

DOI: 10.32864/polymmattech-2019-5-3-42-48

УДК 539.3:621.891:678.5

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

В. В. БАРДУШКИН¹, А. П. СЫЧЕВ²⁺, Д. А. КАРТАШОВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», пл. Шокина, 1, 124498, г. Зеленоград, г. Москва, Россия

²Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр-т Чехова, 41, 344006, г. Ростов-на-Дону, Россия

Рассматриваются многокомпонентные фрикционные полимерные композиты (ФПК) на основе эпоксифенольного связующего, армированные волокнами бесцелочного стекла и дисперсными включениями каучука, глинозема, графита и барита. Предполагали, что стеклянные волокна ориентированы вдоль осей x и y прямоугольной системы координат и имеют в этих направлениях одинаковые величины объемных концентраций, что соответствует армированию материала тканью. Построена математическая модель, позволяющая выполнять численные расчеты значений эффективных упругих характеристик (компоненты тензора эффективных модулей упругости) и параметров упругой анизотропии ФПК. Модель опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей, используемое при решении стохастического дифференциального уравнения равновесия упругой среды. Провели численные расчеты значений эффективных упругих характеристик и параметров упругой анизотропии в направлениях осей x , y и z прямоугольной системы координат ФПК, учитывающие изменения величин объемных концентраций их компонентов. При вычислении значений эффективных упругих характеристик модельных ФПК использован метод самосогласования.

Установлено, что увеличение содержания включений каучука приводит к снижению значений компонент тензора эффективных модулей упругости модельных фрикционных композитов. Увеличение объемных концентраций как дисперсных добавок глинозема, графита и барита, так и ориентированных волокон бесцелочного стекла — к росту аналогичных значений. Увеличение объемного содержания включений каучука и волокон бесцелочного стекла приводит к усилению анизотропии (особенно вдоль направлений осей x и y прямоугольной системы координат). Увеличение объемных концентраций глинозема, графита и барита приводит к ослаблению анизотропии в направлениях x , y и z .

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

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

V. V. BARDUSHKIN¹, A. P. SYCHEV²⁺, D. A. KARTASHOV¹

¹National Research University of Electronic Technology, Shokin Sq., 1, 124498, Zelenograd, Moscow, Russia

²Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Chekhov Ave, 41, 344006, Rostov-on-Don, Russia

Multicomponent tribocomposites based on an epoxyphenol binder reinforced with E-glass fibers and dispersed inclusions of rubber, alumina, graphite and barite are considered. It is assumed glass fibers are

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: alekc_sap@mail.ru

oriented along the x and y axes of a rectangular coordinate system and have the same volume concentrations in these directions. It corresponds to the reinforcement of the material with fabric. A calculating model of effective elastic characteristics (components of effective elastic modulus tensor) and elastic anisotropy parameters of these friction composites is constructed. The model is based on a generalized singular approximation of random field theory, used in solving the stochastic differential equation of equilibrium of an elastic medium. Numerical calculations of the values of effective elastic characteristics and parameters of elastic anisotropy in the directions of the x , y , and z axes of a rectangular coordinate system of polymer friction composites taking into account changes in the volume concentrations of their components are performed. The self-consistency method was used in calculating the effective elastic characteristics of the model tribocomposites.

Studies have shown that an increase rubber of inclusions leads to a decrease in the components value of the tensor of effective elastic modulus model friction composites. An increase in volume concentrations of dispersed additives of alumina, graphite and barite and oriented E-glass fibers leads to an increase in similar values. An increase in the volume content of rubber inclusions and E-glass fibers leads to increased anisotropy (especially along the directions of the x and y axes of a rectangular coordinate system). An increase in volume concentrations of alumina, graphite, and barite leads to a weakening of anisotropy in the x , y , and z directions.

Keywords: modeling, friction polymer composite, inclusion, matrix, effective elastic modulus, anisotropy.

Введение

В последние десятилетия полимерные композиционные материалы находят все большее применение в машиностроении. В частности, они являются важнейшими элементами узлов трения автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта [1]. В тормозных системах широко используются фрикционные полимерные композиты (ФПК) [2–5]. Это, прежде всего, обусловлено развитием и совершенствованием экологически безвредных бесасбестовых технологий. Указанные материалы должны обеспечивать стабильность физико-механических и трибологических характеристик деталей при длительных сроках эксплуатации машин и механизмов независимо от погодных условий, маложумность процесса торможения и т. д. [6–8]. Кроме того, немаловажными достоинствами являются доступность и дешевизна компонентов ФПК, а также относительная простота технологий их изготовления [1, 3–5, 9–11].

Физико-механические свойства ФПК, величина и стабильность коэффициента трения существенно зависят от состава, структуры и концентрации наполнителей [3–5, 9–11]. Следует отметить, что экспериментальные методы оптимизации являются довольно трудоемкими и дорогостоящими ввиду необходимости варьирования значений целого ряда физико-механических параметров неоднородных материалов. Кроме того, экспериментальные результаты не гарантируют оптимальности получаемого решения. Поэтому задача разработки теоретических методов расчета физико-механических характеристик структурно-неоднородных трибоматериалов, включая упругие свойства, является актуальной.

Прогнозирование и расчет напряженно-деформированного состояния ФПК сводится к решению стохастического дифференциального уравнения равновесия упругой среды [12, 13]. Для большого количества неоднородностей решение этой задачи в трехмерной постановке для ФПК со случайным расположением и ориентацией включений

друг относительно друга представляет собой трудноразрешимую (даже численно) проблему. Однако во многих случаях для описания непредельных свойств неоднородного материала, имеющего большое количество включений, средний размер которых много меньше характерного макроразмера, детальное знание физико-механических полей не является необходимым. При непредельных внешних воздействиях (в частности при нагрузках, далеких от разрушающих) композит с большой степенью точности ведет себя как гомогенная среда с некоторыми однородными в масштабе всего материала, а именно, эффективными свойствами.

Существует большое количество подходов и методов, позволяющих определять эффективные характеристики неоднородных материалов. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Существенные обзоры по данной теме можно найти, например в [12, 13]. Отметим, что одним из наиболее распространенных современных подходов к определению эффективных упругих характеристик ФПК, с помощью которого возможен учет взаимодействий включений, их состава, формы, ориентации и концентрации, является обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей [12].

Цель работы — построение модели и проведение численных расчетов значений эффективных упругих характеристик и параметров упругой анизотропии полимерных фрикционных композитов, армированных ориентированными в двух взаимно перпендикулярных направлениях волокнами и дисперсными добавками, с учетом изменений величин объемных концентраций компонентов трибоматериалов.

Построение модели

Эффективные упругие характеристики ФПК определяются тензором модулей упругости c^* (символ «*» здесь и далее означает, что рассматриваются эффективные характеристики) [12, 13]. С помощью

тензора четвертого ранга c^* средние значения напряжений $\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle$ выражают через средние значения деформаций $\langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$

$$\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle = c_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3,$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, задающий положение случайной точки неоднородной среды, угловые скобки здесь и далее определяют процедуру усреднения по объему [12]. Отметим, что для многокомпонентных ФПК операция усреднения по всему объему материала для некоторой случайной величины $a(\mathbf{r})$ сводится к суммированию

$$\langle a(\mathbf{r}) \rangle = \sum_s v_s \langle a_s(\mathbf{r}) \rangle, \quad (1)$$

где v_s — объемная концентрация компонента s -го типа, а $a_s(\mathbf{r})$ — соответствующая указанному компоненту случайная величина, $\sum_s v_s = 1$ [12, 13].

Для проведения численного моделирования значений эффективных упругих свойств ФПК в настоящей работе применяется обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей [12]. Тогда выражение для тензора c^* имеет следующий вид (индексы опущены) [12, 13]:

$$c^* = \left\langle c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle \left\langle (I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle^{-1}, \quad (2)$$

где I — единичный тензор четвертого ранга; $c(\mathbf{r})$ — тензор модулей упругости; двумя штрихами обозначена разность между соответствующими параметрами неоднородной среды и однородного тела сравнения, характеристики которого обозначаются далее верхним индексом «с» $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^c$; $g(\mathbf{r})$ — интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия, являющийся тензором четвертого ранга. Для вычисления компонент g_{ijkl} тензора $g(\mathbf{r})$ необходимо вначале осуществить расчеты компонент a_{ijkl} тензора четвертого ранга A , а затем в a_{ijkl} по двум парам индексов (i, j и k, l) провести операцию симметризации [12]. Компоненты a_{ijkl} тензора A определяют с помощью следующего соотношения:

$$a_{ijkl} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega, \quad (3)$$

где $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ — элемент телесного угла в сферической системе координат, t_{il}^{-1} — элементы матрицы, обратной матрице T с элементами $t_{il} = c_{ijkl}^c n_k n_j$, а 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 определяют соотношениями

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

Проведение моделирования

Далее в работе рассматривали ФПК с включениями нескольких типов. К первому типу относились равномерно распределенные в пространстве ФПК дисперсные включения каучука. Ко второму типу — волокна бесщелочного стекла (БЩС), ориентированные вдоль осей x и y прямоугольной системы координат и имеющие в этих направлениях одинаковые величины объемных концентраций, что соответствует армированию композита тканью. К третьему типу — равномерно распределенные в пространстве композита дисперсные включения минерального порошка, состоящего из поликристаллов глинозема (Al_2O_3), графита и барита ($BaSO_4$), взятых в отношении 1:1:1 (по объему). В качестве компонента четвертого типа выбрали эпоксиэфенольное связующее (ЭФС) на основе эпоксидной диановой смолы, отверждаемой малофенольной фенолформальдегидной смолой новолачного типа (с содержанием фенола менее 0,5%) в отношении 60 : 40 мас.ч. (ЗАО «ЭНПЦ Эпитал», г. Москва). Отметим, что выбор состава компонентов ФПК, их формы, ориентации в пространстве материала и объемного содержания осуществляли, исходя из проведенного патентного анализа (в частности [9–11]) и рекомендаций, полученных авторами при разработке концепции создания матричных ФПК с наномодифицированными добавками (проект РФФИ № 19-08-00111-а). Рассматриваемые ФПК предназначены для использования в тормозных колодках на железнодорожном и автомобильном транспорте, в подъемных кранах, муфтах сцепления, а также в качестве демпфирующих и вибропоглощающих материалов.

Все компоненты модельных ФПК, кроме графита, полагались изотропными. Упругие свойства изотропных компонентов приведены в табл. 1 (E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона).

Таблица 1 — Упругие свойства изотропных компонентов композитов [14]

Table 1 — Elastic properties of isotropic components of composites [14]

| Тип компонента | Материал компонента | E , ГПа | ν |
|----------------|---------------------|-----------|-------|
| 1 | Каучук | 0,008 | 0,47 |
| 2 | БЩС | 76,200 | 0,36 |
| 3 | Глинозем | 140,000 | 0,32 |
| | Барит | 59,000 | 0,28 |
| 4 | ЭФС | 3,700 | 0,42 |

Для осуществления модельных расчетов при операциях над тензорами использовали их матричную форму записи. При этом учитывали, что для

изотропного материала значения ненулевых элементов c_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) симметрической матрицы c тензора модулей упругости выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν следующим образом [12]:

$$\begin{aligned} c_{11} = c_{22} = c_{33} &= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \\ c_{44} = c_{55} = c_{66} &= \frac{E}{2(1+\nu)}, \\ c_{12} = c_{13} = c_{23} &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \end{aligned}$$

Поскольку графит является анизотропным материалом с гексагональной кристаллической структурой, в работе использовали следующие значения (ГПа) для ненулевых элементов матрицы c тензора модулей упругости его монокристаллов [14]:

$$\begin{aligned} c_{11} = c_{22} = 1109,0, \quad c_{12} = c_{21} = 139,0, \quad c_{33} = 38,7, \\ c_{44} = c_{55} = 5,0, \quad c_{66} = 0,5(c_{11} - c_{12}) = 485,0. \end{aligned}$$

Для проведения модельных расчетов эффективных упругих свойств ФПК использовали значения эффективных характеристик поликристаллического графита, полученные методом самосогласования. Эти характеристики были определены с помощью усреднения по всевозможным ориентациям кристаллографических осей кристаллитов (с изотропной функцией распределения), сводящегося к интегрированию по всевозможным углам Эйлера [12, 13]. С этой целью в работе организовали итерационную процедуру, в которой в качестве параметров c^c тела сравнения брали значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения выбирали величины упругих характеристик, полученных в приближении Фойгта [12, 13]. Выход из итерационной процедуры осуществляли, когда максимальная разница между соответствующими значениями модулей c^c составляла менее 0,01 ГПа.

При проведении модельных расчетов значений эффективных упругих характеристик рассматриваемых ФПК полагали, что дисперсные включения каучука, глинозема, графита и барита имеют вид сфер одинакового радиуса $R = 1$, а волокна БЩС представляют собой равные друг другу сильно вытянутые вдоль осей x и y эллипсоиды вращения (l_1, l_2 и l_3 — полуоси этих эллипсоидов). Кроме того, считали, что модельные композиты имеют объемные концентрации компонентов ν_1, ν_2, ν_3 и ν_4 , где индекс «1» соответствует каучуку, индекс «2» — волокнам БЩС, «3» — минеральному порошку, а «4» — ЭФС.

С учетом (1) расчетная формула (2) для тензора c^* преобразуется к следующему виду:

$$c^* = \left(\sum_s \nu_s c_s (I - g_s (c_s - c^c))^{-1} \right) \left(\sum_s \nu_s (I - g_s (c_s - c^c))^{-1} \right)^{-1}. \quad (4)$$

В формуле (4) c_s и c^c — тензоры модулей упругости s -го компонента композита и однородного тела сравнения соответственно; g_s — это тензор $g(\mathbf{r})$ s -го компонента композита, вычисляемый по соотношению (3). При этом g_1 и g_3 соответствуют сферическим включениям каучука, глинозема, графита и барита ($l_1 = l_2 = l_3 = 1$); g_2 — волокнам БЩС ($l_1 \rightarrow \infty, l_2 = l_3 = 1$ для волокон, ориентированных вдоль оси x ; $l_2 \rightarrow \infty, l_1 = l_3 = 1$ — для волокон, ориентированных вдоль оси y), g_4 — ЭФС ($l_1 = l_2 = l_3 = 1$).

При вычислении значений упругих характеристик c^c однородного тела сравнения рассматриваемых фрикционных композитов использовали метод самосогласования [12, 13]. Для этого в работе организовали итерационную процедуру, в которой в качестве параметров c^c брали значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения выбирали величины упругих характеристик в приближении Хилла, т. е. среднего арифметического значений, полученных в приближениях Фойгта и Ройсса [12, 13]. Выход из итерационной процедуры осуществляли, когда максимальная разница между соответствующими значениями модулей c^c составляла менее 0,01 ГПа.

На рис. 1, а, 2, а, 3, а приведены результаты численных расчетов значений эффективных упругих характеристик — элементов c_{ij}^* ($i, j = 1, 2, \dots, 6$)

матрицы тензора c^* — в зависимости от вариаций объемных содержаний компонентов модельных ФПК. Номера кривых на указанных рисунках соответствуют значениям ненулевых элементов c_{ij}^* , при этом: 1 — $c_{11}^* = c_{22}^*$, 2 — c_{33}^* , 3 — $c_{44}^* = c_{55}^*$, 4 — c_{66}^* , 5 — c_{12}^* , 6 — $c_{13}^* = c_{23}^*$.

На рисунках 1, б, 2, б, 3, б приведены результаты численных расчетов значений параметров упругой анизотропии A_x и A_z трибокомпозитов в направлениях осей x и z лабораторной прямоугольной системы соответственно [12, 13]:

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

Значения параметра анизотропии A_y в направлении оси y совпадают со значениями A_x в силу структуры рассматриваемых материалов. Поэтому значения A_y на этих рисунках не показаны.

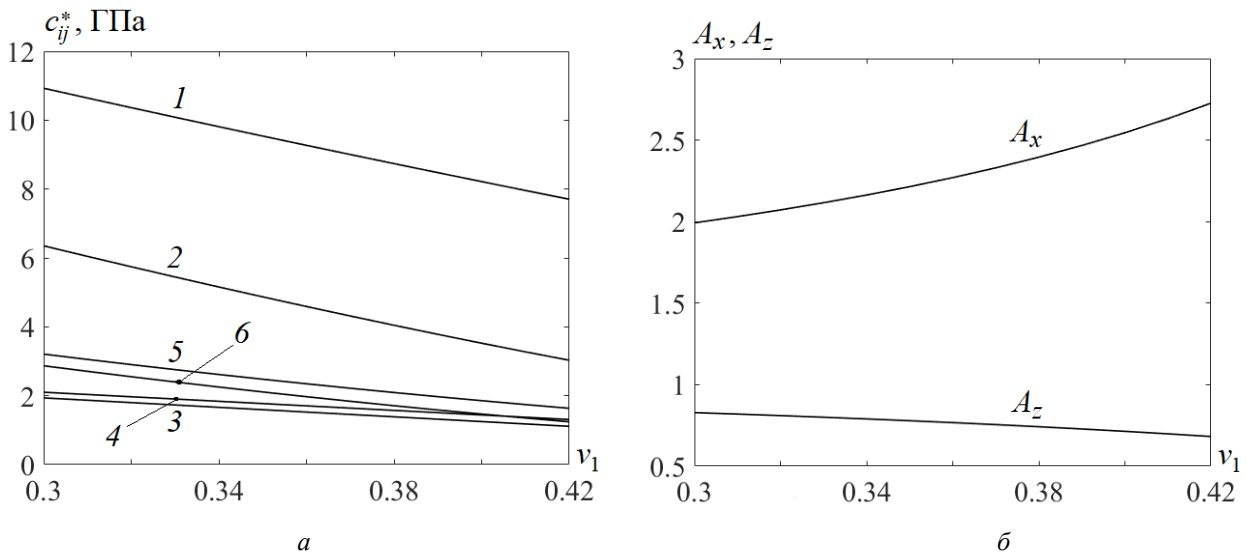


Рисунок 1 — Изменение значений c_{ij}^* (а) и параметров анизотропии (б) при увеличении объемного содержания v_1 включений каучука ($v_2 = 0,16$, $v_3 = 0,2$)

Fig. 1 — Variation of the values c_{ij}^* (а) and anisotropy parameters (б) with increasing volume content v_1 of rubber inclusions ($v_2 = 0,16$, $v_3 = 0,2$)

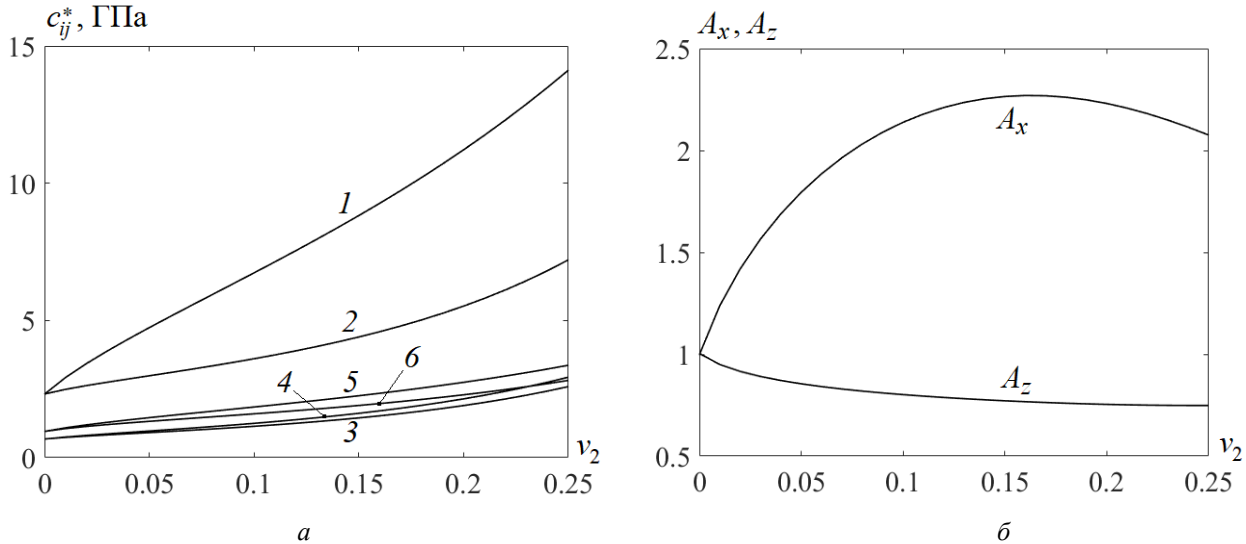


Рисунок 2 — Изменение значений c_{ij}^* (а) и параметров анизотропии (б) при увеличении объемного содержания v_2 волокон БЩС ($v_1 = 0,36$, $v_3 = 0,2$)

Fig. 2 — Variation of the values c_{ij}^* (а) and anisotropy parameters (б) with increasing volume content v_2 of E-glass fibers ($v_1 = 0,36$, $v_3 = 0,2$)

Выводы

На основании построенной модели и проведенного численного моделирования можно заключить следующее:

– модельные фрикционные композиты обладают тетрагональной симметрией эффективных упругих свойств [12], исходя из того, что для значений ненулевых элементов c_{ij}^* симметрической матрицы тензора c^* выполняются соотношения $c_{11}^* = c_{22}^* \neq c_{33}^*$, $c_{44}^* = c_{55}^* \neq c_{66}^*$, $c_{13}^* = c_{23}^* \neq c_{12}^*$;

– увеличение концентрации как минерального порошка (глинозем, графит, барит), так и БЩС приводит к увеличению значений ненулевых элементов c_{ij}^* , увеличение же концентрации включений каучука приводит, наоборот, к уменьшению значений ненулевых элементов c_{ij}^* ;

– адекватность предложенной модели подтверждается тем, что при отсутствии волокон БЩС ФПК является изотропным: в точке $v_2 = 0$ (рис. 2) для значений ненулевых элементов c_{ij}^* (ГПа) симметрической матрицы тензора c^* и параметров анизотропии выполняются соотношения

$$\begin{aligned} c_{11}^* = c_{22}^* = c_{33}^* = 2,315, \quad c_{13}^* = c_{23}^* = c_{12}^* = 0,955, \\ c_{44}^* = c_{55}^* = c_{66}^* = 0,5(c_{11}^* - c_{12}^*) = 0,680, \\ A_x = A_y = A_z = 1; \end{aligned}$$

– увеличение объемного содержания v_2 волокон БЩС приводит к усилению анизотропии (особенно вдоль направлений осей x и y прямоугольной

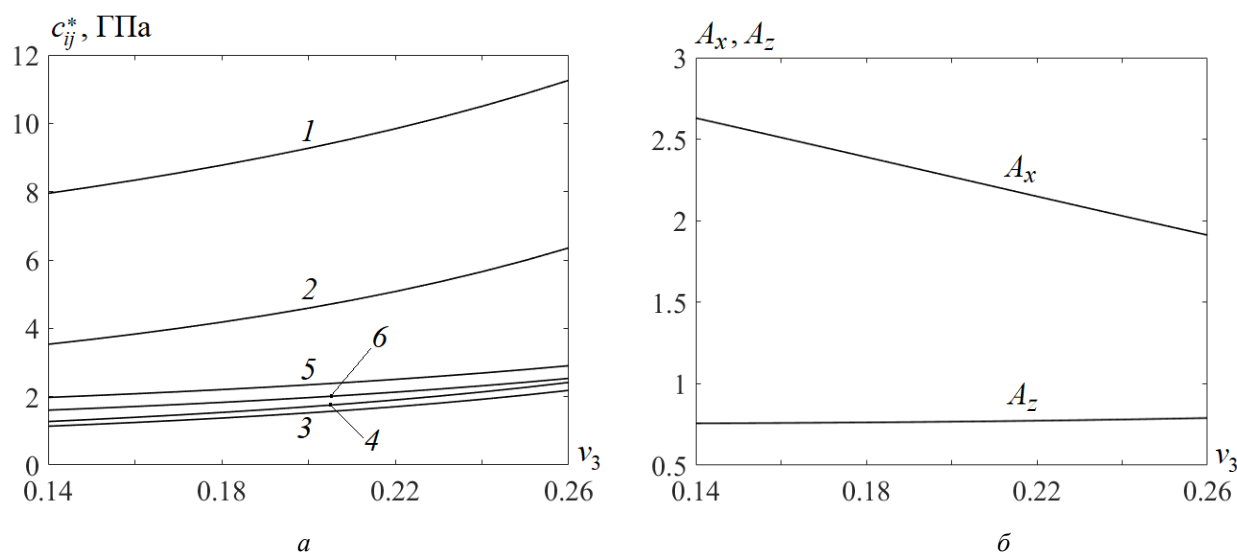


Рисунок 3 — Изменение значений c_{ij}^* (а) и параметров анизотропии (б) при увеличении объемного содержания v_3 включений минерального порошка ($v_1 = 0,36$, $v_2 = 0,16$)

Fig. 3 — Variation of the values c_{ij}^* (а) and anisotropy parameters (б) with increasing volume content v_3 of mineral powder inclusions ($v_1 = 0,36$, $v_2 = 0,16$)

системы координат), однако в важном для практики диапазоне $0,1 \leq v_2 \leq 0,25$ не наблюдается существенного изменения значений параметров анизотропии в направлениях x , y и z ;

– увеличение объемного содержания минерального порошка приводит к ослаблению анизотропии, а увеличение объемного содержания включений каучука приводит, наоборот, к усилению анизотропии (особенно вдоль направлений осей x и y).

Отметим также, что вариации величин объемных концентраций компонентов любого типа приводят к довольно значительному изменению значений эффективных упругих характеристик ФПК. Поэтому необходимы дополнительные исследования по оптимизации концентраций наполнителей — дисперсных включений (каучук, глинозем, графит и барит) и волокон БЩС — с целью максимального улучшения трибохарактеристик (низкие уровни вибрации и шума, стабильно высокие значения коэффициента трения, износостойкости и др.) рассматриваемых ФПК без существенного ухудшения значений их упругопрочностных показателей.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-08-00111-а.

Обозначения

БЩС — бесщелочное стекло; ФПК — фрикционный полимерный композит; ЭФС — эпоксифенольное связующее; A_x, A_y, A_z — параметры упругой анизотропии материала в направлении осей x, y, z соответственно; c_{ijkl} — компоненты тензора упругости c ; c_{mn} — матричная форма записи компонент c_{ijkl} тензора четвертого

ранга c ; c'' — двумя штрихами обозначается разность $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^c$, где верхним индексом «с» обозначаются характеристики однородного тела сравнения; c^* — тензор эффективных модулей упругости (символ «*» означает, что рассматриваются эффективные характеристики); E, Pa — модуль Юнга; g — тензор четвертого ранга, интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия; g_{ijkl} — компоненты тензора g ; I — единичный тензор четвертого ранга; \mathbf{r} — радиус-вектор; ν — коэффициент Пуассона; $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ — компоненты тензоров напряжений σ и деформаций ε соответственно; $\langle \bullet \rangle$ — угловые скобки обозначают статистическое усреднение.

Литература

1. Песецкий С. С., Мышкин Н. К. Полимерные композиты многофункционального назначения: перспективы разработок и применения в Беларуси (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2, № 4. С. 6–29.
2. Нилов А. С., Кулик В. И., Гаршин А. П. Анализ фрикционных материалов и технологий изготовления тормозных колодок для высоконагруженных тормозных систем с дисками из керамического композиционного материала // Новые огнеупоры. 2015. № 7. С. 57–68. doi: 10.17073/1683-4518-2015-7-57-68
3. Юсупбеков А. Х., Негматов С. С. Базальтопластики – перспективные полимерные композиционные материалы конструкционного назначения // Полимерные композиты и трибология «Поликомтриб–2019»: тезисы докладов международной научно-технической конференции (Гомель, 25–28 июня 2019 г.). Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2019. С. 132.
4. Меликсетян Н. Г. Разрушение поверхностных слоев безабе-стосых тормозных фрикционных материалов в условиях перехода от умеренного к интенсивному изнашиванию // Полимерные композиты и трибология «Поликомтриб–2019»: тезисы докладов международной научно-технической конференции (Гомель, 25–28 июня 2019 г.). Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2019. С. 225.
5. Меликсетян Н. Г., Агбалян С. Г., Меликсетян Г. Н. Безабе-стосый тормозной теплостойкий фрикционный композит с

- применением многокомпонентных материалов // Полимерные композиты и трибология «Поликомтриб–2019»: тезисы докладов международной научно-технической конференции (Гомель, 25–28 июня 2019 г.). Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2019. С. 226.
- Сергиенко В. П., Бухаров С. Н. Вибрация и шум в нестационарных процессах трения. Минск: Беларуская навука, 2012. 346 с.
 - Sergienko V. P., Bukharov S. N. Noise and vibration in friction systems. Switzerland: Springer, 2015. 251 p.
 - Мышкин Н. К., Сергиенко В. П., Бухаров С. Н., Мясникова Н. А. Влияние наноразмерных наполнителей на виброакустические характеристики фрикционных композитов // Вестник РГУПС. 2017. № 1. С. 30–35.
 - Пат. 2400503 РФ, МПК С 08 L 61/10, С 08 K 13/04, С 08 J 5/14. Фрикционный материал / Колесников В. И., Сычев А. П., Колесников И. В., Сергиенко В. П., Павлов А. П., Сидашов А. В.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». N 2008151720/05; заявл. 26.12.2008; опубл. 27.09.2010, Бюл. N 27. 7 с.
 - Пат. 2430936 РФ, МПК С 08 J 5/14, С 08 L 9/00, С 08 L 9/02, С 08 L 63/00, С 08 K 3/06, С 08 K 5/40, С 08 K 5/47. Способ получения фрикционных полимерных материалов / Колесников В. И., Лапицкий А. В., Сычев А. П., Колесников И. В., Бочкарёв Н. А., Котляр С. М., Сафонов В. Г., Седов М. П.; заявитель и патентообладатель Колесников В. И., Лапицкий А. В., Сычев А. П., Колесников И. В., Бочкарёв Н. А., Котляр С. М., Сафонов В. Г., Седов М. П. N 2009132725/05; заявл. 31.08.2009; опубл. 10.10.2011, Бюл. N 28. 6 с.
 - Пат. 2552752 РФ, МПК С 08 J 5/16, С 08 L 27/12, С 08 L 27/00. Фрикционный материал / Сергиенко В. П., Биран В. В., Сенатрев А. Н., Злотников И. И., Ахметов Т. А., Кушунина Н. А.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси». N 2013146998/05; заявл. 21.10.2013; опубл. 10.06.2015, Бюл. N 16. 7 с.
 - Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
 - Колесников В. И., Бардушкин В. В., Яковлев В. Б., Сычев А. П., Колесников И. В. Микромеханика поликристаллов и композитов (напряженно-деформированное состояние и разрушение). Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС, 2012. 288 с.
 - Колесников В. И., Бардушкин В. В., Лавров И. В., Сычев А. П., Сычев А. А., Яковлев В. Б. Прогнозирование эффективных упругих свойств полимерных фрикционных композитов // Наука Юга России. 2019. Т. 15, № 2. С. 3–9. doi: 10.7868/S25000640190201
 - doi: 10.17073/1683-4518-2015-7-57-68
 - Yusupbekov A. Kh., Negmatov S. S. Bazal'toplastiki – perspektivnye polimernye kompozitsionnye materialy konstruktivnogo naznacheniya [Basalt plastics – promising polymer composite materials for structural purposes]. *Tezisy докладov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Polimernyye kompozity i tribologiya"* [Abstracts of the international scientific-technical conference "Polymer Composites and Tribology"]. Gomel', 2019, p. 132.
 - Meliksetyan N. G. Razrushenie poverkhnostnykh sloev bezasbestovyykh tormoznykh friktsionnykh materialov v usloviyakh perekhoda ot umerennogo k intensivnomu iznashivaniyu [Destruction of the surface layers of non-asbestos friction brake materials in the transition from moderate to intensive wear]. *Tezisy докладov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Polimernyye kompozity i tribologiya"* [Abstracts of the international scientific-technical conference "Polymer Composites and Tribology"]. Gomel', 2019, p. 225.
 - Meliksetyan N. G., Agbalyan S. G., Meliksetyan G. N. Bezasbestovyy tormoznoy teplostoykiy friktsionnyy kompozit s primeneniem mnogokomponentnykh materialov [Non-asbestos brake friction heat resistant composit with the use of multi-component materials]. *Tezisy докладov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Polimernyye kompozity i tribologiya"* [Abstracts of the international scientific-technical conference "Polymer Composites and Tribology"]. Gomel', 2019, p. 226.
 - Sergienko V. P., Bukharov S. N. *Vibratsiya i shum v nestatsionarnykh protsessakh treniya* [Vibration and noise in unsteady friction processes]. Minsk: Belaruskaya navuka Publ., 2012. 346 p.
 - Sergienko V. P., Bukharov S. N. *Noise and vibration in friction systems*. Switzerland: Springer Publ., 2015. 251 p.
 - Myshkin N. K., Sergienko V. P., Bukharov S. N., Myasnikova N. A. Vliyaniye nanorazmernykh napolniteley na vibroakusticheskie kharakteristiki friktsionnykh kompozitov [The influence of nanosized fillers on the vibroacoustic characteristics of the friction composites]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin RSTU], 2017, no. 1, pp. 30–35.
 - Kolesnikov V. I., Sychev A. P., Kolesnikov I. V., Sergienko V. P., Pavlov A. P., Sidashov A. V. Friktsionnyy material [Frictional material]. Patent RF, no. 2400503, 2010.
 - Kolesnikov V. I., Lapitskii A. V., Sychev A. P., Kolesnikov I. V., Bochkarev N. A., Kotlyar S. M., Safonov V. G., Sedov M. P. Sposob polucheniya friktsionnykh polimernykh materialov [Method of producing frictional polymer materials]. Patent RF, no. 2430936, 2011.
 - Sergienko V. P., Biran V. V., Senatrev A. N., Zlotnikov I. I., Akhmetov T. A., Kushunina N. A. Friktsionnyy material [Frictional material]. Patent RF, no. 2552752, 2015.
 - Shermergor T. D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Micromechanics of inhomogeneous medium]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 399 p.
 - Kolesnikov V. I., Bardushkin V. V., Yakovlev V. B., Sychev A. P., Kolesnikov I. V. *Mikromekhanika polikristallov i kompozitov (napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye i razrusheniye)* [Micromechanics of polycrystals and composites (stress-strain state and destruction)]. Rostov-on-Don: RSTU Publ., 2012. 288 p.
 - Kolesnikov V. I., Bardushkin V. V., Lavrov I. V., Sychev A. P., Sychev A. A., Yakovlev V. B. Prognozirovaniye effektivnykh uprugikh svoystv polimernykh friktsionnykh kompozitov [Prediction of effective elastic properties of polymeric friction composites]. *Nauka Yuga Rossii* [Science in the South Russia], 2019, vol. 15, no. 2, pp. 3–9. doi: 10.7868/S25000640190201

References

Поступила в редакцию 19.07.2019

© В. В. Бардушкин, А. П. Сычев, Д. А. Карташов, 2019