

УДК 539.3 : 621.891; 678.5

ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ С АНТИФРИКЦИОННЫМИ ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ

© 2013 г. В.В. Бардушкин¹, А.П. Сычев², А.А. Сычев², В.В. Даньков²

Поступила 28.03.2013

Решена задача вычисления эффективных упругих свойств дисперсно-наполненных матричных композитов, дополнительно армированных волокнами, расположенными параллельно некоторой плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Проведены модельные расчеты эффективных упругих характеристик композитов на эпоксидной основе со стеклянными волокнами и дисперсными добавками из политетрафторэтилена, учитывающие изменения концентраций изотропных компонентов.

Ключевые слова: матричные композиты, включения, матрица, эффективные модули упругости, анизотропия, моделирование.

Создание новых трибокомпозитов предполагает подбор состава, структуры и концентрации компонентов с целью оптимизации их физико-механических характеристик с учетом действующих эксплуатационных факторов. Указанные материалы должны обладать высокой износостойкостью, механической прочностью при сжатии и сдвиге, хорошими демпфирующими свойствами и т.д. Для их разработки проводится множество экспериментальных исследований, требующих больших затрат временных, материальных и финансовых ресурсов [1–3]. При этом нет уверенности в оптимальности получаемого решения. Поэтому, не умаляя важности экспериментальных методов исследований, необходимо отметить, что все большее значение приобретают теоретические методы анализа, моделирования и расчета физико-механических (в частности, упругих) свойств трибокомпозитов. Основой подобных исследований является прогнозирование их эффективных физико-механических свойств [3; 4].

Вопросы, связанные с моделированием и расчетом эффективных упругих характеристик матричных композитов в зависимости от состава и концентрации компонентов, рассматривались многими

авторами. Подробный обзор этих работ можно найти, например, в [3; 4].

Однако исследования показывают, что использование в тяжело нагруженных узлах трения двухкомпонентных композитных материалов ограничено ввиду их малой удельной прочности и несущей способности. Для таких узлов целесообразно создавать многокомпонентные композиты, исходя из синтеза конструкционного материала, например, с антифрикционным [1–4].

Довольно широкое применение в триботехнике находят многокомпонентные дисперсно-наполненные композиты. Задача прогнозирования эффективных упругих свойств таких материалов решена в [5; 6]. Однако на практике армирование трибокомпозитов часто производится неизометричными включениями. Так, широкое распространение в тяжело нагруженных узлах трения (например, в скользунах боковых опор электровоза) получили композиции на основе полимерного связующего и арматуры – волокон из политетрафторэтилена (ПТФЭ) или графита, ортогональных стекло- или углеволокон [3; 4]. В работах [7; 8] решена задача прогнозирования эффективных упругих свойств подобных композитов.

В настоящей работе решается задача прогнозирования эффективных упругих свойств тканых композитов на полимерной основе с антифрикционными дисперсными добавками в зависимости от концентрации и состава их компонентов. Построение моделей прогнозирования эффективных упругих свойств таких материалов базируется на

¹ Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, e-mail: bardushkin@mail.ru

² Южный научный центр Российской академии наук, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: sap@rgups.ru

представлении их структуры в виде статистически однородных матричных композитов, армирование которых производится включениями в виде сфер одинакового радиуса и равными друг другу вытянутыми эллипсоидами вращения. При этом в пространстве композита эллипсоиды ориентированы своей большой полуосью параллельно некоторой плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Эффективные упругие характеристики матричных композитов определяются с помощью тензора четвертого ранга 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 усреднения по ансамблю, которое для статистически однородных композитов, т.е. при выполнении гипотезы эргодичности, совпадает с усреднением по объему [9].

Общая схема расчета эффективных упругих свойств матричных композитов в рамках теории случайных функций выглядит следующим образом. Представим тензоры напряжений σ , деформаций ε и модулей упругости c в виде суммы средних значений и флуктуаций (для удобства в дальнейшем, если это возможно, индексы в записи компонент тензоров и элементов матриц будем опускать):

$$\begin{aligned} \sigma(\mathbf{r}) &= \langle \sigma(\mathbf{r}) \rangle + \sigma'(\mathbf{r}), \quad \varepsilon(\mathbf{r}) = \langle \varepsilon(\mathbf{r}) \rangle + \varepsilon'(\mathbf{r}), \\ c(\mathbf{r}) &= \langle c(\mathbf{r}) \rangle + c'(\mathbf{r}). \end{aligned}$$

Полагая, что флуктуации линейно зависят от средних значений, получим

$$\sigma'(\mathbf{r}) = P(\mathbf{r}) \langle \sigma(\mathbf{r}) \rangle, \quad \varepsilon'(\mathbf{r}) = Q(\mathbf{r}) \langle \varepsilon(\mathbf{r}) \rangle.$$

Тензоры $P(\mathbf{r})$ и $Q(\mathbf{r})$ являются интегральными операторами, описывающими взаимодействие между включениями. Таким образом, связь между локальными и средними напряжениями и деформациями в материале может быть представлена в виде

$$\sigma(\mathbf{r}) = (I + P(\mathbf{r})) \langle \sigma(\mathbf{r}) \rangle, \quad \varepsilon(\mathbf{r}) = (I + Q(\mathbf{r})) \langle \varepsilon(\mathbf{r}) \rangle.$$

где I – единичный тензор четвертого ранга.

Эффективные упругие характеристики получаются из решения системы стохастических дифференциальных уравнений 2-го порядка (уравнений равновесия). Для бесконечной среды решение этой системы можно отыскать, используя метод функций Грина с помощью специально вводимого однородного тела сравнения. Тогда выражение для расчета тензора эффективных модулей упругости представляется в виде

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

где двумя штрихами здесь и далее обозначена разность между величинами неоднородной среды и однородного тела сравнения [9].

В настоящей работе используется обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей, предполагающее наложение некоторых ограничений на ядро интегрального оператора Q . В рамках данного подхода для вычисления эффективных модулей упругости необходимо воспользоваться только сингулярной составляющей тензора Грина уравнений равновесия, зависящей лишь от дельта-функции Дирака. В этом случае интегральная свертка дельта-функции переводит интегральный оператор Q в постоянный функционал g , который можно вычислить с помощью фурье-образа сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия, что физически означает предположение однородности полей напряжений и деформаций в пределах отдельного элемента неоднородности. Расчетной формулой обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей является выражение

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

где g – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия, являющийся тензором четвертого ранга. Для вычисления компонент g_{ijkl} тензора g 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 [9]. Компоненты a_{ijkl} тензора 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 $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$, t_{il}^{-1} – элементы матрицы, обратной матрице T с элементами $t_{il} = c_{iklj}^c n_k n_j$, 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 определяются соотношениями

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

Верхний индекс «с» в записи компонент c_{iklj}^c тензора модулей упругости обозначает, что рассматриваются упругие характеристики однородного тела сравнения [9].

Соотношение (1), как показано в [3; 4], может быть использовано для расчета эффективных характеристик статистически однородных матричных композитов с включениями эллипсоидальной формы, ориентированными друг относительно друга.

Таблица 1. Свойства компонентов композита [10–12]

Тип компонента	Материал компонента	E , ГПа	γ	ρ , г/см ³
1	Включения БЩ-стекла	76,2	0,22	2,54
2	Включения ПТФЭ	0,15	0,33	2,20
3	Матрица ЭПАФ	5,4	0,46	1,30

Остановимся подробнее на процедуре усреднения. В случае выполнения условия эргодичности можно, как указывалось, использовать усреднение по объему (для каждого компонента неоднородного материала). Тогда операция усреднения по всему объему материала для некоторой случайной величины $a(\mathbf{r})$ сводится к суммированию

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

где v_s и $a_s(\mathbf{r})$ – объемная концентрация компонента s -го типа и соответствующая этому компоненту случайная величина, $\sum_s v_s = 1$ [3; 4; 9].

Рассмотрим далее многокомпонентный матричный композит с включениями двух типов. К первому типу относятся эллипсоидальные включения из бесщелочного (БЩ) стекла, ориентированные параллельно некоторой плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях и имеющие одинаковую концентрацию в каждом из этих направлений. Основная их функция состоит в упрочнении композитных материалов. Ко второму типу относятся порошковые включения из ПТФЭ, выполняющие антифрикционную роль. В качестве матрицы (компонент третьего типа) используется эпоксидное связующее на основе триглицидилпарааминофенола марки ЭПАФ [10]. Модули упругости и плотности компонентов композита представлены в таблице 1 (E – модуль Юнга, γ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность).

При проведении численного моделирования положим, что компоненты композита изотропны. Пусть эллипсоидальные включения БЩ-стекла (l_1, l_2 и l_3 – главные полуоси этих эллипсоидов) имеют одинаковую форму и ориентированы в пространстве композита только в направлениях осей x и y лабораторной системы координат. При этом $l_1 = L, l_2 = l_3 = 1$ для включений, ориентированных в направлении оси x ; $l_2 = L, l_1 = l_3 = 1$ для включений, ориентированных в направлении оси y . Кроме того, положим, что концентрации включений БЩ-стекла в направлении каждой из осей x и y равны. Будем далее рассматривать случай, когда $L \rightarrow \infty$, что соответствует тканым композитным материалам. Для порошковых включений ПТФЭ при проведении численного моделирования будем полагать, что они имеют форму сфер одинакового радиуса $r = 1$.

С учетом (3), из (1) получаем выражение для вычисления эффективных упругих характеристик многокомпонентных композитов

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

Здесь c_s – тензор модулей упругости s -го компонента композита; g_s – тензор g , соответствующий s -му компоненту композита, вычисляемый с помощью соотношения (2) и последующей процедуры симметризации. При этом следует полагать $l_1 = l_2 = l_3 = r = 1$ при вычислении тензора g во включениях ПТФЭ и $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ при вычислении g в матрице.

Для проведения по соотношению (4) модельных расчетов эффективных упругих характеристик в работе при операциях над тензорами использовалась их матричная форма записи [9]. При этом ненулевые элементы c_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) матрицы тензора модулей упругости c для изотропного материала выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона γ следующим образом (табл. 1):

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

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

$$c_{12} = c_{21} = c_{13} = c_{31} = c_{23} = c_{32} = \frac{E\gamma}{(1 + \gamma)(1 - 2\gamma)}.$$

Эффективные упругие характеристики модельных материалов вычислялись в приближении самосогласования [3; 4; 9]. С этой целью была организована итерационная процедура, в которой в качестве параметров тела сравнения брали значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения брали упругие характеристики, полученные в приближении Хилла, т.е. среднего арифметического значений, полученных в приближениях Ройсса $c_{\text{Reuss}} = \left(\sum_s v_s (c_s)^{-1} \right)^{-1}$

и Фойгта $c_{\text{Voight}} = \sum_s v_s c_s$ [9]. Выход из итерационной процедуры осуществлялся, когда максимальная разница между эффективными модулями составляла менее 0,01. Отметим, что для каждого значения концентрации изотропных компонентов материала требовалось проводить порядка 10–15 итераций.

На практике принято использовать не объемные концентрации элементов неоднородности, а их

концентрации по массе (в процентах). Процентная концентрация по массе μ_s s -го компонента связана с объемными концентрациями v_s и плотностями ρ_s всех компонентов композита с помощью формулы

$$\mu_s = \frac{v_s \rho_s}{\sum_s v_s \rho_s} \cdot 100, \%$$

Поэтому результаты всех модельных расчетов приведены далее относительно процентной концентрации элементов неоднородности по массе.

Результаты модельных расчетов значений ненулевых элементов c_{ij}^* матрицы тензора эффективных модулей упругости c^* от концентраций μ_1 волокон БЩ-стекла и μ_2 дисперсных включений ПТФЭ приведены на рисунках 1 и 2.

Основываясь на проведенных модельных исследованиях и расчетах эффективных модулей упругости композита, можно заключить, что характер зависимости значений ненулевых c_{ij}^* от концентрации волокон нелинеен. При этом рассматриваемые композитные материалы обладают тетрагональной симметрией эффективных упругих свойств [9]. Кроме того, увеличение концентрации волокон БЩ-стекла при сохранении массовой доли включений ПТФЭ приводит к росту значений c_{ij}^* . Увеличение же концентрации включений ПТФЭ при сохранении массовой доли волокон БЩ-стекла приводит к снижению значений c_{ij}^* . Следовательно, необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования по оптимизации концентрации как ПТФЭ, так и БЩ-стекла с целью максимального улучшения трибохарактеристик рассматриваемого композитного материала без существенного ухудшения его упруго-прочностных свойств. Это особенно важно для антифрикционных композитов, работающих в тяжело нагруженных узлах трения.

Также в работе были проведены расчеты коэффициентов упругой анизотропии A_x и A_z в направлениях соответственно осей x и z лабораторной системы координат. Отметим, что в рассматриваемом в статье случае, когда концентрация волокон БЩ-стекла одинакова в направлениях x и y , анизотропия в направлении y аналогична анизотропии в направлении x . Параметры A_x и A_z вычислялись по следующим формулам:

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

На рисунке 3 для рассматриваемых композитов представлены результаты модельных вычислений параметров анизотропии от изменения концентрации их компонентов. На рисунке 3а приведены

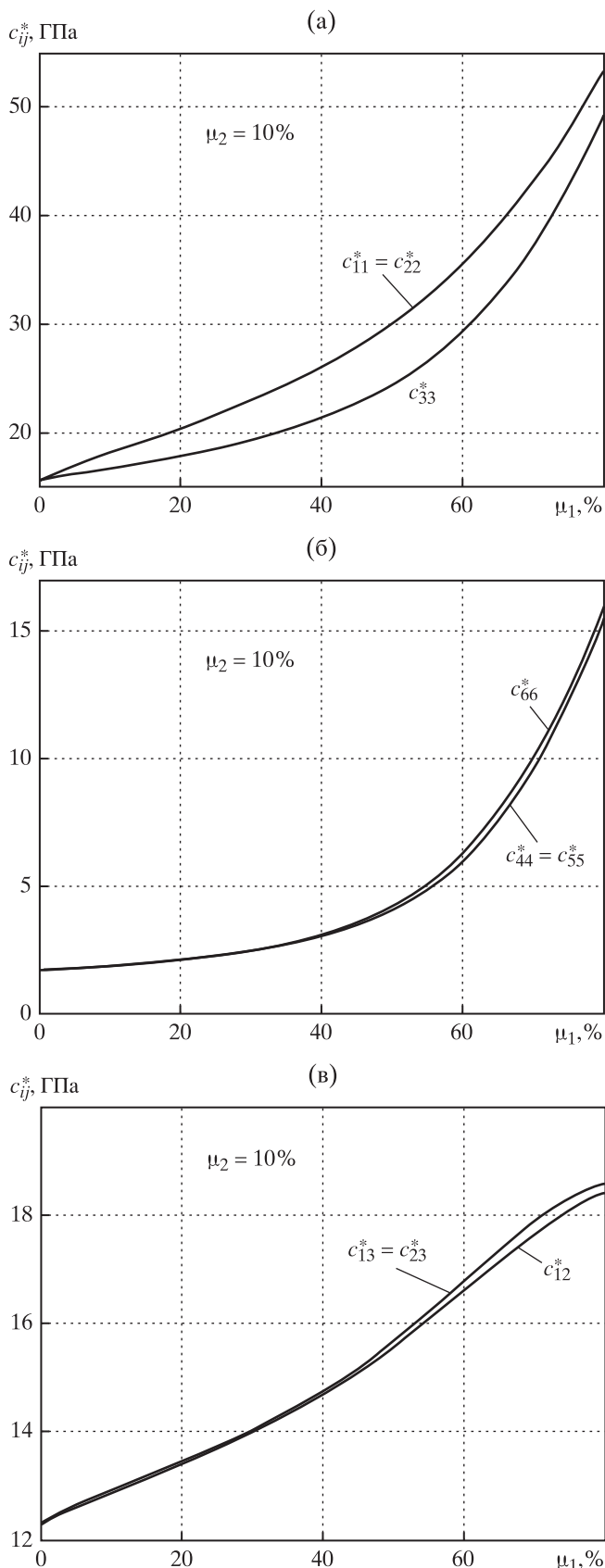


Рис. 1. Зависимости значений ненулевых элементов c_{ij}^* матрицы тензора c^* от концентрации волокон БЩ-стекла: а – c_{11}^* , c_{22}^* , c_{33}^* ; б – c_{44}^* , c_{55}^* , c_{66}^* ; в – c_{12}^* , c_{13}^* , c_{23}^*

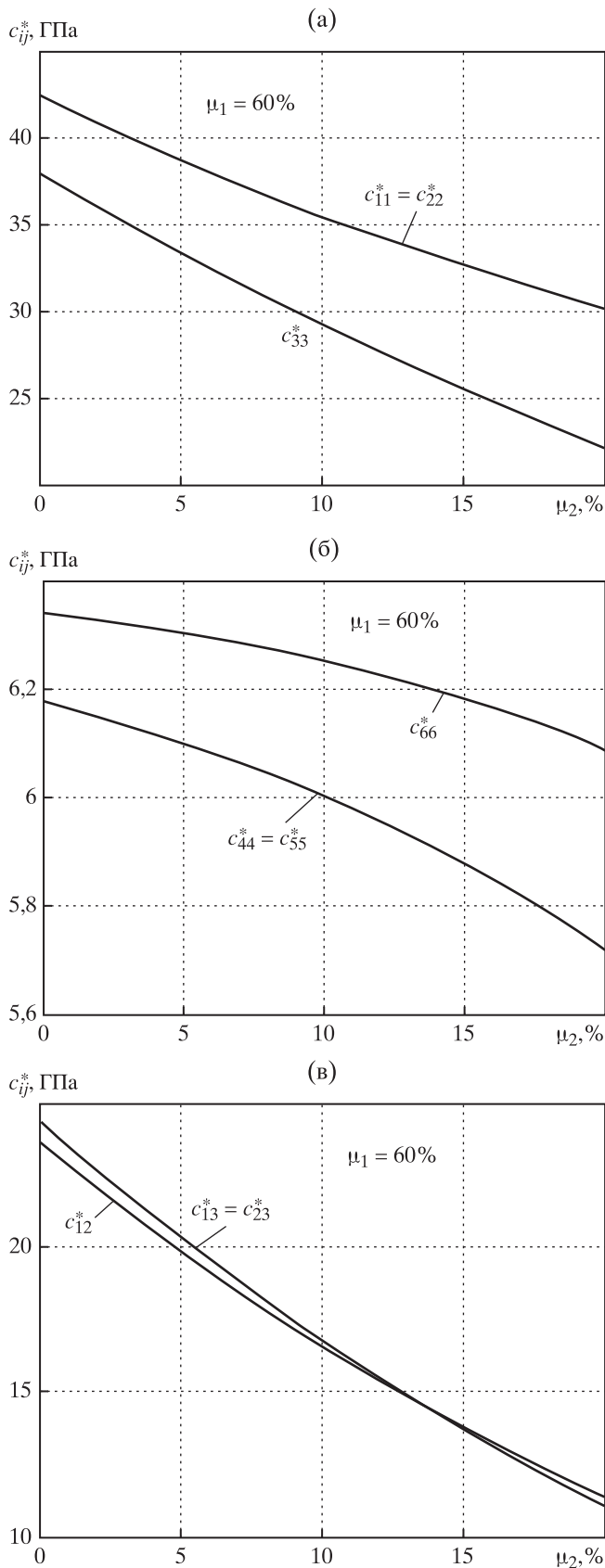


Рис. 2. Зависимости значений ненулевых элементов c_{ij}^* матрицы тензора c^* от концентрации дисперсных включений ПТФЭ: а – c_{11}^* , c_{22}^* , c_{33}^* ; б – c_{44}^* , c_{55}^* , c_{66}^* ; в – c_{12}^* , c_{13}^* , c_{23}^*

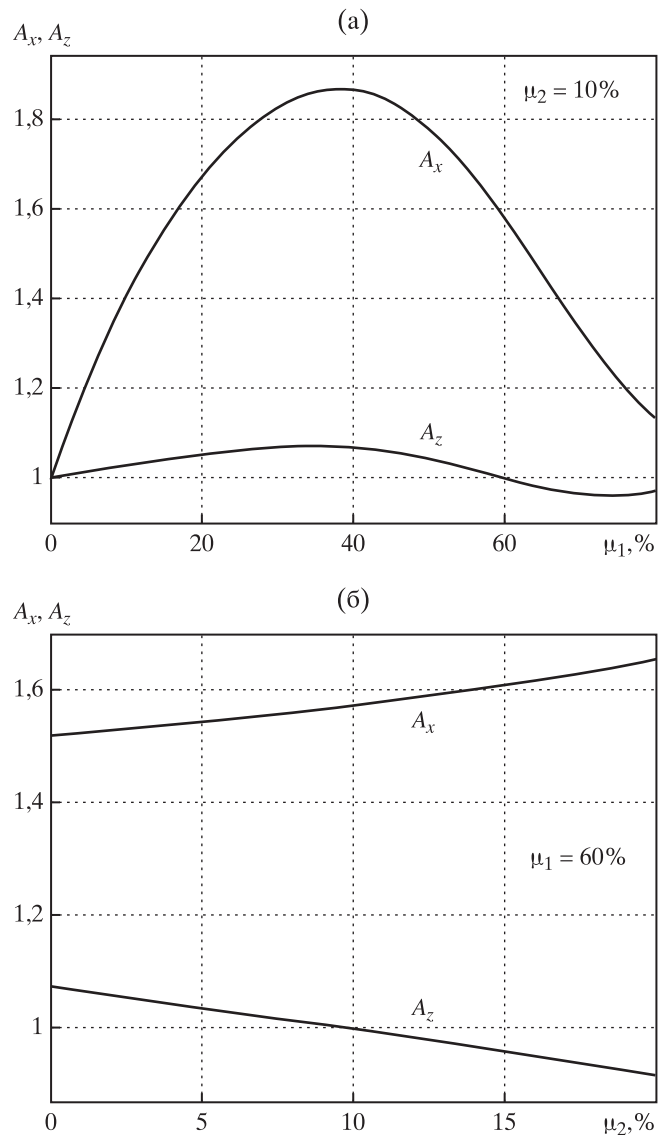


Рис. 3. Зависимости значений параметров анизотропии A_x и A_z от изменения концентрации элементов неоднородности в композите: а – волокон БЩ-стекла; б – дисперсных включений ПТФЭ

зависимости A_x и A_z от изменения концентрации волокон БЩ-стекла при фиксированной 10%-й концентрации волокон ПТФЭ. На рисунке 3б аналогичные зависимости приведены от изменения концентрации волокон ПТФЭ при фиксированной 60%-й концентрации волокон БЩ-стекла.

В точке $\mu_1 = 0\%$ на рисунке 3а параметры A_x и A_z равны единице, так как в этом случае в композите отсутствуют волокна БЩ-стекла, т.е. материал изотропен. Моделирование показало, что наиболее сильная вариация анизотропии происходит в направлении оси x . При этом увеличение концентрации волокон БЩ-стекла в диапазоне, реально встречающемся на практике ($\mu_1 > 40\%$), приводит к уменьшению анизотропии как в направлении x , так

и в направлении z . Увеличение же концентрации включений ПТФЭ приводит к увеличению значений A_x и к уменьшению значений A_z , однако в этом случае отклонения значений параметра A_z от единицы в реально встречающемся на практике диапазоне ($5 < \mu_2 < 10\%$) незначительны.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 13-08-00672-а, № 13-08-00732-а и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичинадзе А.В., Матвеевский Р.М., Браун Э.Д. Материалы в триботехнике и в нестационарных процессах. М.: Наука, 1986. 240 с.
2. Машиков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. М.: Недра, 2004. 261 с.
3. 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 н/Д: Изд-во РГУПС, 2012. 288 с.
4. Бардушкин В., Яковлев В. Механика микроструктур (эффективные и локальные свойства текстурированных поликристаллов и композитов). Саарбрюккен: Lambert Academic Publishing, 2011. 164 с.
5. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Латицкий А.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б. Эффективные упругие характеристики антифрикционных композитов на эпоксидной основе // Вестник Южного научного центра. 2010. Т. 6. № 1. С. 5–10.
6. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Латицкий А.В., Латицкий В.А., Сычев А.П. Эффективные упругие свойства дисперсно-наполненных композитов на основе связующих с повышенным содержанием эпоксидных групп // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 8. С. 19–25.
7. Колесников И.В. Упругие характеристики трехкомпонентных антифрикционных композитов с ориентированными неизометричными включениями // Известия ПГУПС. 2012. № 3. С. 150–157.
8. Бардушкин В.В., Колесников И.В., Флек Б.М., Сычев А.П., Яковлев В.Б. Упругие характеристики антифрикционных тканых композитов для тяжело нагруженных узлов трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 12. С. 13–18.
9. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
10. Латицкий А.В. Эпоксидные полимерные матрицы для высокопрочных и теплостойких композитов // Клеи. Герметики. Технологии. 2010. № 2. С. 12–15.
11. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
12. Гутников С.И., Лазоряк Б.И., Селезнев А.Н. Стекланные волокна: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2010. 53 с.

EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS OF THE WOVEN COMPOSITES ON THE POLYMERIC BINDER WITH DISPERSED ANTIFRICTION ADDITIVES

V.V. Bardushkin, A.P. Sychev, A.A. Sychev, V.V. Dan'kov

The problem of calculation of effective elastic characteristics of the dispersible-filled matrix composites, which have been additionally reinforced by fibers, located parallel to some plane in two mutually perpendicular directions, is solved. Model calculations of effective elastic characteristics of composites on an epoxy binder with glass fibers and dispersible additives from polytetrafluorethylene, considering variations of concentrations of isotropic components, are made.

Key words: matrix composites, inclusions, matrix, effective elastic modules, anisotropy, modeling.

REFERENCES

1. Chichinadze A.V., Matveevskii R.M., Brown Je.D. 1986. *Materialy v tribotekhnike i v nestatsionarnykh protsessakh*. [Materials in tribotechnics and non-stationary processes]. M., "Nauka": 240 p. (In Russian).
2. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Baybaratskaya M.Yu., Mamaev O.A. 2004. *Polimernye kompozitsionnye materialy v tribotekhnike*. [Polymer composite materials in tribotechnics]. M., "Nedra": 261 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 Publishers, 288 p. (In Russian).
4. Bardushkin V., Yakovlev V. 2011. *Mekhanika mikrostruktur (effektivnye i lokal'nye svoystva teksturirovannykh polikristallov i kompozitov)*. [Mechanics of microstructures (effective and local properties of textured polycrystals and composites)]. Saarbrücken, LAP (Lambert Academic Publishing): 164 p. (In Russian).
5. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Lapitsky A.V., Sychev A.P., Yakovlev V.B. 2010. [Effective elastic characteristics of antifriction epoxy-based composites]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 6(1): 5–10. (In Russian).
6. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Lapitsky A.V., Lapitsky V.A., Sychev A.P. 2012. [Effective elastic properties of the dispersible filled composites with heightened epoxy concentration]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*. (8): 19–25. (In Russian).
7. Kolesnikov I.V. 2012. [Elastic characteristics of the three-component antifriction composites with oriented non-isometric inclusions]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*. (3): 150–157. (In Russian).
8. Bardushkin V.V., Kolesnikov I.V., Flek B.M., Sychev A.P., Yakovlev V.B. 2012. [Elastic characteristics of the antifriction woven composites for hard-loaded friction knots]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*. (12): 13–18. (In Russian).
9. Shermergor T.D. 1977. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred*. [Micromechanics of inhomogeneous medium]. M., "Nauka": 399 p. (In Russian).
10. Lapitsky A.V. 2010. [Epoxy polymer matrix for high-strength and heat-resistant composites]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. (2): 12–15. (In Russian).
11. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik*. [Physical quantities: a handbook]. 1991. (Eds. I.S. Grigor'ev, E.Z. Meilikhov). M., "Energoatomizdat": 1232 p. (In Russian).
12. Gutnikov S.I., Lazorjak B.I., Seleznev A.N. 2010. *Stekljannye volokna*. [Glass fibers]. M., Moscow State University Publishers: 53 p. (In Russian).