

УДК 539.3:621.891:678.5
DOI: 10.7868/S25000640220201

ОБЪЕМНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТАХ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ, АРМИРОВАННЫХ ХАОТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ

© 2022 г. Академик В.И. Колесников¹, В.В. Бардушкин²,
И.В. Лавров², А.П. Сычев³, А.А. Сычев¹, В.Б. Яковлев^{2,4}

Аннотация. Решается задача построения модели и проведения численных расчетов значений объемной плотности энергии деформации в многокомпонентных полимерных фрикционных композитах с учетом состава, формы, ориентации и объемного содержания наполнителей, а также вида приложенного к материалу внешнего механического воздействия. Рассмотрены композиты на основе эпоксифенольного связующего, армированные хаотически ориентированными в пространстве материала короткими волокнами бесщелочного стекла и дисперсными добавками каучука, глинозема, графита и барита. Моделирование опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей и понятие оператора концентрации напряжений (тензора четвертого ранга), связывающего локальные (внутренние) значения тензора напряжений со средними (внешними) по материалу напряжениями.

Исследованы зависимости значений объемной плотности энергии деформации в элементах неоднородности полимерных фрикционных композитов от вариаций объемных концентраций наполнителей – волокон бесщелочного стекла, дисперсных включений каучука и минерального порошка, состоящего из глинозема, графита и барита в равных объемных долях. Рассмотрены два случая внешнего сжимающего воздействия – осевое и объемное. В результате проведенных численных модельных расчетов установлено, что увеличение объемных долей как волокон бесщелочного стекла, так и минерального порошка приводит к уменьшению и сближению значений объемной плотности энергии деформации в компонентах всех типов рассматриваемых полимерных фрикционных композитов. Моделирование показало также, что увеличение объемной доли включений каучука приводит к росту и расхождению значений объемной плотности энергии деформации в элементах неоднородности всех типов исследуемых полимерных фрикционных композитов.

Ключевые слова: объемная плотность энергии деформации, полимерный фрикционный композит, включение, оператор концентрации напряжений, моделирование.

BULK STRAIN ENERGY DENSITY IN MULTI-COMPONENT FRICTIONAL COMPOSITES ON A POLYMER BASE, REINFORCED WITH RANDOMLY ORIENTED FIBERS

Academician RAS V.I. Kolesnikov¹, V.V. Bardushkin²,
I.V. Lavrov², A.P. Sychev³, A.A. Sychev¹, V.B. Yakovlev^{2,4}

Abstract. The problem of constructing a model and carrying out numerical calculations of the bulk strain energy density values in multi-component polymeric frictional composites is solved, taking into consideration the composition, shape, orientation and volume content of fillers, as well as the type of external mechanical

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

⁴ Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Institute of Nanotechnology Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation), Российская Федерация, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а, корп. 11

impact applied to the material. Composites based on an epoxyphenol binder reinforced with short fibers of E-glass randomly oriented in the space of the material and dispersed additives of rubber, alumina, graphite and barite are considered. Modeling is based on the generalized singular approximation of the random field theory and the concept of the stress concentration operator (fourth rank tensor), which relates the local (internal) values of the stress tensor with average (external) stresses over the material.

The dependences of the values of the bulk strain energy density in the elements of inhomogeneity of polymeric frictional composites on variations in the volume concentrations of fillers – E-glass fibers, dispersed rubber inclusions, and mineral powder consisting of alumina, graphite and barite in equal volume fractions have been studied. Two cases of external compressive action, axial and volumetric, are considered. As a result of the numerical model calculations, it was found that an increase in the volume fractions of both E-glass fibers and mineral powder leads to a decrease and convergence of the values of the bulk strain energy density in the components of all types of polymeric frictional composites under consideration. Modeling also showed that an increase in the volume fraction of rubber inclusions leads to an increase and a divergence in the values of the bulk strain energy density in the elements of heterogeneity of all types of polymeric frictional composites under study.

Keywords: bulk strain energy density, polymeric frictional composite, inclusion, stress concentration operator, modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Композиты на полимерной основе находят широкое применение в узлах трения. При их проектировании необходим подбор состава, структуры и концентрации компонентов. Целью подобных исследований является оптимизация физико-механических характеристик материалов, при этом должно учитываться действие различных эксплуатационных факторов. В частности, композиты должны обладать высокой износостойкостью, механической прочностью, хорошими демпфирующими свойствами и т.д. Для разработки трибокомпозитов проводится множество экспериментальных исследований, требующих больших затрат временных, материальных и финансовых ресурсов. При этом нет уверенности в оптимальности получаемого результата. Поэтому, не умаляя важности экспериментальных методов исследований, необходимо отметить, что все большее значение приобретают теоретические методы анализа, прогнозирования и расчета физико-механических (в частности, упругих) свойств подобных композитных материалов [1–4].

Исследования показывают, что при проектировании композитов, используемых в узлах трения, целесообразно создавать многокомпонентные структуры, синтезируя конструкционные наполнители с различными функционализирующими добавками [1; 2]. При теоретическом анализе напряженно-деформированного состояния разрабатываемых трибокомпозитов встает проблема прог-

нозирования не только их эксплуатационных (эффективных), но и локальных (внутренних) упругих свойств. Адекватное моделирование локальных упругих характеристик многокомпонентных композитов позволяет уже на стадии проектирования оценивать поведение элементов неоднородности разрабатываемых трибоматериалов при нагрузках (особенно экстремальных), давать рекомендации по подбору структуры, состава, объемных долей компонентов и т.п. [2].

Целью работы является построение модели и проведение численных модельных расчетов значений объемной плотности энергии деформации (ОПЭД) [2] в полимерных фрикционных композициях (ПФК) с учетом состава, формы, ориентации и объемного содержания их компонентов, а также вида внешнего механического воздействия на материал. Прогнозирование значений указанной энергетической характеристики в каждом отдельном элементе неоднородности композита в зависимости от указанных факторов позволяет учитывать перераспределение ОПЭД в неоднородной среде. Это может быть важным при решении многих задач в таких областях науки и техники, как трибоматериаловедение, микро- и нанoeлектроника, геофизика и др. К этим задачам можно отнести, в частности, решение проблемы текстурообразования в поликристаллических средах [5], а также прогнозирование температуры плавления металлов и находящихся в замерзшем состоянии жидкостей в условиях пространственного ограничения (конфайнмента) [6; 7].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ОПЭД является одной из локальных (внутренних) упругих характеристик неоднородных сред и определяется следующим образом [2; 5–7]:

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) \sigma_{ij}(\mathbf{r}). \quad (1)$$

В формуле (1) \mathbf{r} – радиус-вектор случайной точки неоднородной среды; $\varepsilon_{ij}(\mathbf{r})$, $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ ($i, j = 1, 2, 3$) – компоненты тензоров деформаций $\varepsilon(\mathbf{r})$ и напряжений $\sigma(\mathbf{r})$ соответственно.

Воспользовавшись обобщенным законом Гука

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = s_{ijkl}(\mathbf{r}) \sigma_{kl}(\mathbf{r}),$$

где $s_{ijkl}(\mathbf{r})$ ($i, j, k, l = 1, 2, 3$) – компоненты тензора податливости $\mathbf{s}(\mathbf{r})$, соотношение (1) можно записать следующим образом:

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} s_{ijkl}(\mathbf{r}) \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \sigma_{ij}(\mathbf{r}). \quad (2)$$

Для анализа распределения значений ОПЭД $E(\mathbf{r})$ необходимо установление связи между напряжениями $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ в каждом элементе неоднородности и средним (внешним) напряжением $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$, приложенным ко всему композиту (угловые скобки здесь и далее определяют процедуру статистического усреднения, которая при выполнении гипотезы эргодичности совпадает с усреднением по объему [8]). Подобную связь можно установить с помощью безразмерного оператора концентрации напряжений $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ (тензора четвертого ранга) [2]:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle. \quad (3)$$

Тогда, учитывая (3), выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} s_{ijkl}(\mathbf{r}) K_{klmn}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{mn}(\mathbf{r}) \rangle K_{ijpq}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{pq}(\mathbf{r}) \rangle. \quad (4)$$

Для проведения корректного анализа оператора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ в композите, позволяющего учитывать взаимодействие его элементов неоднородности, состав, структуру материала, форму и концентрацию включений, необходимо решать уравнения равновесия упругой неоднородной среды. Однако в общем случае получить соотношение для численных расчетов значений компонент $K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r})$ оператора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ не удастся. Поэтому для их вычисления используются различные приближения. Одним из таких приближений, учитывающих перечисленные выше факторы, является обобщенное сингулярное

приближение теории случайных полей (ОСП) [8]. 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 $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$. Физический смысл ОСП заключается в предположении однородности полей напряжений и деформаций в пределах элемента неоднородности. В этом случае выражение для $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ имеет следующий вид [2]:

$$\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \langle \mathbf{c}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}, \quad (5)$$

где $\mathbf{c}(\mathbf{r})$ – 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 равновесия, 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 [8]. Компоненты a_{ijkl} тензора \mathbf{A} вычисляются с помощью следующего соотношения:

$$a_{ijkl} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega, \quad (6)$$

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 $t_{il} = c_{ijkl}^c n_k n_j$, 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:

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

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ И ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТОВ

Далее в работе рассматривали трибокомпозиты с включениями трех типов. Тип 1 – равномерно распределенные в пространстве материала дисперсные включения каучука. Тип 2 – короткие волокна бесщелочного стекла (БЩС), ориентированные в семи различных направлениях относительно

Таблица 1. Значения упругих характеристик изотропных компонентов ПФК
Table 1. Values of elastic characteristics of isotropic components of polymeric frictional composites

Тип компонента Component type	Материал компонента Component material	Модуль Юнга, ГПа Young's modulus, GPa	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio
1	каучук / rubber	0,008	0,47
2	БЩС / E-glass	76,200	0,22
3	глинозем / alumina	140,000	0,32
	барит / barite	59,000	0,28
4	ЭФС / EPhB	3,700	0,42

прямоугольной системы координат и моделирующие их хаотическое распределение в пространстве композита, а именно: параллельно координатным осям (три направления) и параллельно прямым, образующим равные углы со всеми осями (четыре направления). Полагали, что объемные доли волокон БЩС в каждом из семи указанных направлений одинаковы. Тип 3 – равномерно распределенные в пространстве материала дисперсные включения минерального порошка, состоящего из поликристаллов глинозема, графита и барита, взятых в отношении 1 : 1 : 1 (по объему). В качестве матрицы – компонент четвертого типа – рассматривали эпоксифенольное связующее (ЭФС), представляющее собой диановую смолу, отверждаемую малофенольной фенолформальдегидной смолой новолачного типа (с содержанием фенола менее 0,5 %) в отношении 60 : 40 масс. ч. (изготовитель ЗАО «ЭНПЦ Эпитал», Москва, Россия). Все компоненты модельных композитов, кроме графита, полагали изотропными. Значения упругих характеристик изотропных компонентов приведены в таблице 1 [9–13].

Для проведения численных расчетов с тензорами применялась их запись в матричном виде. Причем для каждого из изотропных наполнителей ПФК при вычислении элементов $c_{ij} \neq 0$ ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) симметрической матрицы тензора модулей упругости \mathbf{c} пользовались тем, что

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

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

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

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона [8].

Графит – компонент третьего типа – обладает гексагональной кристаллической структурой и

сильно анизотропен. Для элементов $c_{ij} \neq 0$ матрицы тензора модулей упругости \mathbf{c} его монокристаллов в работе брали следующие значения (ГПа) [14]:

$$c_{11} = c_{22} = 1109,0,$$

$$c_{12} = c_{21} = 139,0,$$

$$c_{33} = 38,7,$$

$$c_{44} = c_{55} = 5,0,$$

$$c_{66} = 0,5(c_{11} - c_{12}) = 485,0.$$

Для проведения дальнейших модельных расчетов значений ОПЭД $E(\mathbf{r})$ использовали эффективные характеристики поликристаллического графита, полученные методом самосогласования [8; 15]. Эти характеристики были определены с помощью усреднения по ориентациям кристаллографических осей кристаллитов графита (с изотропной функцией распределения), сводящегося к интегрированию по всевозможным углам Эйлера [8; 15]. Для этого была организована итерационная процедура, в которой в качестве значений элементов матрицы \mathbf{c}^c брали значения матрицы тензора модулей упругости поликристаллического графита, вычисленные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений элементов матрицы \mathbf{c}^c (нулевое приближение итерационной процедуры) выбирали упругие характеристики поликристаллического графита в приближении Фойгта [8; 15]. Выход из итерационной процедуры происходил, когда максимальная разница между соответствующими модулями матрицы \mathbf{c}^c становилась меньше 0,01 ГПа.

При нахождении значений элементов s_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) матрицы тензора податливости \mathbf{s} для каждого компонента ПФК пользовались тем, что $\mathbf{s} = \mathbf{c}^{-1}$ [8].

При построении модели прогнозирования значений ОПЭД рассматриваемых в работе ПФК основывались на представлении об их структуре в виде статистически однородных матричных композитов. Считали, что дисперсные включения каучука, глинозема, графита и барита имеют вид сфер одинако-

вого радиуса R , а волокна БЩС представляют собой равные друг другу вытянутые эллипсоиды вращения (l_1, l_2 и l_3 – полуоси этих эллипсоидов, большая из которых имеет длину L). При вычислениях по формуле (5) для каждого из компонентов ПФК оператора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ для нахождения параметров \mathbf{c}^c однородного тела сравнения применяли метод самосогласования [8; 15]. С этой целью была организована итерационная процедура, в которой в качестве параметров \mathbf{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 брали упругие характеристики, полученные в приближении Хилла [8; 15]. Выход из итерационной процедуры осуществляли, когда максимальная разница между модулями \mathbf{c}^c составляла менее 0,01 ГПа. При этом в расчетах $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ для нахождения с помощью формулы (6) компонент тензора $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ полагали, что для сферических включений каучука, глинозема, графита и барита $l_1 = l_2 = l_3 = R = 1$, для эллипсоидальных включений (волокон) БЩС, ориентированных относительно осей координат вдоль указанных выше семи направлений, главная полуось $L = 50$, а остальные полуоси равны 1, для связующего ЭФС $l_1 = l_2 = l_3 = 1$.

С помощью соотношения (4) для ПФК рассматриваемой структуры было проведено исследование влияния изменений объемных долей v_s , $s = 1, 2, 3, 4$, элементов неоднородности и вида приложенного внешнего воздействия на значения ОПЭД $E(\mathbf{r})$ во включениях (всех типов и ориентаций) и в полимерной матрице. При этом внешнее воздействие $\langle \sigma \rangle$ (МПа) задавали матрицей

$$\langle \sigma \rangle = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix}.$$

Были рассмотрены два важных частных случая напряжений $\langle \sigma \rangle$ (МПа) – одноосное ($\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0, \sigma_{33} = 1$ – сжатие вдоль оси z прямоугольной системы координат) и трехосное ($\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = 1$ – объемное сжатие).

Объемные доли включений ПФК при проведении модельных расчетов варьировали в важных для практики диапазонах [16–18].

На рисунках 1, 2 представлены расчетные кривые, описывающие зависимости значений $E(\mathbf{r})$ от объемных долей компонентов в каждом отдельном элементе неоднородности ПФК.

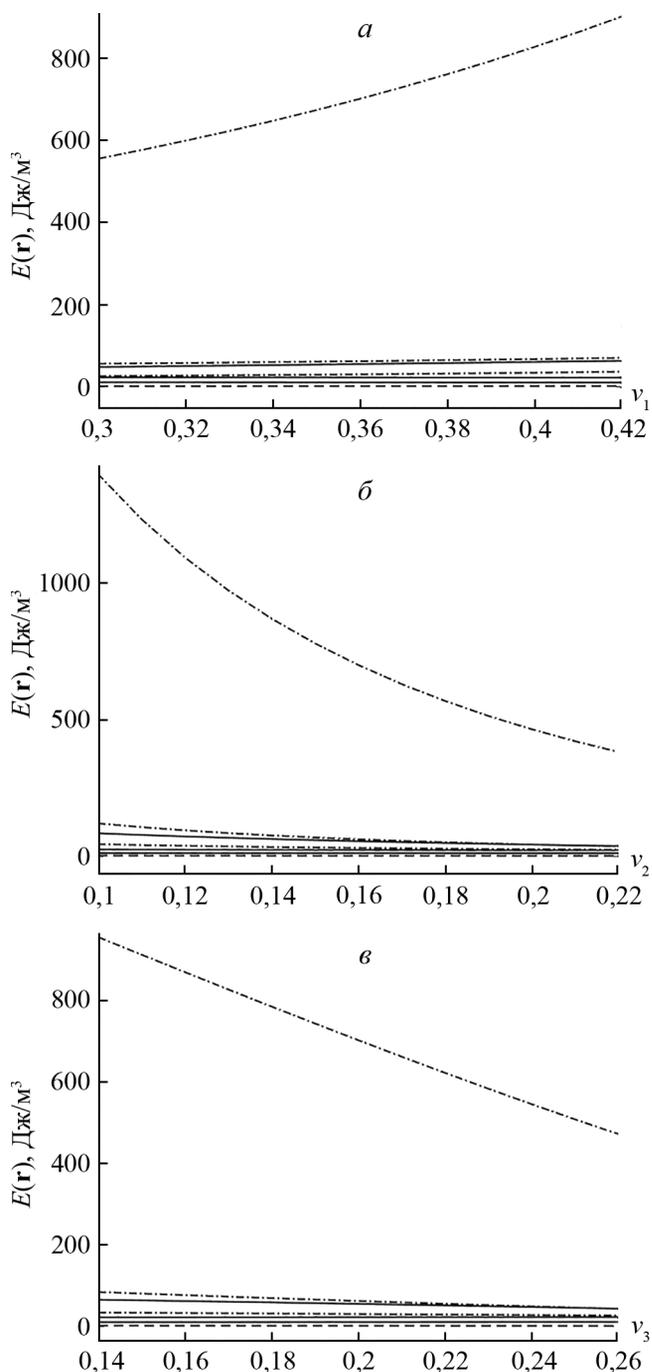


Рис. 1. Зависимости значений $E(\mathbf{r})$ в элементах неоднородности ПФК при одноосном сжатии от изменений концентраций включений v_s ($s = 1, 2, 3$): а – $v_2 = 0,16, v_3 = 0,2$; б – $v_1 = 0,36, v_3 = 0,2$; в – $v_1 = 0,36, v_2 = 0,16$; пунктирные линии – каучук; штрихпунктирные линии – волокна БЩС (для каждого из семи различных направлений их ориентаций); непрерывные линии – глинозем, графит, барит и ЭФС.

Fig. 1. Dependences of $E(\mathbf{r})$ values in elements of inhomogeneity of polymeric frictional composites in uniaxial compression from changes in the concentrations of inclusions v_s ($s = 1, 2, 3$): а – $v_2 = 0.16, v_3 = 0.2$; б – $v_1 = 0.36, v_3 = 0.2$; в – $v_1 = 0.36, v_2 = 0.16$; dotted lines – rubber; dashed and dotted lines – fibers of E-glass (for each of seven different directions of their orientations); continuous lines – alumina, graphite, barite and EPHb.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований и численных модельных расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Моделирование значений ОПЭД как при одноосном, так и при объемном сжатии показало, что увеличение концентрации дисперсных включений каучука v_1 приводит к росту значений $E(\mathbf{r})$, а увеличение концентраций как волокон БЩС v_2 , так и минерального порошка v_3 приводит, наоборот, к снижению значений $E(\mathbf{r})$ во всех элементах неоднородности ПФК.

2. При одноосном сжатии вдоль оси z (рис. 1):

– наибольшие значения $E(\mathbf{r})$ достигаются в волокнах БЩС, ориентированных параллельно направлению нагружения (штрихпунктирные кривые, расположенные выше остальных линий); в остальных компонентах ПФК значения $E(\mathbf{r})$ на порядок меньше, чем в волокнах БЩС, параллельных направлению внешней приложенной нагрузки $\langle \sigma \rangle$, и отличаются друг от друга незначительно;

– одинаковые значения ОПЭД наблюдаются, во-первых, в волокнах БЩС, ориентированных перпендикулярно к направлению внешнего воздействия, и, во-вторых, в волокнах, ориентированных вдоль направлений, образующих равные углы с осями x , y и z .

3. При объемном сжатии (рис. 2):

– значения $E(\mathbf{r})$ в волокнах БЩС одинаковы для всех направлений их ориентаций;

– значения ОПЭД в волокнах БЩС значительно превышают значения $E(\mathbf{r})$ в связующем ЭФС, которые, в свою очередь, довольно сильно превышают значения $E(\mathbf{r})$ во включениях глинозема, графита, барита и каучука.

4. Моделирование значений ОПЭД как при одноосном, так и при объемном сжатии показало, что наименьшие значения $E(\mathbf{r})$ достигаются во включениях каучука.

5. Увеличение объемных долей как волокон БЩС, так и минерального порошка приводит к сближению значений ОПЭД в компонентах всех типов. Это показывает, что увеличение в допустимых пределах концентраций включений указанных типов приводит к большей совместимости компонентов ПФК и, как следствие, к улучшению эксплуатационных характеристик изделий, использующих подобные материалы в узлах трения.

6. Увеличение объемной доли включений каучука в важном для практики диапазоне изменения концентрации данного компонента приводит к рас-

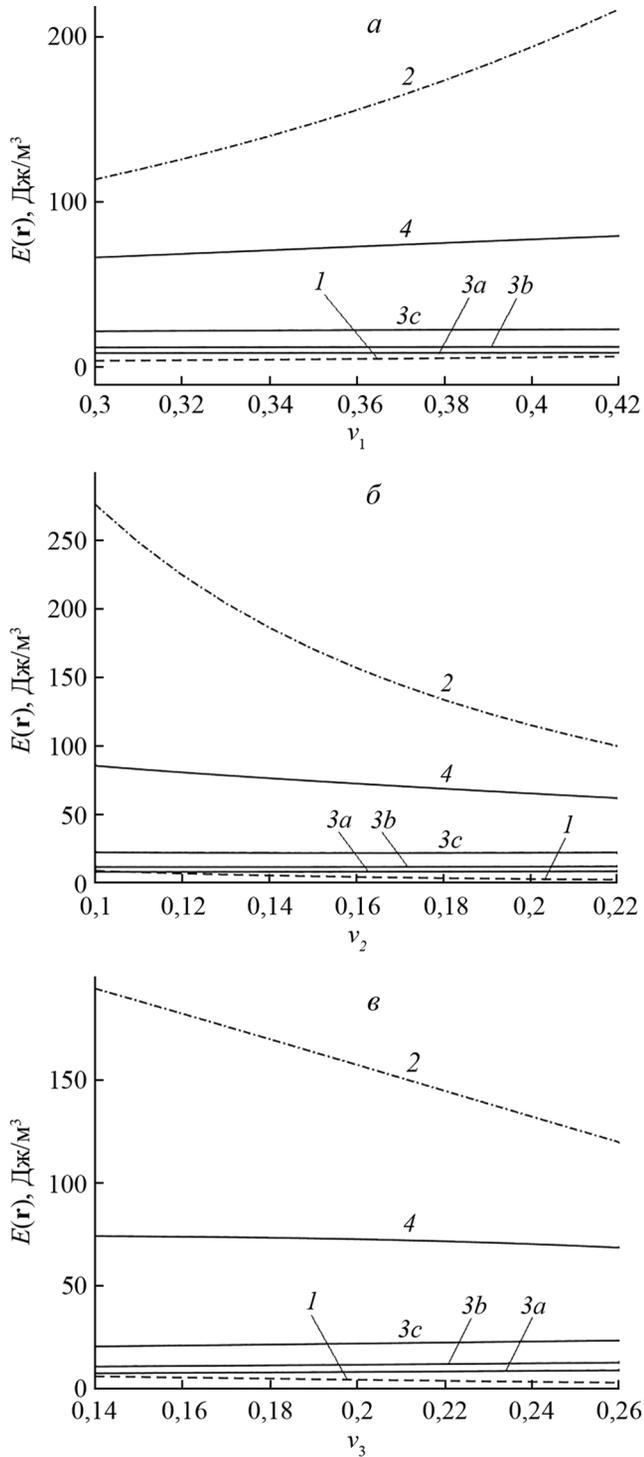


Рис. 2. Зависимости значений $E(\mathbf{r})$ в элементах неоднородности ПФК при объемном сжатии от изменений концентраций включений v_s ($s = 1, 2, 3$): $a - v_2 = 0,16, v_3 = 0,2$; $б - v_1 = 0,36, v_3 = 0,2$; $в - v_1 = 0,36, v_2 = 0,16$; 1 – каучук; 2 – волокна БЩС; 3a – глинозем; 3b – графит; 3c – барит; 4 – ЭФС.

Fig. 2. Dependences of $E(\mathbf{r})$ values in elements of inhomogeneity of polymeric frictional composites in volume compression from changes in the concentrations of inclusions v_s ($s = 1, 2, 3$): $a - v_2 = 0,16, v_3 = 0,2$; $б - v_1 = 0,36, v_3 = 0,2$; $в - v_1 = 0,36, v_2 = 0,16$; 1 – rubber; 2 – fibers of E-glass; 3a – alumina; 3b – graphite; 3c – barite; 4 – EPhB.

хождению значений ОПЭД в элементах неоднородности всех типов. А значит, увеличение концентрации каучука может приводить к изменениям, ухудшающим упруго-прочностные показатели ПФК. Следовательно, необходимо проведение дополнительных исследований по оптимизации содержания каучука с целью улучшения трибохарактеристик ПФК без существенного снижения их упруго-прочностных показателей.

В заключение следует отметить, что сказанное выше согласуется с априорными представлениями о том, как должно происходить перераспределение $E(\mathbf{r})$ в отдельных элементах неоднородности ПФК, и может служить косвенным подтверждением адекватности построенной модели.

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН (№ гр. проекта АААА-А16-116012610052-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А. 2004. *Полимерные композиционные материалы в триботехнике*. М., Недра: 261 с.
2. 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.
3. Плескачевский Ю.М., Сергиенко В.П. 2005. Фрикционные материалы с полимерной матрицей: перспективы исследований, достигнутый уровень, рынок. *Наука и инновации*. 5: 46–53.
4. Нилов А.С., Кулик В.И., Гаршин А.П. 2015. Анализ фрикционных материалов и технологий изготовления тормозных колодок для высоконагруженных тормозных систем с дисками из керамического композиционного материала. *Новые огнеупоры*. 7: 57–68. doi: 10.17073/1683-4518-2015-7-57-68
5. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Булах И.И., Сычев А.П., Яковлев В.Б. 2006. О методе моделирования текстурообразования в поликристаллах при различных внешних напряжениях. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2: 33–37.
6. Shilyaeva Yu.I., Bardushkin V.V., Gavrilov S.A., Silibin M.V., Yakovlev V.B., Borgardt N.I., Volkov R.L., Smirnov D.I., Zheludkevich M.L. 2014. Melting temperature of metal polycrystalline nanowires electrochemically deposited into the pores of anodic aluminum oxide. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 16(36): 19394–19401. doi: 10.1039/c4cp02436b
7. Bardushkin V., Kochetygov A., Shilyaeva Yu., Volovlikova O., Dronov A., Gavrilov S. 2020. Peculiarities of low-temperature behavior of liquids confined in nanostructured silicon-based material. *Nanomaterials*. 10(11): 2151. doi: 10.3390/nano10112151
8. Шермергор Т.Д. 1977. *Теория упругости микронеоднородных сред*. М., Наука: 399 с.
9. Лапицкий В.А., Крицук А.А. 1986. *Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков*. Киев, Наукова думка: 92 с.
10. *Физические величины: справочник*. 1991. М., Энергоатомиздат: 1232 с.
11. Торская Е.В., Курбаткин И.И., Мезрин А.М., Морозов А.В., Муравьева Т.И., Сахаров В.В., Фролов Н.Н. 2013. Механические и трибологические свойства наноструктурированных покрытий на основе многокомпонентных оксидов. *Трение и износ*. 34(2): 129–137.
12. *Справочник (кадастр) физических свойств горных пород*. 1975. М., Недра: 279 с.
13. Гутников С.И., Лазорьяк Б.И., Селезнев А.Н. 2010. *Стекланные волокна*. М., изд-во МГУ: 53 с.
14. Bosak A., Krisch M., Mohr M., Maultzsch J., Thomsen Ch. 2007. Elasticity of singlecrystalline graphite: Inelastic X-ray scattering study. *Phys. Rev. B*. 75(15): 153408(4). doi: 10.1103/PhysRevB.75.153408
15. Паньков А.А. 2008. *Методы самосогласования механики композитов*. Пермь, изд-во Пермского государственного технического университета: 253 с.
16. Колесников В.И., Сычев А.П., Колесников И.В., Сергиенко В.П., Павлов А.П., Сидашов А.В. *Фрикционный материал: Патент на изобретение № 2400503 Российской Федерации*. Заявители и правообладатели Открытое акционерное общество «Российские железные дороги», № заявки 2008151720. Заявл. 26.12.2008, опубл. 27.09.2010. Бюл. № 27.
17. Колесников В.И., Лапицкий А.В., Сычев А.П., Колесников И.В., Бочкарёв Н.А., Котляр С.М., Сафонов В.Г., Седов М.П. *Способ получения фрикционных полимерных материалов: Патент на изобретение № 2430936 Российской Федерации*. Заявители и правообладатели В.И. Колесников, А.В. Лапицкий, А.П. Сычев, И.В. Колесников, Н.А. Бочкарёв, С.М. Котляр, В.Г. Сафонов, М.П. Седов, № заявки 2009132725. Заявл. 31.08.2009, опубл. 10.10.2011. Бюл. № 28.
18. Сергиенко В.П., Биран В.В., Сенатрев А.Н., Злотников И.И., Ахметов Т.А., Кушунина Н.А. *Фрикционный материал: Патент на изобретение № 2552752 Российской Федерации*. Заявители и правообладатели Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», № заявки 2013146998. Заявл. 21.10.2013, опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16.

REFERENCES

1. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Baybaratskaya M.Yu., Mamaev O.A. 2004. *Polimernye kompozitsionnye materialy v tribotekhnike*. [Polymer composite materials in tribotechnics]. Moscow, Nedra: 261 p. (In Russian).
2. 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).

3. Pleskachevskii Yu.M., Sergienko V.P. 2005. [Frictional materials with a polymeric matrix: prospects of researches, the reached level, the market]. *Nauka i innovatsii*. 5: 46–53. (In Russian).
4. Nilov A.S., Kulik V.I., Garshin A.P. 2015. Analysis of friction materials and technologies developed to make brake shoes for heavily loaded brake systems with disks made of a ceramic composite. *Refractories and Industrial Ceramics*. 56(4): 402–412. doi: 10.1007/s11148-015-9856-7
5. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Bulakh I.I., Sychev A.P., Yakovlev V.B. 2006. [About a method of texture formation in polycrystals under external mechanical loadings]. *Ecological bulletin of research centers of the Black Sea economic cooperation*. 2: 33–37. (In Russian).
6. Shilyaeva Yu.I., Bardushkin V.V., Gavrilov S.A., Silibin M.V., Yakovlev V.B., Borgardt N.I., Volkov R.L., Smirnov D.I., Zheludkevich M.L. 2014. Melting temperature of metal polycrystalline nanowires electrochemically deposited into the pores of anodic aluminum oxide. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 16(36): 19394–19401. doi: 10.1039/c4cp02436b
7. Bardushkin V., Kochetygov A., Shilyaeva Yu., Volovlikova O., Dronov A., Gavrilov S. 2020. Peculiarities of low-temperature behavior of liquids confined in nanostructured silicon-based material. *Nanomaterials*. 10(11): 2151. doi: 10.3390/nano10112151
8. Shermergor T.D. 1977. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred*. [Micromechanics of inhomogeneous medium]. Moscow, Nauka: 399 p. (In Russian).
9. 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).
10. *Fizicheskie velichiny: spravochnik*. [Physical quantities: reference book]. 1991. Moscow, Energoatomizdat: 1232 p. (In Russian).
11. Torskaya E.V., Kurbatkin I.I., Mezrin A.M., Morozov A.V., Murav'eva T.I., Sakharov V.V., Frolov N.N. 2013. Mechanical and tribological properties of nanostructured coatings based on multicomponent oxides. *Journal of Friction and Wear*. 34(2): 99–106. doi: 10.3103/S1068366613020141
12. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornykh porod*. [Reference book (inventory) of physical properties of rocks]. 1975. Moscow, Nedra: 279 p. (In Russian).
13. Gutnikov S.I., Lazoryak B.I., Seleznev A.N. 2010. *Steklyannye volokna*. [Glass fibers]. Moscow, Moscow State University: 53 p. (In Russian).
14. Bosak A., Krisch M., Mohr M., Maultzsch J., Thomsen Ch. 2007. Elasticity of singlecrystalline graphite: Inelastic X-ray scattering study. *Phys. Rev. B*. 75(15): 153408(4). doi: 10.1103/PhysRevB.75.153408
15. 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).
16. Kolesnikov V.I., Sychev A.P., Kolesnikov I.V., Sergienko V.P., Pavlov A.P., Sidashov A.V. *Friktsionnyy material: Patent na izobrenie № 2400503 Rossiyskoy Federatsii*. [Frictional material: Patent No 2400503, Russian Federation]. Applicants and rights holders Open Joint Stock Company “Russian Railways”, application number 2008151720. The date of application 26 December 2008, published 27 September 2010. Bulletin No. 27. (In Russian).
17. 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: Patent na izobrenie № 2430936 Rossiyskoy Federatsii*. [Method of producing frictional polymer materials: Patent No 2430936, Russian Federation]. Applicants and rights holders V.I. Kolesnikov, A.V. Lapitskii, A.P. Sychev, I.V. Kolesnikov, N.A. Bochkarev, S.M. Kotlyar, V.G. Safonov, M.P. Sedov, application number 2009132725. The date of application 31 August 2009, published 10 October 2011. Bulletin No. 28. (In Russian).
18. Sergienko V.P., Biran V.V., Senatrev A.N., Zlotnikov I.I., Akhmetov T.A., Kushunina N.A. *Friktsionnyy material: Patent na izobrenie № 2552752 Rossiyskoy Federatsii*. [Frictional material: Patent No 2552752, Russian Federation]. Applicants and rights holders State Scientific Institution “Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems named after V.A. Belyy of the National Academy of Sciences of Belarus”, application number 2013146998. The date of application 21 October 2013, published 10 June 2015. Bulletin No. 16. (In Russian).

Поступила 24.03.2022