себя одну из версий полуэмпирической

модели Халпина-Цая и аналитическую микромеханическую модель элементарной ячейки, предложенную авторами исследования.

В данной работе решаются две задачи: 1) определяется влияние объемного содержания вискерсов, толщины межфазного слоя и объемного содержания модифицированного волокна на эффективный коэффициент теплопроводности модифицированного композита с вискеризованными волокнами; 2) оценивается влияние объемного содержания включений на эффективный коэффициент температурного расширения вискеризованного межфазного слоя. Свойства модифицированного композита с вискеризованными волокнами исследуются при помощи полидисперсной модели с цилиндрическими и сферическими включениями. Проводится сравнительный анализ эффективного коэффициента теплопроводности модифицированного композита с эффективным коэффициентом теплопроводности аналогичного классического композита.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА

Модифицированный композитный материал с вискеризованными волокнами из-за наличия микро- или нановолокон (вискерсов или щетин) имеет дополнительный межфазный слой между базовым волокном и матрицей, поэтому, такой материал можно отнести к волокнистым многофазным композитам, состоящим из трех слоев – волокна, вискеризованного межфазного слоя и матрицы (рис.1). Вискеризованный межфазный слой является нанокомпозитом, который состоит из вискерсов и матрицы.

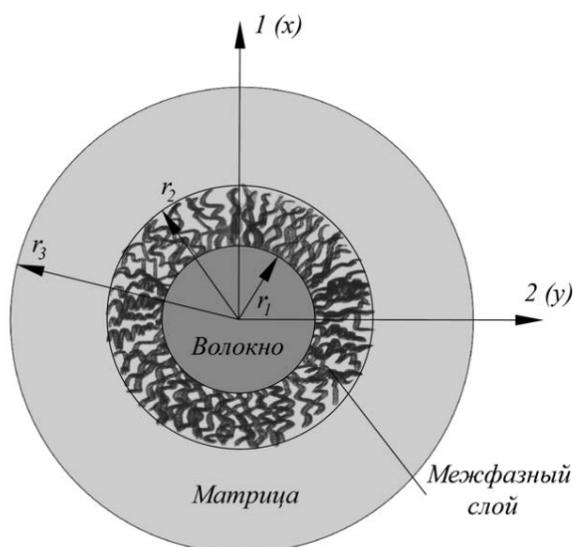


Рис.1. Структура модифицированного композитного материала с вискеризованными волокнами.

При моделировании эффективного коэффициента теплопроводности таких композитов, мы считаем, что у композита есть трансверсально-изотропная структура с плоскостью изотропии поперек волокна. Волокно, матрица и вискеризованный слой являются изотропными материалами. Для вискеризованного слоя такое предположение сделано в силу того, что вискерсы расположены хаотично и переплетаются между собой. На рис.2 показан пример вискеризованного слоя из УНТ и эпоксидной матрицы.

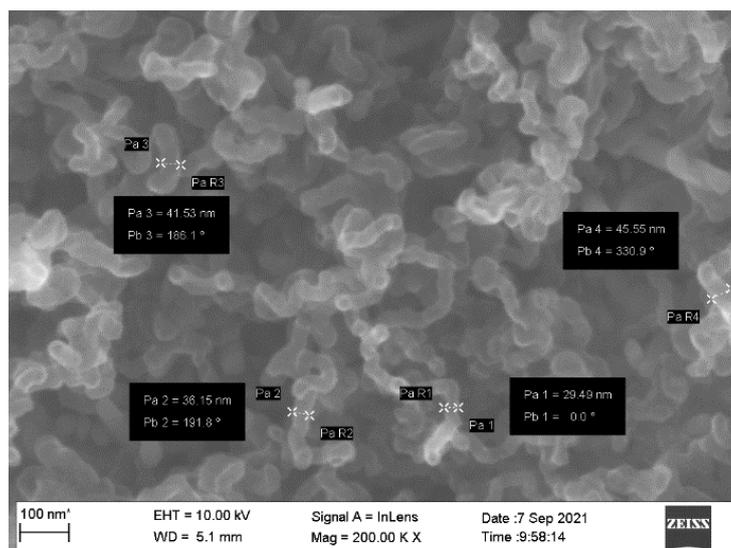


Рис.2. Межфазный слой из УНТ и эпоксидной матрицы.

Чтобы получить эффективный коэффициент теплопроводности композита, необходимо сначала найти эффективный коэффициент теплопроводности вискеризованного слоя. Предполагается, что вискеризованный слой является макроскопически изотропной гетерогенной средой. Эффективный коэффициент теплопроводности вискеризованного слоя определяется при помощи полидисперсной модели среды [18].

После определения эффективного коэффициента теплопроводности вискеризованного межфазного слоя находим эффективный коэффициент теплопроводности вискеризованного волокнистого композита, используя полидисперсную модель среды с цилиндрическими включениями, расширенную на многофазную среду.

В качестве конкретного примера волокнистого композита рассматривался однонаправленный вискеризованный волокнистый композит, состоящий из углеродных волокон марки Т-650, вискеризованных углеродными нанотрубками (УНТ). Углеродное волокно, матрица и вискерсы считаются изотропными. Физические свойства структурных элементов модифицированного композита с вискеризованными волокнами приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Физические свойства структурных элементов модифицированного композита с вискеризованными волокнами [19-21].

	Углеродное волокно Т-650	УНТ	Эпоксидная матрица
Коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К))	14	3000	0.195-0.255

Рассматриваются объемные концентрации включения модифицированного волокна, покрытого вискеризованным слоем, равные 30%, 50% и предельный случай 75%. Оценивается влияние толщины вискеризованного слоя и объемного содержания вискерсов в вискеризованном слое на эффективный коэффициент теплопроводности волокнистого композита.

Эффективные свойства модифицированного композита с вискеризованными волокнами сравниваются с эффективными свойствами аналогичных классических композитов.

Исследуется эффективный коэффициент температурного расширения вискеризованного слоя модифицированного композита. Оценивается влияние объемного содержания включений и коэффициентов температурного расширения включения и матрицы на эффективный коэффициент температурного расширения вискеризованного межфазного слоя.

2. ЭФФЕКТИВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПОЗИТА С ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ

Эффективный коэффициент теплопроводности модифицированного композита с вискеризованными волокнами определяется при помощи процедуры двухэтапной гомогенизации. На первом этапе определяется эффективный коэффициент теплопроводности вискеризованного слоя по известной формуле [18] для трехфазной модели среды со сферическими включениями

$$k_2 = k_M \left(1 + \frac{c_0}{(1-c_0)/3 + k_M/(k_I - k_M)} \right), \quad (1)$$

где $c_0 = a^3/b^3$ – объемное содержание вискерсов в вискеризованном межфазном слое, a – радиус вискерса, b – радиус оболочки из матрицы, k_I – коэффициент теплопроводности вискерса, k_M – коэффициент теплопроводности матрицы.

На втором этапе определяется эффективный коэффициент теплопроводности всего композита. Ввиду трансверсальной изотропии модифицированного композита с осью симметрии, направленной вдоль оси 1, закон теплопроводности Фурье можно записать

$$\begin{aligned} q_i &= -k_{ij} T_{,j} \\ q_i &= -k_{ij} \theta_{,j} \end{aligned}$$

где q_i – вектор потока тепла, k_{ij} – тензор коэффициентов теплопроводности, θ – температура.

В последнем равенстве только две компоненты k_{ij} независимы

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & -k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{,1} \\ \theta_{,2} \\ \theta_{,3} \end{bmatrix}.$$

Эффективный коэффициент теплопроводности в осевом направлении k_{11} , как было показано в [18], определяется по правилу смеси

$$k_{11} = \sum_{n=1}^N c_n k_n, \quad (2)$$

где N – число фаз с объемными долями c_n и коэффициентами теплопроводности k_n .

На бесконечности должно выполняться следующее условие

$$\theta|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow \beta x_3,$$

где β – градиент температуры.

Стационарные уравнения теплопроводности в компонентах композита имеют вид

$$\begin{aligned}\nabla^2 \theta^1 &= 0, & 0 \leq r \leq r_1, \\ \nabla^2 \theta^2 &= 0, & r_1 \leq r \leq r_2, \\ \nabla^2 \theta^3 &= 0, & r_2 \leq r \leq r_3, \\ \nabla^2 \theta^{eff} &= 0, & r_3 \leq r \leq \infty,\end{aligned}\tag{3}$$

где θ^I , θ^M , θ^2 – температуры в волокне, вискеризованном межфазном слое, матрице и эффективной среде, ∇ – оператор Лапласа.

В цилиндрической системе координат с осевой симметрией относительно x_1 имеем

$$\nabla = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

тогда решение (3) при $r \rightarrow \infty$, $\theta_2(r, \theta) \rightarrow \beta r \cos \theta$ имеет вид

$$\begin{aligned}\theta^1 &= A_1 r \cos \theta, & 0 \leq r \leq r_1, \\ \theta^2 &= \left(A_2 r + \frac{B_2}{r} \right) \cos \theta, & r_1 \leq r \leq r_2, \\ \theta^3 &= \left(A_3 r + \frac{B_3}{r} \right) \cos \theta, & r_2 \leq r \leq r_3, \\ \theta^{eff} &= \left(A_{eff} r + \frac{B_{eff}}{r} \right) \cos \theta, & r_3 \leq r \leq \infty,\end{aligned}\tag{4}$$

Предполагается, что на бесконечности реализуется однородное поле, чему соответствуют $B_{eff} = 0$ с единичным тепловым потоком $A_{eff} = 1$.

Запишем граничные условия. Считаем, что на границе фаз непрерывны и тепловые потоки. Шесть неизвестных, среди которых эффективный коэффициент теплопроводности k_{eff} , определяем из системы из шести уравнений

$$\begin{aligned}1) \quad & \theta^1 - \theta^2 = 0, & r = r_1, \\ 2) \quad & \theta^2 - \theta^3 = 0, & r = r_2, \\ 3) \quad & \theta^3 - \theta^{eff} = 0, & r = r_3, \\ 4) \quad & -k_1 \frac{\partial \theta^1}{\partial r} + k_2 \frac{\partial \theta^2}{\partial r} = 0, & r = r_1, \\ 5) \quad & -k_2 \frac{\partial \theta^2}{\partial r} + k_3 \frac{\partial \theta^3}{\partial r} = 0, & r = r_2, \\ 6) \quad & -k_3 \frac{\partial \theta^3}{\partial r} + k_{eff} \frac{\partial \theta^{eff}}{\partial r} = 0, & r = r_3,\end{aligned}\tag{5}$$

Решение системы уравнений (5) с учетом (4) относительно k_{eff} имеет вид

$$k_{eff} = -k_3 \left(2 - \frac{3}{1 + D / (k_1 k_3 m - k_1 k_2 n + k_2 k_2 m - k_2 k_3 n)} \right),\tag{6}$$

где $m = (-2+l)l$, $n = 2+(-2+l)l$, $l = r_2 - r_1$ – толщина межфазного слоя,
 $D = k_1 k_3 c_{vol} a + k_1 k_2 c_{vol} b - k_2^2 c_{vol} a - c_{vol} k_2 k_3 b$.

Таким образом определены эффективные коэффициенты теплопроводности вискеризованного слоя k_2 и модифицированного композита с вискеризованными волокнами в направлении вдоль волокна k_{11} и в плоскости перпендикулярной оси волокна k_{22} .

3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Исследуем влияние объемного содержания вискерсов в вискеризованном межфазном слое на эффективный коэффициент теплопроводности вискеризованного слоя (см. (1)). Также оценим влияние на эффективный коэффициент теплопроводности модифицированного композита таких параметров как: объемное содержание вискерсов в вискеризованном межфазном слое (c_0), объемное содержание модифицированного волокна в связующем (c_{vol}), толщина вискеризованного межфазного слоя (Δ/r_2). Рассмотрим композит с постоянным радиусом модифицированного волокна $r_2 = 1$, толщиной вискеризованного межфазного слоя Δ/r_2 и радиусом матрицы r_3 зависящем от объемного содержания модифицированного волокна $r_3 = r_2 / \sqrt{c_{vol}}$. Физические свойства волокна, вискерсов и матрицы, образующих модифицированный композит приведены в табл.1.

Рис.3 иллюстрирует увеличение эффективного коэффициента теплопроводности вискеризованного изотропного слоя k_2 при увеличении объемного содержания вискерсов.

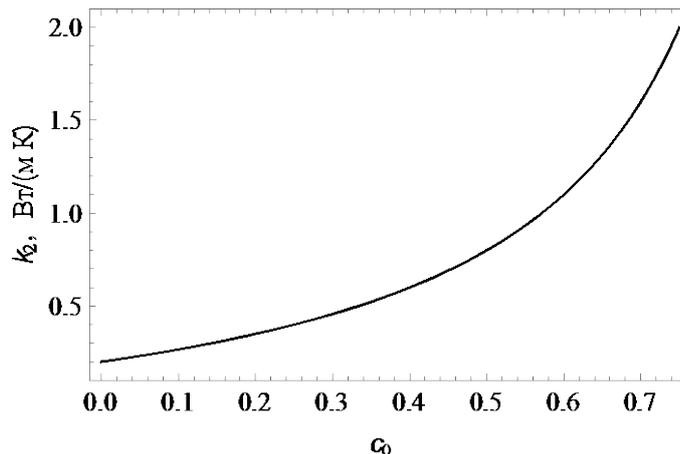


Рис.3. График зависимости эффективного коэффициента теплопроводности вискеризованного слоя k_2 от объемного содержания вискерсов c_0 .

Эффективный коэффициент теплопроводности волокнистого композита в осевом направлении k_{11} получен по формуле (2) для различных объемных содержаний вискерсов в вискеризованном межфазном слое ($c_0 = 0.5$, $c_0 = 0.75$)

и объемных содержаний модифицированного волокна в матрице ($c_{vol} = 0.3, c_{vol} = 0.5, c_{vol} = 0.75$). На рис.4 представлены графики зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности от толщины вискеризованного слоя Δ/r_2 при различных объемных содержания вискерсов в вискеризованном межфазном слое c_0 и при различных объемных содержаниях модифицированного волокна в матрице c_{vol} .

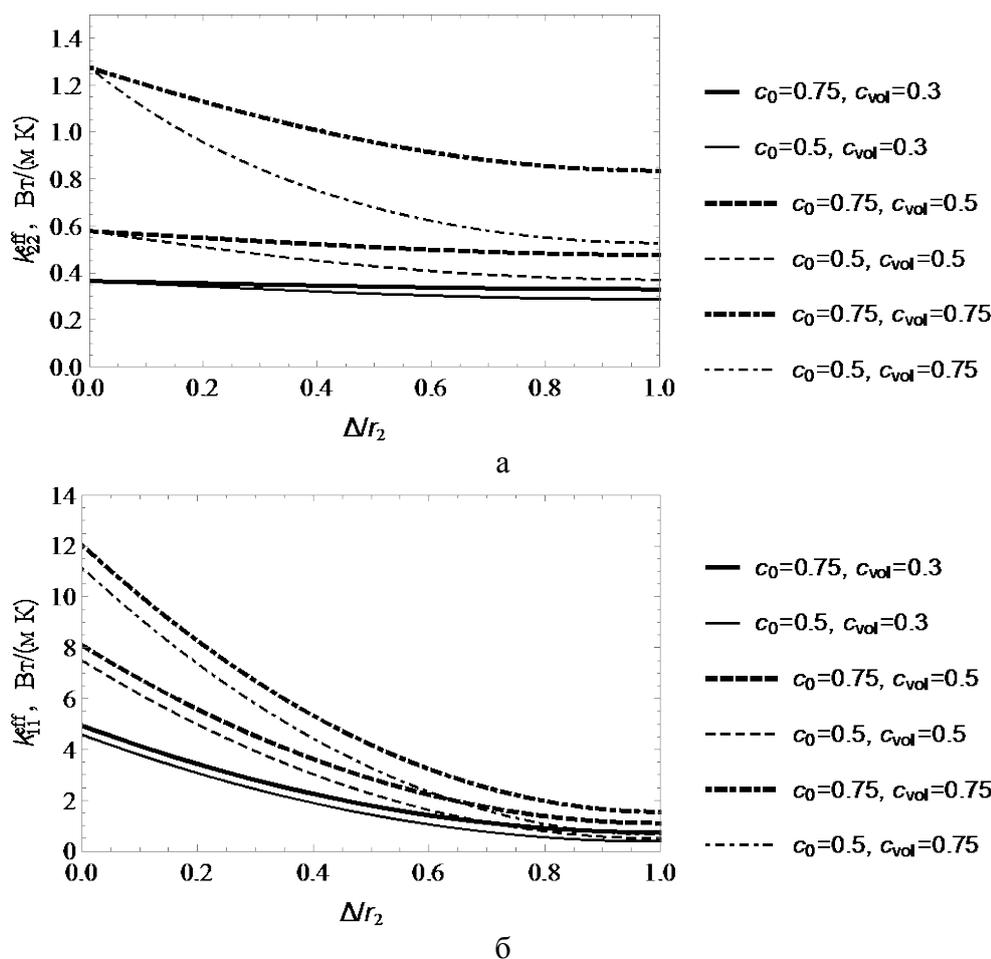


Рис.4. Графики зависимостей эффективных коэффициентов теплопроводности от толщины вискеризованного слоя Δ/r_2 при различных объемных содержаниях вискерсов в вискеризованном межфазном слое c_0 и модифицированного волокна в матрице c_{vol} : а) k_{22} – в плоскости перпендикулярной оси волокна, б) k_{11} – в направлении вдоль оси волокна.

На рис.4 показано, что увеличение толщины вискеризованного слоя за счет уменьшения радиуса волокна r_1 приводит к уменьшению эффективных коэффициентов теплопроводности в плоскости перпендикулярной оси волокна k_{22} и в направлении вдоль оси волокна k_{11} . А малые объемные содержания модифицированного волокна (< 0.3) не оказывают значительного влияния на эффективные коэффициенты теплопроводности модифицированного

композитного материала в плоскости перпендикулярной оси волокна k_{22} . По мере увеличения толщины вискеризованного слоя его эффективные свойства стремятся к свойствам связующего.

Отдельно рассмотрим области малых толщин вискеризованного слоя (рис.5).

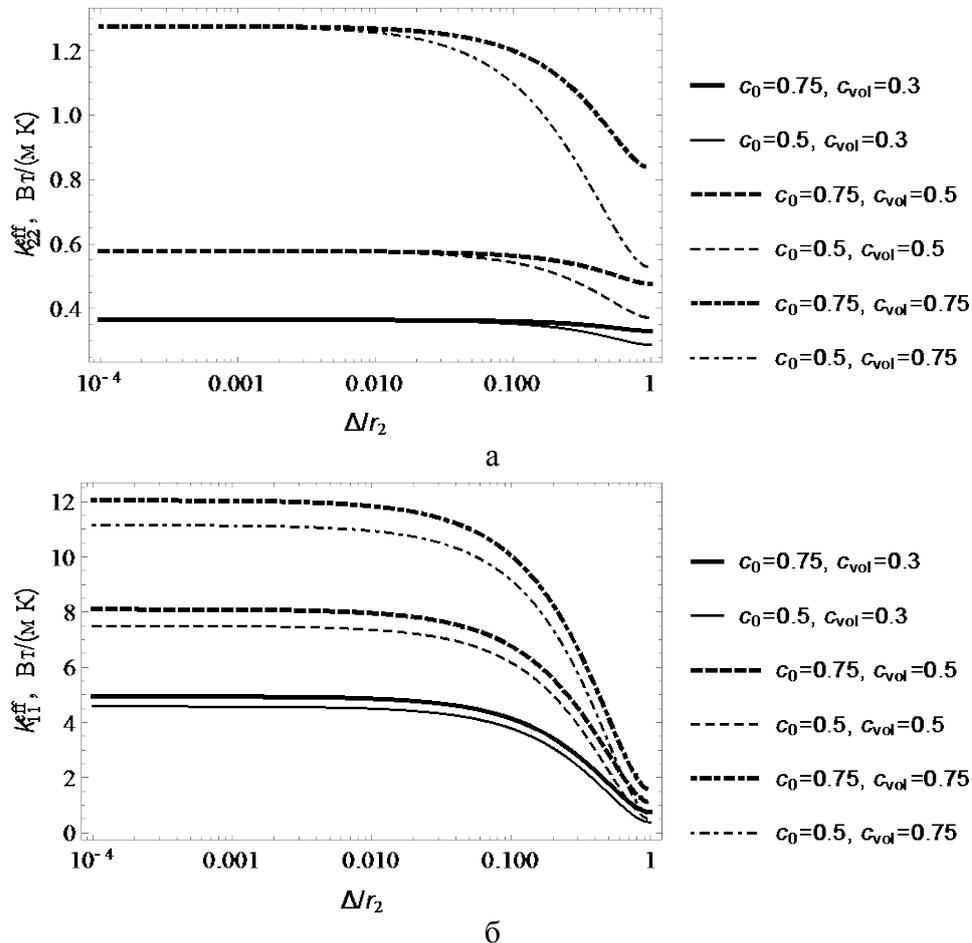


Рис.5. Графики зависимости эффективного коэффициента теплопроводности от толщины вискеризованного слоя Δ/r_2 при различных объемных содержаниях вискерсов в вискеризованном межфазном слое c_0 и разных значениях объемных содержаний модифицированного волокна в матрице c_{vol} : а) k_{22} – в плоскости перпендикулярной оси волокна, б) k_{11} – в направлении вдоль оси волокна.

Кривые рис.5 показывают, что малые толщины вискеризованного слоя ($0,01r_2 - 0,1r_2$) являются предпочтительнее для реализации высоких эффективных коэффициентов теплопроводности k_{22} и k_{11} .

Рассмотрим пример конкретного однонаправленного вискеризованного волокнистого композита, состоящего из углеродных волокон марки Т-650, вискеризованных углеродными нанотрубками (УНТ), и эпоксидной матрицы. Физические свойства такого композита приведены в Таблице 1. Примем, что диаметр углеродного волокна равен 5 мкм [22], толщина вискеризованного слоя 1 мкм, $c_0 = 0.75$. Сравним эффективные коэффициенты теплопроводности

модифицированных композитов с эффективными коэффициентами теплопроводности классических волокнистых композитов при различных объемных содержаниях волокна. Будем считать, что объемное содержание углеродного волокна в модифицированном композите равно объемному содержанию волокна в классическом композите и определяется по формуле $c = \sqrt{r_1^2 / r_3^2}$ $c = \sqrt{r_1^2 / r_3^2}$. Учитывая, что в модифицированном волокнистом композите присутствует дополнительный слой, образованный углеродными нануторбками, то максимальное объемное содержание волокна $c = 0,5$ в модифицированном композите, реализуется при $r_2 = r_3$. Графики зависимости эффективного коэффициента теплопроводности модифицированного композита с вискеризованными углеродными волокнами и эффективного коэффициента теплопроводности классического волокнистого композита приведены на рис.6.

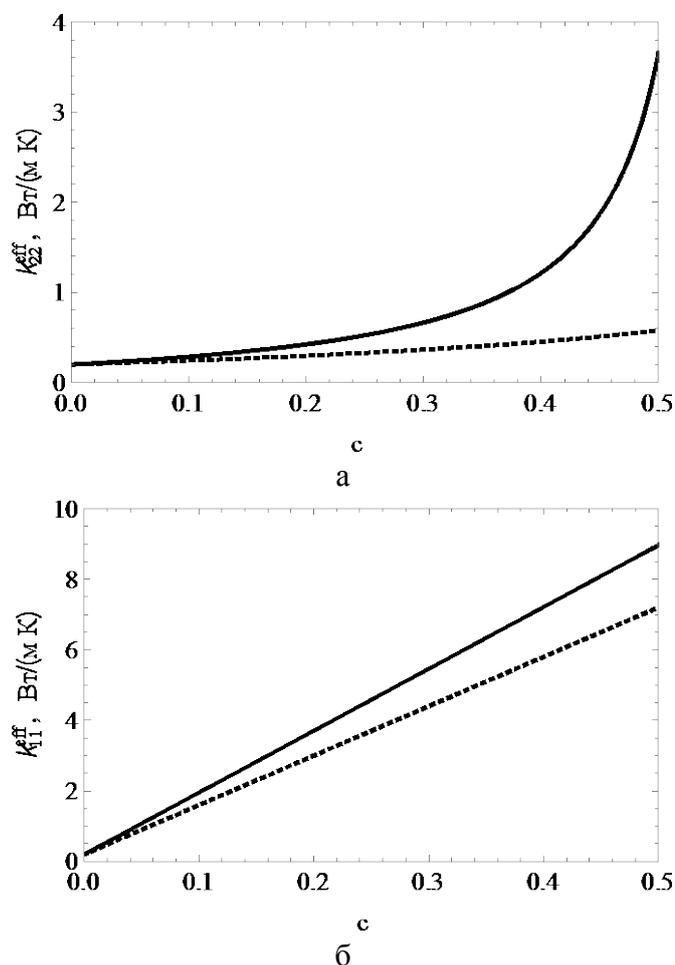


Рис.6. Графики зависимости эффективного коэффициента теплопроводности модифицированного композита с вискеризованными углеродными волокнами (—) и эффективного коэффициента теплопроводности классического волокнистого композита (----) от объемного содержания волокна c : а) в плоскости перпендикулярной оси волокна k_{22} , б) в направлении вдоль оси волокна k_{11} .

Показано (рис.6), что в волокнистом композите замена слоя матрицы вискеризованным слоем позволяет увеличить эффективный коэффициент

теплопроводности в плоскости перпендикулярной оси волокна k_{22} более, чем в 7 раз, а в направлении вдоль оси волокна k_{11} более чем в 1,3 раза.

4. ОБ ЭФФЕКТИВНОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ ВИСКЕРИЗОВАННОГО МЕЖФАЗНОГО СЛОЯ

Эффективные коэффициенты теплового расширения можно определять по формуле Левина [23]

$$\alpha = \bar{\alpha} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{1/k_1 - 1/k_2} \left(\frac{1}{k} - \left(\frac{\bar{1}}{k} \right) \right), \quad (7)$$

где $\bar{\alpha} = c_0\alpha_1 + (1-c_0)\alpha_2$, α_1, α_2 – коэффициенты теплопроводности вискерсов и матрицы, $\left(\frac{\bar{1}}{k} \right) = \frac{c_0}{k_1} + \frac{(1-c_0)}{k_2}$, $k_1 = \frac{E_1}{3(1-2\nu_1)}$, $k_2 = \frac{E_2}{3(1-2\nu_2)}$ – объемные модули вискерсов и матрицы, E_1, E_2 – модули упругости первого рода вискерсов и матрицы, ν_1, ν_2 – коэффициент Пуассона вискерсов и матрицы, k – эффективный объемный модуль. k определим по формуле для сред с произвольной объемной долей сферических включений

$$k = k_2 + \frac{c_0(k_1 - k_2)}{1 + (1-c_0)(k_1 - k_2)/(k_2 + 4/3\mu_2)}, \quad (8)$$

где $\mu_2 = E_2/(2(1+\nu_2))$ – модуль сдвига матрицы. Подставив (8) в (7) запишем выражение для эффективного модуля упругости в виде

$$\alpha = \frac{7c_0E_1(1-2\nu_2)}{4(1-c_0)E_2(1+2\nu_1) - (3+4c_0)E_1(-1+2\nu_2)}\alpha_1 + \frac{(-1+c_0)(-3E_1-4E_2+8E_2\nu_1+6E_1\nu_2)}{4(1-c_0)E_2(1+2\nu_1) - (3+4c_0)E_1(-1+2\nu_2)}\alpha_2. \quad (9)$$

Используя формулу (9), исследуем эффективный коэффициент температурного расширения вискеризованного межфазного слоя, состоящего из УНТ с коэффициентами температурного расширения $1.9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ и $2.1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [24] и матрицы с коэффициентами температурного расширения $1 \times 10^4 \text{ K}^{-1}$ и $3 \times 10^4 \text{ K}^{-1}$ [25]. Модули упругости УНТ и матрицы соответственно равны $E_1 = 1100 \text{ ГПа}$, $E_2 = 3 \text{ ГПа}$, а коэффициенты Пуассона равны $\nu_1 = 0,14$, $\nu_2 = 0,3$ [22].

На рис.7 представлен график зависимости эффективного коэффициента температурного расширения от объемного содержания УНТ при различных свойствах углеродных нанотрубок и эпоксидной матрицы.

Как следует из рис.7, эффективный коэффициент температурного расширения вискеризованного межфазного слоя α фактически не изменяется с изменением коэффициента температурного расширения включения α_1 (графики совпали). Поэтому в формуле (9) первое слагаемое можно исключить и формулу (9) переписать в виде:

$$\alpha = \frac{(-1+c_0)(-3E_1-4E_2+8E_2\nu_1+6E_1\nu_2)}{4(1-c_0)E_2(1+2\nu_1) - (3+4c_0)E_1(-1+2\nu_2)}\alpha_2.$$

Кроме этого, кривые рис.7 показывают, что значение эффективного коэффициента

температурного расширения снижается при увеличении объемного содержания включения и при уменьшении значения коэффициента теплопроводности матрицы.

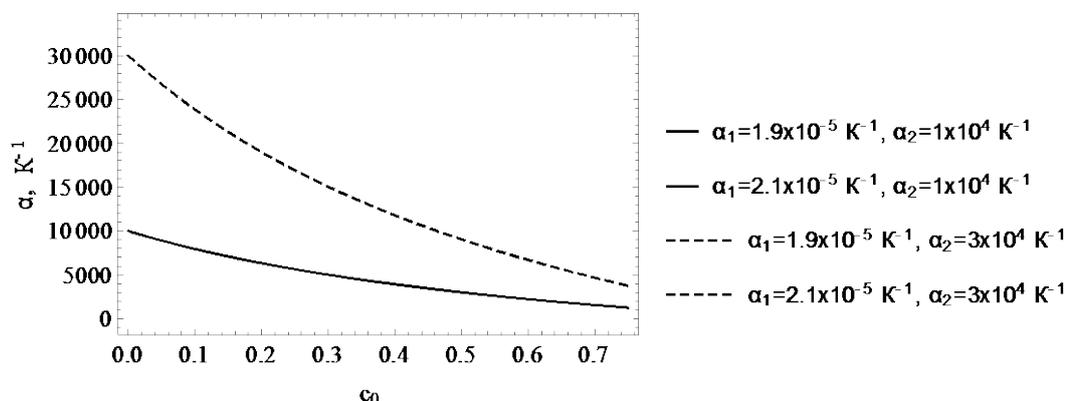


Рис.7. График зависимости эффективного коэффициента температурного расширения α межфазного вискеризованного слоя от объемного содержания включения c_0 .

Коэффициент температурного расширения функционально связан с остаточными напряжениями [26]. Поэтому по характеру зависимости коэффициента температурного расширения от объемного содержания вискерсов и свойств матрицы можно качественно судить о зависимости остаточных напряжений от тех же параметров. Так, при замене матрицы межфазным слоем с максимальным объемным содержанием вискерсов ожидается существенное уменьшение остаточных напряжений.

ВЫВОДЫ

При исследовании влияния объемного содержания модифицированного волокна, объемной концентрации вискерсов и толщины вискеризованного межфазного слоя на эффективный коэффициент теплопроводности модифицированного композита с вискеризованными волокнами было установлено: 1) увеличение объемного содержания вискерсов в вискеризованном межфазном слое приводит к увеличению эффективного коэффициента теплопроводности вискеризованного слоя и компонент тензора эффективного коэффициента теплопроводности модифицированного композита с вискеризованными волокнами, 2) увеличение толщины вискеризованного слоя сопровождается уменьшением компонент тензора эффективного коэффициента теплопроводности исследуемого композита, 3) увеличение объемного содержания включения – модифицированного волокна приводит к увеличению компонент тензора эффективного коэффициента теплопроводности композита.

В результате было установлено, что для уменьшения эффективного коэффициента температурного расширения вискеризованного межфазного слоя предпочтительнее выбирать материал матрицы с наименьшими значениями коэффициента температурного расширения, в то время как коэффициент температурного расширения включений-вискерсов не оказывает влияния на эффективные параметры вискеризованного межфазного слоя исследуемого композита. В связи с этим предложена более компактная форма записи формулы для определения эффективного коэффициента температурного расширения

двухфазных композитов с полидисперсными сферическими включениями. Также установлено, что эффективный коэффициент температурного расширения межфазного слоя можно регулировать за счет объемного содержания армирующих УНТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Biercuk M.J., Llaguno M.C., Radosavljevic M., Hyun J.K., Johnson A.T. *Carbon nanotube composites for thermal management* // Appl Phys Lett. – 2002. – Vol.80. – No.15. – Pp.2767-2769.
2. Bonnet P., Sireude D., Garnier B., Chauvet O. *Thermal properties and percolation in carbon nanotube-polymer composites* // Appl Phys Lett. – 2007. – No.91. – 201910.
3. Kim Y.A., Kamio S., Tajiri T., Hayashi T., Song S.M., Endo M. *Enhanced thermal conductivity of carbon fiber/phenolic resin composites by the introduction of carbon nanotubes* // Appl Phys Lett. – 2007. – No.90. – 093125.
4. Sihm S., Ganguli S., Roy A.K., Qu L., Dai L. *Enhancement of through-thickness thermal conductivity in adhesively bonded joints through using aligned carbon nanotubes* // Compos Sci Technol. – 2008. – No.68. – Pp.658-665.
5. Тестоедов Н.А., Двирный Г.В., Пермяков М.Ю. *Определение величины температурной деформации размеростабильных рефлекторов* // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2011. – Вып.35. – №2. – С.67-71.
6. Lin Y., Ehlert G.J., Sodano H.A. *Increase interface strength in carbon fiber composites through a ZnO nanowire interphase* // Advan. Funct. Mater. – 2009. – Vol.19. – No.16. – Pp.2654-2660.
7. Wang Y., Tang Z., Liang X., Liz-Marzan L.M., Kotov N.A. *SiO₂-Coated CdTe nanowires: bristled nano centipedes* // Nano Letters. – 2004. – Vol.4. – No.2. – Pp.225-231.
8. Galan U., Lin Y., Ehlert G.J., Sodano H.A. *Effect of ZnO nanowire morphology on the interfacial strength of nanowire coated fibers* // Compos. Sci. Technol. – 2011. – Vol.71. – Pp.946-954.
9. Sager R.J., Klein P.J., Lagoudas D.C., Zhang Q., Liu J., Dai L. *Effect of carbon nanotubes on the interfacial shear strength of T650 carbon fiber in an epoxy matrix* // Compos. Sci. Technol. – 2009. – No.69. – Pp.898-904.
10. Garcia E.J., Wardle B.L., Hart A.J., Yamamomj N. *Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ* // Compos. Sci. Technol. – 2009. – Vol.68. – No.9. – Pp.2034-2041.
11. Sharma S.P., Lakkad S.C. *Compressive strength of carbon nanotubes grown on carbon fiber reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites* // Surface & Coatings Technology. – 2010. – No.205. – Pp.350-355.
12. Lu P., Feng Y.Y., Zhang P., Chen H.M., Zhao N., Feng W. *Increasing interfacial strength in carbon fiber/epoxy composites by controlling the orientation and length of fiber carbon nanotubes grown on the fibers* // Carbon. – 2011. – No.49. – Pp.4665-4673.
13. Agnihotri P., Basu S., Kar K.K. *Effect of carbon nanotube length and density on the properties of carbon nanotubes coated carbon fiber/polyester composites* // Carbon. – 2011. – No.49. – Pp.3098-3106.
14. Gibson R.F. *A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures* // Compos. Struct. – 2010. – No.92. – Pp.2793-2810.

15. Kundalwal S.I., Ray M.C. *Estimation of thermal conductivities of a novel fuzzy fiber reinforced composite* // Intern. J. of Thermal Sciences. – 2014. – No.76. – Pp.90-100.
16. Kundalwal S.I., Suresh Kumar R. *Effective thermal conductivities of a novel fuzzy fiber-reinforced composite containing wavy carbon nanotubes* // J. Heat Transfer. Jan. – 2015. – Vol.13. – No.1. – 012401.
17. Hassanzadeh-Aghdam M.K., Mahmoodi M.J., Jamali J. *Effect of CNT coating on the overall thermal conductivity of unidirectional polymer hybrid nanocomposites* // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. – 2018. – No.124. – Pp.190-200.
18. Кристенсен Р.М. *Введение в механику композитов*. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
19. THORNEL T650/35 fiber PAN-Based Fiber. <https://www.fibermaxcomposites.com/shop/datasheets/T650.pdf> (дата обращения 25.01.2023).
20. Lee D.-K., Yoo J., Kim H., Kang B.-H., Park S.-H. *Electrical and thermal properties of carbon nanotube polymer composites with various aspect ratios* // Materials. – 2022. – Vol.15. – No.4. – 1356.
21. Wan X., Demir B., An M., Walsh T.R., Yang N. *Thermal conductivities and mechanical properties of epoxy resin as a function of the degree of cross-linking* // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol.180. – 121821.
22. Chatzigeorgiou G., Siedel G.D., Lagoudas D. *Effective mechanical of “fuzzy fiber” composites* // Composites B. – 2012. – No.43. – Pp.2577-2593.
23. Левин В.М. *О коэффициентах температурного расширения неоднородных материалов* // Изв. АН СССР. МТТ. – 1967. – С.88-94.
24. Deng L., Young R.J., Kinloch I.A., Rong S., Guoping Z., Laure N., Monthieux M. *Coefficient of thermal expansion of carbon nanotubes measured by Raman spectroscopy* // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol.104. – No.5. – 051907.
25. Glavchev I., Petrova Kr., Ivanova M. *Determination of the coefficient of thermal expansion of epoxy composites* // Polymer Testing. – 2002. – Vol.21. – No.2. – Pp.77-179.
26. Жуковский В.К., Гохман А.Р. *Связь коэффициента линейного температурного расширения с остаточными напряжениями* // Журнал технической физики. – 2009. – Т.79. – Вып.4. – С.90-96.

REFERENCES

1. Biercuk M.J., Llaguno M.C., Radosavljevic M., Hyun J.K., Johnson A.T. *Carbon nanotube composites for thermal management*. Appl Phys Lett., 2002, Vol.80, No.15, Pp.2767-2769.
2. Bonnet P., Sireude D., Garnier B., Chauvet O. *Thermal properties and percolation in carbon nanotube-polymer composites*. Appl Phys Lett., 2007, No.91, 201910.
3. Kim Y.A., Kamio S., Tajiri T., Hayashi T., Song S.M., Endo M. *Enhanced thermal conductivity of carbon fiber/phenolic resin composites by the introduction of carbon nanotubes*. Appl Phys Lett., 2007, No.90, 093125.
4. Sihn S., Ganguli S., Roy A.K., Qu L., Dai L. *Enhancement of through-thickness thermal conductivity in adhesively bonded joints through using aligned carbon nanotubes*. Compos Sci Technol., 2008, No.68, Pp.658-665.
5. Testoedov N.A., Dvirnyj G.V., Permyakov M.Yu. *Opređenje velichiny temperaturnoj deformatsii razmerostabil'nykh reflektorov [Determination of the temperature deformation value of dimensionally stable reflectors]* Vestnik

Sibirskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva, 2011, Vol.35, No.2, Pp.67-71.

6. Lin Y., Ehlert G.J., Sodano H.A. *Increase interface strength in carbon fiber composites through a ZnO nanowire interphase*. *Advan. Funct. Mater.*, 2009, Vol.19, No.16, Pp.2654-2660.
7. Wang Y., Tang Z., Liang X., Liz-Marzan L.M., Kotov N.A. *SiO₂-Coated CdTe nanowires: bristled nano centipedes*. *Nano Letters*, 2004, Vol.4, No.2, Pp.225-231.
8. Galan U., Lin Y., Ehlert G.J., Sodano H.A. *Effect of ZnO nanowire morphology on the interfacial strength of nanowire coated fibers*. *Compos. Sci. Technol.*, 2011, Vol.71, Pp.946-954.
9. Sager R.J., Klein P.J., Lagoudas D.C., Zhang Q., Liu J., Dai L. *Effect of carbon nanotubes on the interfacial shear strength of T650 carbon fiber in an epoxy matrix*. *Compos. Sci. Technol.*, 2009, No.69, Pp.898-904.
10. Garcia E.J., Wardle B.L., Hart A.J., Yamamomj N. *Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ*. *Compos. Sci. Technol.*, 2009, Vol.68, No.9, Pp.2034-2041.
11. Sharma S.P., Lakkad S.C. *Compressive strength of carbon nanotubes grown on carbon fiber reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites*. *Surface & Coatings Technology*, 2010, No.205, Pp.350-355.
12. Lu P., Feng Y.Y., Zhang P., Chen H.M., Zhao N., Feng W. *Increasing interfacial strength in carbon fiber/epoxy composites by controlling the orientation and length of fiber carbon nanotubes grown on the fibers*. *Carbon*, 2011, No.49, Pp.4665-4673.
13. Agnihotri P., Basu S., Kar K.K. *Effect of carbon nanotube length and density on the properties of carbon nanotubes coated carbon fiber/polyester composites*. *Carbon*, 2011, No.49, Pp.3098-3106.
14. Gibson R.F. *A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures*. *Compos. Struct.*, 2010, No.92, Pp.2793-2810.
15. Kundalwal S.I., Ray M.C. *Estimation of thermal conductivities of a novel fuzzy fiber reinforced composite*. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, No.76, Pp.90-100.
16. Kundalwal S.I., Suresh Kumar R. *Effective thermal conductivities of a novel fuzzy fiber-reinforced composite containing wavy carbon nanotubes*. *J. Heat Transfer*. Jan., 2015, Vol.13, No.1, 012401.
17. Hassanzadeh-Aghdam M.K., Mahmoodi M.J., Jamali J. *Effect of CNT coating on the overall thermal conductivity of unidirectional polymer hybrid nanocomposites*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, No.124, Pp.190-200.
18. Kristensen R.M. *Vvedenie v mekhaniku kompozitov [Introduction to the mechanics of composites]*. Moskva, Mir, 1982, 334 p.
19. THORNEL T650/35 fiber PAN-Based Fiber. <https://www.fibermaxcomposites.com/shop/datasheets/T650.pdf> (дата обращения 25.01.2023).
20. Lee D.-K., Yoo J., Kim H., Kang B.-H., Park S.-H. *Electrical and thermal properties of carbon nanotube polymer composites with various aspect ratios*. *Materials*, 2022, Vol.15, No.4, 1356.
21. Wan X., Demir B., An M., Walsh T.R., Yang N. *Thermal conductivities and mechanical properties of epoxy resin as a function of the degree of cross-linking*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, Vol.180, 121821.
22. Chatzigeorgiou G., Siedel G.D., Lagoudas D. *Effective mechanical of "fuzzy fiber" composites*. *Composites B*, 2012, No.43, Pp.2577-2593.

23. Levin V.M. *O koehffitsientakh temperaturnogo rasshireniya neodnorodnykh materialov [On the thermal expansion coefficients of heterogeneous materials]*. Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela, 1967, Pp.88-94.
24. Deng L., Young R.J., Kinloch I.A., Rong S., Guoping Z., Laure N., Monthieux M. *Coefficient of thermal expansion of carbon nanotubes measured by Raman spectroscopy*. Applied Physics Letters, 2014, Vol.104, No.5, 051907.
25. Glavchev I., Petrova Kr., Ivanova M. *Determination of the coefficient of thermal expansion of epoxy composites*. Polymer Testing., 2002, Vol.21, No.2, Pp.77-179.
26. Zhukovskij V.K., Goxman A.R. *Svyaz' koehffitsienta linejnogo temperaturnogo rasshireniya s ostatochnymi napryazheniyami [Relation of the linear thermal expansion coefficient to residual stresses]*. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 2009, Vol.79, Iss.4, Pp.90-96.

Поступила в редакцию 03 февраля 2023 года.

Сведения об авторах:

Кривень Галина Ивановна – к.т.н., асс., ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: Kriven_Galina@inbox.ru

Шавелкин Денис Сергеевич – ст. препод., ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: dshavelkin@inbox.ru