

УДК 539.3:621.891:678.5
DOI: 10.7868/S25000640230202

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПИИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ

© 2023 г. Академик В.И. Колесников¹, В.В. Бардушкин², А.П. Сычев³

Аннотация. Рассматриваются многокомпонентные трибокомпозиаты на основе эпоксидного связующего ЭД-20, армированные волокнами бесщелочного стекла и политетрафторэтилена. Полагается, что стеклянные волокна ориентированы вдоль осей x и y прямоугольной системы координат, а волокна политетрафторэтилена – только в направлении оси x . Это соответствует армированию материала стеклотканью, в которую вплетены политетрафторэтиленовые волокна. Построена модель, позволяющая выполнять численные расчеты значений эффективных упругих характеристик (компоненты тензора эффективных модулей упругости) и параметров упругой анизотропии указанных антифрикционных композитов. Модель опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей, используемое при решении стохастического дифференциального уравнения равновесия упругой среды. Проведены численные расчеты значений эффективных упругих характеристик и параметров упругой анизотропии в направлениях осей x , y и z прямоугольной системы координат антифрикционных полимерных композитов, учитывающие изменения величин объемных концентраций их компонентов. При вычислении значений эффективных упругих характеристик модельных трибокомпозиатов использовался метод самосогласования.

Исследования показали, что увеличение содержания волокон политетрафторэтилена приводит к уменьшению значений эффективных модулей упругости и усилению анизотропии (особенно в направлении осей x и y прямоугольной системы координат) модельных антифрикционных композитов. Установлено, что при фиксированных концентрациях эпоксидного связующего и волокон политетрафторэтилена перераспределение (в направлениях осей x и y) объемной доли волокон бесщелочного стекла для некоторых компонент тензора эффективных модулей упругости приводит к увеличению их значений, а для других, наоборот, к уменьшению. При этом происходит усиление анизотропии в направлении оси x и ее ослабление в направлении оси y , значения параметра анизотропии в направлении оси z изменяются незначительно.

Ключевые слова: моделирование, антифрикционный полимерный композит, включение, матрица, эффективные модули упругости, анизотропия.

MODELING OF EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS AND ANISOTROPY PARAMETERS OF ANTIFRICTION POLYMERIC COMPOSITES REINFORCED BY ORIENTED FIBERS

Academician RAS V.I. Kolesnikov¹, V.V. Bardushkin², A.P. Sychev³

Abstract. Multicomponent tribocomposites based on epoxy binder ED-20 reinforced with fibers of E-glass and polytetrafluoroethylene are considered. It is assumed that glass fibers are oriented along the x and y axes of the rectangular coordinate system, while polytetrafluoroethylene fibers are oriented only in the direction of the

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения (Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd, Russian Federation), Российская Федерация, 124498, г. Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: alekc_sap@mail.ru

x axis. This corresponds to the reinforcement of the material with glass fabric, in which polytetrafluoroethylene fibers are woven. A model has been constructed that makes it possible to perform numerical calculations of the values of effective elastic characteristics (components of the tensor of effective elastic moduli) and elastic anisotropy parameters of the specified antifriction composites. The model is based on the generalized singular approximation of the random field's theory, which is used in solving the stochastic differential equation for the equilibrium of an elastic medium. Numerical calculations of the effective elastic characteristics and elastic anisotropy parameters in the directions of the x , y , and z axes of the rectangular coordinate system of antifriction polymer composites are carried out, taking into account changes in the volume concentrations of their components. When calculating the values of effective elastic characteristics of model tribocomposites, the self-consistency method was used.

Studies have shown that an increase in the content of polytetrafluoroethylene fibers leads to a decrease in the values of effective moduli of elasticity and an increase in anisotropy (especially in the direction of the x and y axes of a rectangular coordinate system) of model antifriction composites. It has been established that at fixed concentrations of the epoxy binder and polytetrafluoroethylene fibers, the redistribution (in the directions of the x and y axes) of the volume fraction of E-glass fibers for some components of the tensor of effective elastic moduli leads to an increase in their values, and for others, on the contrary, to a decrease. In this case, the anisotropy increases in the direction of the x axis and weakens in the direction of the y axis, while the values of the anisotropy parameter in the direction of the z axis change insignificantly.

Keywords: modeling, antifriction polymeric composite, inclusion, matrix, effective elastic moduli, anisotropy.

ВВЕДЕНИЕ

Многокомпонентные матричные композиты находят широкое применение в узлах трения и сопряжения машин и механизмов. При подборе компонентного состава трибокомпозитов, обеспечивающего их наилучшие показатели по широкому спектру физико-механических характеристик, а также возможность управления хотя бы одной из характеристик без существенного ухудшения других, не существует универсального подхода [1; 2]. Наряду с экспериментальными, широко применяемыми для решения этой задачи, важную роль играют теоретические методы моделирования и расчета физико-механических (в частности, упругих) свойств создаваемых композитов. Теоретические методы дают возможность прогнозировать влияние состава, структуры и концентрации компонентов на указанные свойства проектируемых трибоматериалов [3–6].

Армирование многокомпонентных антифрикционных композитов часто производится не только дисперсными включениями, но и включениями неизометричной формы (волокна, диски и т.п.), специальным образом ориентированными в пространстве материала [3–6]. Так, широкое распространение в тяжелонагруженных узлах трения получили композиции на основе полимерных связующих и стеклотканей с вплетенными в них волокнами из политетрафторэтилена (ПТФЭ). Такие композиции используются, в частности, в скольз-

нах боковых опор электровозов. Подобное армирование приводит к появлению анизотропии физико-механических свойств создаваемых композитов. Эта анизотропия может быть усилена или ослаблена в зависимости от требований, предъявляемых к материалу [3–5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

В работе решается задача прогнозирования эффективных упругих характеристик антифрикционных полимерных композитов, армированных ортогонально ориентированными волокнами разного химического состава, параллельными некоторой плоскости. Полагается, что стеклянные волокна ориентированы вдоль двух определенных осей прямоугольной системы координат, а волокна ПТФЭ – в направлении только одной из этих осей. Это соответствует армированию материала стеклотканью, в которую вплетены параллельные волокна ПТФЭ. В основе решения указанной задачи лежит вычисление эффективных упругих характеристик трибокомпозитов, определяемых с помощью тензора четвертого ранга \mathbf{c}^* , связывающего средние значения напряжений $\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle$ и деформаций $\langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ в материале ($i, j, k, l = 1, 2, 3$):

$$\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle = c_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle,$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор случайной точки среды, угловые скобки здесь и далее определяют процедуру

статистического усреднения по ансамблю, которое для статистически однородных композитов, то есть при выполнении гипотезы эргодичности, совпадает с усреднением по объему [3; 7].

Для проведения корректного анализа эффективных упругих характеристик композитов, позволяющего учитывать взаимодействие элементов неоднородности, состав, форму, ориентацию и концентрацию компонентов, необходимо решать уравнения равновесия упругой неоднородной среды. Однако в общем случае получить соотношение для численных расчетов тензора эффективных модулей упругости \mathbf{c}^* не удастся. Поэтому для его вычисления используются различные приближения. Одним из таких приближений, учитывающих перечисленные выше факторы, является обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей [7]. В его рамках используется только сингулярная составляющая тензора Грина уравнений равновесия, зависящая лишь от дельта-функции Дирака, а также вводится однородное тело сравнения, материальные константы которого входят в окончательное выражение для вычисления \mathbf{c}^* . Физический смысл обобщенного сингулярного приближения заключается в предположении однородности полей напряжений и деформаций в пределах элемента неоднородности. В этом случае выражение для \mathbf{c}^* имеет следующий вид (индексы опущены) [7]:

$$\mathbf{c}^* = \langle \mathbf{c}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle \langle (\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}, \quad (1)$$

где \mathbf{I} – единичный тензор четвертого ранга; $\mathbf{c}(\mathbf{r})$ – тензор модулей упругости; двумя штрихами обозначена разность между соответствующими параметрами неоднородной среды и однородного тела сравнения, характеристики которого обозначаются далее верхним индексом «с»: $\mathbf{c}''(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r}) - \mathbf{c}^c$; $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равнове-

сия [7], являющийся тензором четвертого ранга. Для вычисления компонент g_{ijkl} тензора $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ необходимо вначале осуществить расчеты компонент a_{ijkl} тензора четвертого ранга \mathbf{A} , а затем в a_{ijkl} по двум парам индексов (i, j и k, l) провести операцию симметризации [7]. Компоненты a_{ijkl} тензора \mathbf{A} вычисляются с помощью следующего соотношения:

$$a_{ijkl} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega, \quad (2)$$

где $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ – элемент телесного угла в сферической системе координат; t_{il}^{-1} – элементы матрицы, обратной матрице \mathbf{T} с элементами $t_{il} = c_{ijkl}^c n_k n_j$; n_k и n_j ($k, j = 1, 2, 3$) – компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения. Для эллипсоидальных включений с главными полуосями l_1, l_2 и l_3 компоненты вектора нормали определяются соотношениями

$$n_1 = \frac{1}{l_1} \sin\theta \cos\varphi, \quad n_2 = \frac{1}{l_2} \sin\theta \sin\varphi, \\ n_3 = \frac{1}{l_3} \cos\theta.$$

Соотношение (1) может быть использовано для расчета эффективных характеристик статистически однородных матричных композитов с включениями эллипсоидальной формы (в том числе волокнами), ориентированными друг относительно друга [3]. Отметим, что при рассмотрении волокон длину одной из полуосей l_1, l_2 или l_3 эллипсоидального включения следует устремить к бесконечности.

Как указывалось, в случае выполнения условия эргодичности можно использовать усреднение по объему (для каждого компонента композита) [7]. Тогда операция усреднения по всему объему материала для некоторой случайной величины $\mathbf{a}(\mathbf{r})$ сводится к суммированию:

$$\langle \mathbf{a}(\mathbf{r}) \rangle = \sum_s v_s \langle \mathbf{a}_s(\mathbf{r}) \rangle, \quad (3)$$

где v_s – объемная концентрация компонента s -го типа; $\mathbf{a}_s(\mathbf{r})$ – соответствующая указанному компоненту случайная величина, $\sum_s v_s = 1$.

Далее в работе рассматривались многокомпонентные матричные композиты, армированные волокнами двух типов. К первому типу (антифрикционный компонент) относились волокна ПТФЭ, ориентированные в направлении оси x лабораторной прямоугольной системы координат. Ко второму

Таблица 1. Упругие свойства компонентов композитов (E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона)

Table 1. Elastic properties of composites components (E – Young's modulus, ν – Poisson's ratio)

Тип компонента / Component type	Материал компонента / Component material	E , ГПа / E , GPa	ν
1	ПТФЭ / PTFE	0,15	0,33
2	БЦС / E-glass	76,2	0,22
3	ЭД-20 / ED-20	3,8	0,39

типу (упрочняющий компонент) – волокна бесщелочного стекла (БЩС), ориентированные в направлении осей x и y . В качестве полимерной матрицы – компонент третьего типа – рассматривалась эпоксидная смола ЭД-20. Упругие свойства компонентов, полагавшихся при проведении моделирования изотропными, приведены в таблице 1 [8–10]. Полагалось, что модельные антифрикционные композиты имеют объемные концентрации компонентов v_1, v_{2x}, v_{2y} и v_3 ($v_1 + v_{2x} + v_{2y} + v_3 = 1$), где индекс «1» относится к ПТФЭ, индекс «2х» – к волокнам БЩС, ориентированным вдоль оси x , «2у» – к волокнам БЩС, ориентированным вдоль оси y , а «3» – к связующему ЭД-20.

С учетом (3) расчетное соотношение (1) для тензора эффективных модулей упругости \mathbf{c}^* примет следующий вид:

$$\mathbf{c}^* = \left(\sum_s v_s \mathbf{c}_s (\mathbf{I} - \mathbf{g}_s (\mathbf{c}_s - \mathbf{c}^c))^{-1} \right) \times \left(\sum_s v_s (\mathbf{I} - \mathbf{g}_s (\mathbf{c}_s - \mathbf{c}^c))^{-1} \right)^{-1} \quad (4)$$

В формуле (4) \mathbf{c}_s и \mathbf{c}^c – тензоры модулей упругости s -го компонента композита и однородного тела сравнения соответственно; \mathbf{g}_s – тензор $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ s -го компонента композита, вычисляемый по соотношению (2). При этом \mathbf{g}_1 соответствует волокнам ПТФЭ ($l_1 = \infty, l_2 = l_3 = 1$); \mathbf{g}_2 – волокнам БЩС, ориентированным как вдоль оси x ($l_1 = \infty, l_2 = l_3 = 1$), так и вдоль оси y ($l_2 = \infty, l_1 = l_3 = 1$); \mathbf{g}_3 – связующему ЭД-20 (при вычислении \mathbf{g}_3 полагалось, что $l_1 = l_2 = l_3 = 1$).

Для проведения модельных расчетов эффективных упругих характеристик в работе при операциях

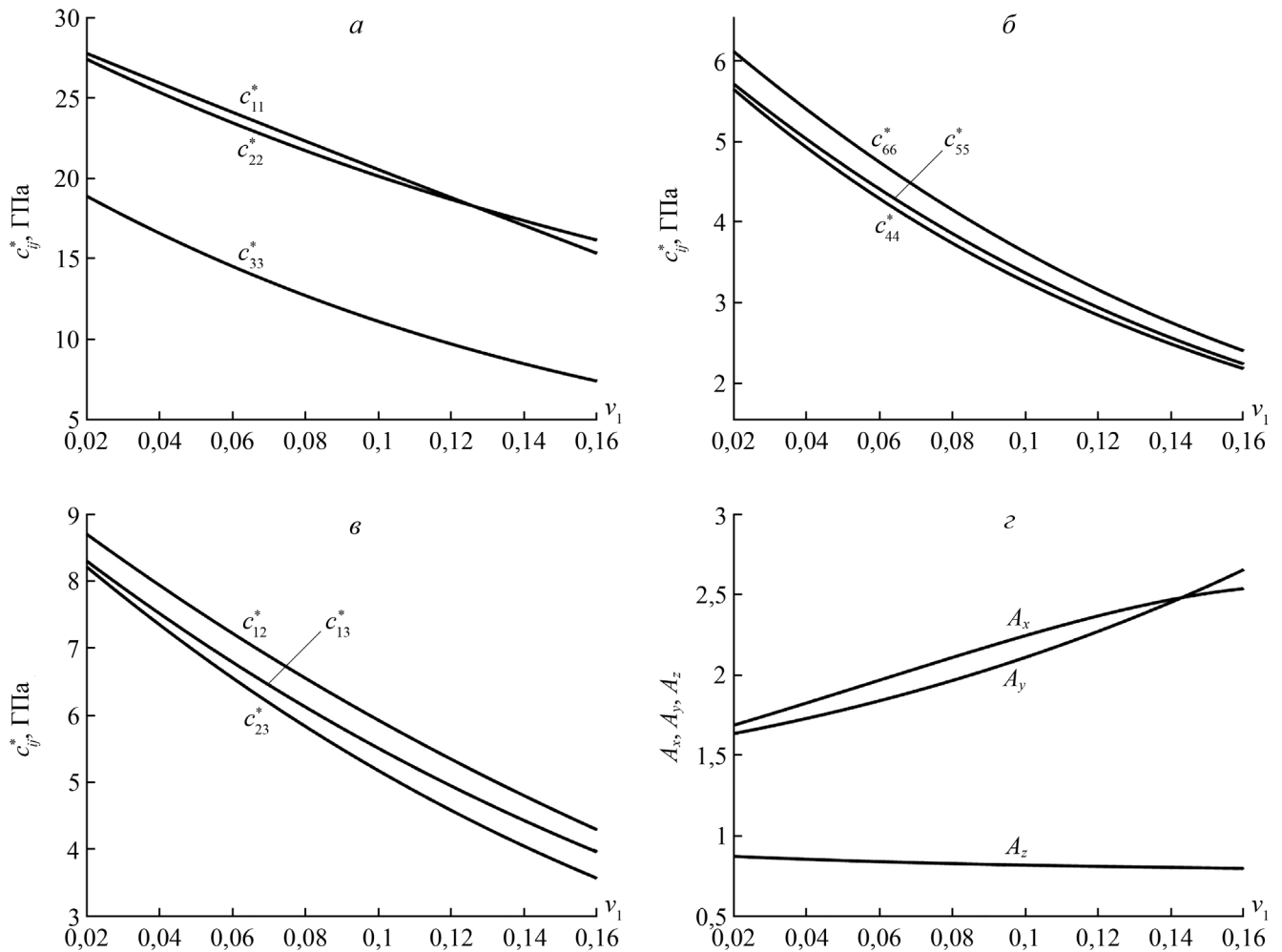


Рис. 1. Зависимости отличных от нуля эффективных модулей упругости композита и параметров анизотропии от объемного содержания волокон ПТФЭ: $a - c_{11}^*, c_{22}^*, c_{33}^*$; $б - c_{44}^*, c_{55}^*, c_{66}^*$; $в - c_{12}^*, c_{13}^*, c_{23}^*$; $г - A_x, A_y, A_z$.
Fig. 1. Dependences of non-zero effective elastic moduli of the composite and anisotropy parameters on the volume content of PTFE fibers: $a - c_{11}^*, c_{22}^*, c_{33}^*$; $б - c_{44}^*, c_{55}^*, c_{66}^*$; $в - c_{12}^*, c_{13}^*, c_{23}^*$; $г - A_x, A_y, A_z$.

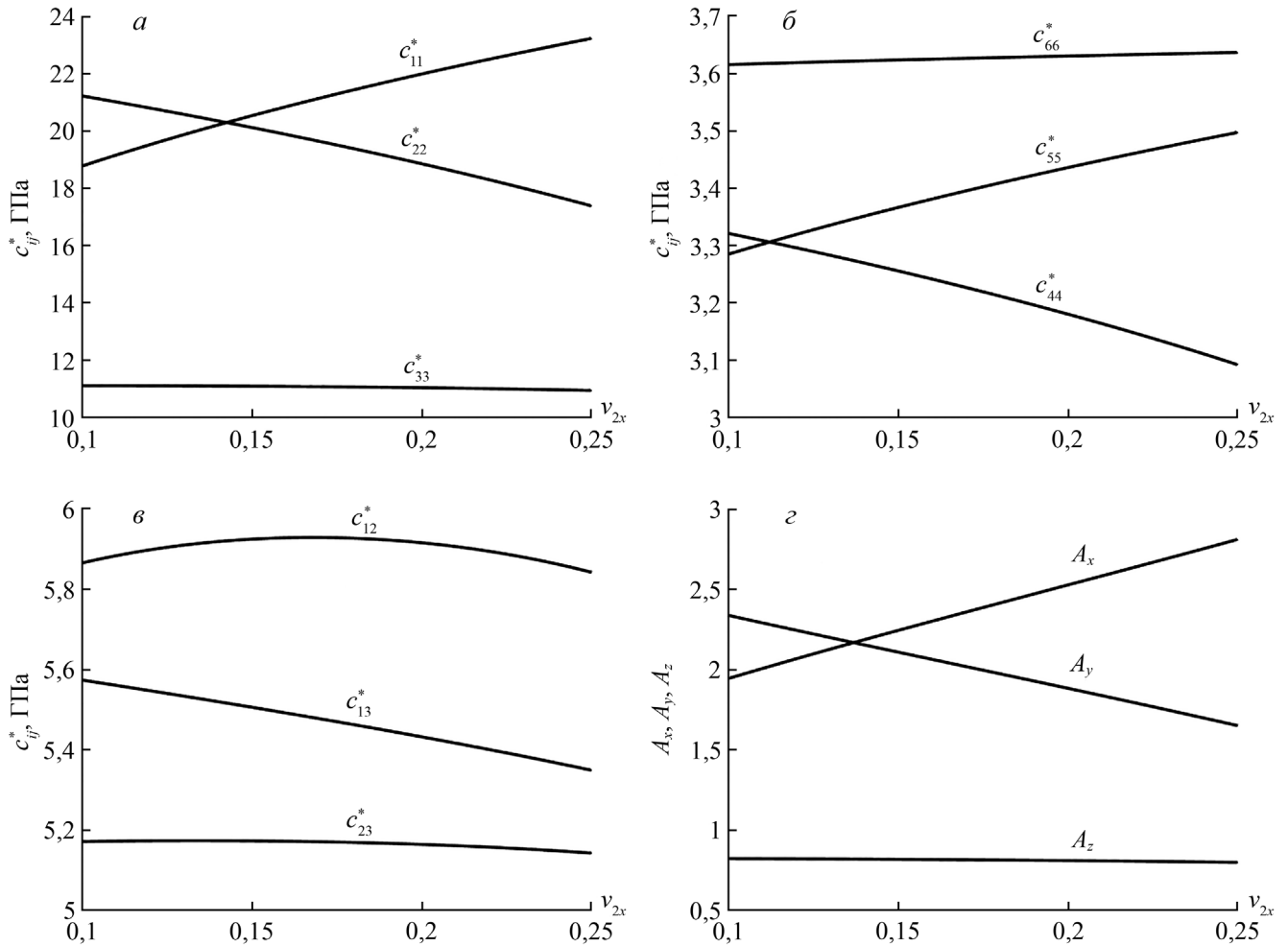


Рис. 2. Зависимости отличных от нуля эффективных модулей упругости композита и параметров анизотропии от объемного содержания волокон БЩС, ориентированных вдоль оси x : $a - c_{11}^*, c_{22}^*, c_{33}^*$; $б - c_{44}^*, c_{55}^*, c_{66}^*$; $в - c_{12}^*, c_{13}^*, c_{23}^*$; $з - A_x, A_y, A_z$.

Fig. 2. Dependences of the non-zero effective elastic moduli of the composite and the anisotropy parameters on the volume content of E-glass fibers oriented along the x axis: $a - c_{11}^*, c_{22}^*, c_{33}^*$; $б - c_{44}^*, c_{55}^*, c_{66}^*$; $в - c_{12}^*, c_{13}^*, c_{23}^*$; $з - A_x, A_y, A_z$.

над тензорами использовалась их матричная форма записи, переход к которой осуществлялся по общепринятым правилам [7]. При этом ненулевые элементы c_{ij} ($i, j = 1, \dots, 6$) симметрической матрицы тензора модулей упругости \mathbf{c} для изотропного материала выражались через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν следующим образом [7]:

$$c_{11} = c_{22} = c_{33} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)};$$

$$c_{44} = c_{55} = c_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)};$$

$$c_{12} = c_{13} = c_{23} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}.$$

При вычислении упругих характеристик однородного тела сравнения рассматриваемых антифрикционных композитов использовался метод

самосогласования [7; 11]. Для этого в работе была организована итерационная процедура, в которой в качестве параметров \mathbf{c}^c тела сравнения были взяты значения тензора модулей упругости, полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения брались упругие характеристики, полученные в приближении Хилла, то есть среднего арифметического значений, полученных в приближениях Фойгта и Ройсса [7; 11]. Выход из итерационной процедуры осуществлялся, когда максимальная разница между модулями \mathbf{c}^c составляла менее 0,01 ГПа.

Результаты модельных расчетов значений ненулевых элементов c_{ij}^* (ГПа) матрицы тензора эффективных модулей упругости \mathbf{c}^* от увеличения концентрации ν_1 волокон ПТФЭ при объемных долях матрицы ЭД-20 и волокон БЩС (ориентированных

вдоль оси y), равных $\nu_3 = 0,5$ и $\nu_{2y} = 0,25$, приведены на рисунке 1а, б, в. Одновременно с расчетами c_{ij}^* были проведены вычисления коэффициентов упругой анизотропии A_x , A_y и A_z в направлениях соответственно осей x , y и z лабораторной системы координат. Параметры анизотропии A_x и A_z вычислялись по следующим формулам:

$$A_x = \frac{c_{11}^* - c_{12}^*}{2c_{44}^*}, \quad A_z = \frac{c_{33}^* - c_{23}^*}{2c_{66}^*}. \quad (5)$$

Параметр анизотропии A_y вычислялся по формуле для коэффициента A_x , но для этого при проведении модельных расчетов полагалось, что волокна ПТФЭ и БЩС, ориентированные первоначально вдоль оси x , переориентировались в направлении оси y , а волокна БЩС, ориентированные вдоль оси y , переориентировались в направлении оси x . Результаты вычислений представлены на рисунке 1з.

Также в работе были проведены модельные расчеты значений ненулевых элементов c_{ij}^* (ГПа) матрицы тензора эффективных модулей упругости \mathbf{c}^* от увеличения концентрации ν_{2x} волокон БЩС, ориентированных вдоль оси x , при объемных долях матрицы ЭД-20 и волокон ПТФЭ, равных $\nu_3 = 0,5$ и $\nu_1 = 0,1$. Результаты моделирования приведены на рисунке 2а, б, в. Как и выше, по формулам (5) одновременно с вычислением значений c_{ij}^* были проведены расчеты коэффициентов упругой анизотропии A_x , A_y и A_z в направлениях соответственно осей x , y и z (рис. 2з).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований эффективных упругих характеристик и параметров

анизотропии антифрикционных полимерных композитов, армированных ориентированными волокнами, можно заключить следующее:

– Увеличение содержания волокон ПТФЭ приводит к уменьшению значений компонент тензора эффективных модулей упругости модельных антифрикционных композитов и к усилению анизотропии (особенно вдоль направлений осей x и y прямоугольной системы координат).

– При фиксированных концентрациях эпоксидного связующего и волокон ПТФЭ перераспределение (в направлениях x и y) объемной доли волокон БЩС для некоторых компонент тензора эффективных модулей упругости приводит к увеличению их значений, а для других, наоборот, к уменьшению. При этом происходит усиление анизотропии в направлении x и ее ослабление в направлении y , значения параметра анизотропии в направлении оси z изменяются незначительно.

– Поскольку вариации объемных содержаний включений любого типа приводят к значительному изменению эффективных упругих характеристик композитных материалов, необходимы дополнительные экспериментальные исследования по оптимизации концентраций волокон ПТФЭ и БЩС с целью максимального улучшения трибохарактеристик рассматриваемых антифрикционных композитов без существенного ухудшения их упруго-прочностных показателей.

Исследование выполнено в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № государственной регистрации проекта 122020100339-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичинадзе А.В., Матвеевский Р.М., Браун Э.Д. 1986. *Материалы в триботехнике и в нестационарных процессах*. М., Наука: 240 с.
2. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А. 2004. *Полимерные композиционные материалы в триботехнике*. М., Недра: 262 с.
3. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Колесников И.В. 2012. *Микромеханика поликристаллов и композитов (напряженно-деформированное состояние и разрушение)*. Ростов н/Д, изд-во РГУПС: 288 с.
4. Колесников И.В. 2012. Упругие характеристики трехкомпонентных антифрикционных композитов с ориентированными неизометричными включениями. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 32(3): 150–157.
5. Бардушкин В.В., Колесников И.В., Флек Б.М., Сычев А.П., Яковлев В.Б. 2012. Упругие характеристики антифрикционных тканых композитов для тяжело нагруженных узлов трения. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 12: 13–18.
6. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Сычев А.П. 2017. Эксплуатационные упругие свойства хаотически армированных трибокомпозитов. *Мир транспорта*. 15(2): 38–46.
7. Шермергор Т.Д. 1977. *Теория упругости микронеоднородных сред*. М., Наука: 399 с.
8. *Физические величины: справочник*. 1991. М., Энергоатомиздат: 1232 с.
9. Гутников С.И., Лазорьяк Б.И., Селезнев А.Н. 2010. *Стеклые волокна*. М., изд-во МГУ: 53 с.
10. Лапицкий В.А., Крицук А.А. 1986. *Физико-механические свойства оксидных полимеров и стеклопластиков*. Киев, Наукова думка: 92 с.
11. Паньков А.А. 2008. *Методы самосогласования механики композитов*. Пермь, изд-во Пермского государственного технического университета: 253 с.

REFERENCES

1. Chichinadze A.V., Matveevskiy R.M., Braun E.D. 1986. *Materialy v tribotekhnike i v nestatsionarnykh protsessakh*. [Materials in tribotechnics and non-stationary processes]. Moscow, Nauka: 240 p. (In Russian).
2. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Baybaratskaya M.Yu., Mamaev O.A. 2004. *Polimernye kompozitsionnye materialy v tribotekhnike*. [Polymeric composites in a tribotechnics]. Moscow, Nedra: 262 p. (In Russian).
3. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Yakovlev V.B., Sychev A.P., Kolesnikov I.V. 2012. *Mikromekhanika polikristallov i kompozitov (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i razrushenie)*. [Micromechanics of polycrystals and composites (stress-strain state and destruction)]. Rostov-on-Don, Rostov State Transport University: 288 p. (In Russian).
4. Kolesnikov I.V. 2012. [Elastic characteristics of three-component antifriction composites with oriented non-isometric inclusions]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta puty soobshcheniya*. 32(3): 150–157. (In Russian).
5. Bardushkin V.V., Kolesnikov V.I., Flek B.M., Sychev A.P., Yakovlev V.B. 2012. [Elastic characteristics of the antifriction woven composites for hard-loaded friction knots]. *Friction & Lubrication in Machines and Mechanisms*. 12: 13–18. (In Russian).
6. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Sychev A.P. 2017. [Operational elastic properties of chaotically reinforced tribocomposites]. *Mir transporta*. 15(2): 38–46. (In Russian).
7. Shermergor T.D. 1977. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred*. [Micromechanics of inhomogeneous medium]. Moscow, Nauka: 399 p. (In Russian).
8. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik*. [Physical quantities: reference book]. 1991. Moscow, Energoatomizdat: 1232 p. (In Russian).
9. Gutnikov S.I., Lazoryak B.I., Seleznev A.N. 2010. *Steklyannye volokna*. [Glass fibers]. Moscow, Moscow State University: 53 p. (In Russian).
10. Lapitskiy V.A., Kritsuk A.A. 1986. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva epoksidnykh polimerov i stekloplastikov*. [Physical and mechanical properties of the epoxy polymers and fiberglasses]. Kiev, Naukova dumka: 92 p. (In Russian).
11. Pan'kov A.A. 2008. *Metody samosoglasovaniya mekhaniki kompozitov*. [Methods of self-consistency mechanics of composites]. Perm, Perm State Technical University: 253 p. (In Russian).

Поступила 13.04.2023