

УДК 539.3 : 621.891 : 678.5  
DOI: 10.7868/S25000640210301

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ С ХАОТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СТЕКЛЯННЫМИ ВОЛОКНАМИ И ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ КАУЧУКА, ГЛИНОЗЕМА, ГРАФИТА И БАРИТА

© 2021 г. Академик В.И. Колесников<sup>1</sup>, В.В. Бардушкин<sup>2</sup>,  
И.В. Лавров<sup>2</sup>, А.П. Сычев<sup>3</sup>, А.А. Сычев<sup>1</sup>, В.Б. Яковлев<sup>2,4</sup>

**Аннотация.** Решается задача построения модели и проведения численных расчетов значений предельных прочностных показателей при одноосном сжатии полимерных фрикционных композитов. Рассмотрены композиты на эпоксифенольной основе, армированные хаотически ориентированными в пространстве материала короткими волокнами бесщелочного стекла и дисперсными добавками каучука, глинозема, графита и барита. При моделировании использован оригинальный метод прогнозирования предельных прочностных характеристик матричных композитов, согласно которому приложенная к композиту сжимающая в определенном направлении нагрузка становится разрушающей, когда внутреннее напряжение в полимерной матрице начинает превышать предел ее прочности. Указанный метод опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей, понятие оператора концентрации напряжений (тензора четвертого ранга), связывающего локальные (внутренние) значения тензора напряжений со средними (внешними) по материалу напряжениями, и информацию о прочностных свойствах матрицы.

Исследованы зависимости значений предельных прочностных показателей при одноосном сжатии 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. В результате проведенных модельных расчетов установлено, что увеличение объемного содержания включений каучука приводит к ослаблению прочностных показателей модельных композитов, которые при этом изменяются по закону, близкому к линейному. Увеличение концентраций остальных наполнителей (как стеклянных волокон, так и включений минерального порошка) приводит к существенному улучшению предельных прочностных характеристик полимерных фрикционных композитных материалов, при этом характер зависимостей монотонный.

**Ключевые слова:** моделирование, полимерный фрикционный композит, включение, матрица, оператор концентрации напряжений, механическая прочность.

<sup>1</sup> 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

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

<sup>3</sup> 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

<sup>4</sup> 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

**MODELING OF THE ULTIMATE STRENGTH CHARACTERISTICS  
OF POLYMER FRICTIONAL COMPOSITES  
WITH CHAOTICALLY ORIENTED GLASS FIBERS  
AND DISPERSED ADDITIVES OF RUBBER, ALUMINA, GRAPHITE AND BARITE**

**Academician RAS V.I. Kolesnikov<sup>1</sup>, V.V. Bardushkin<sup>2</sup>,  
I.V. Lavrov<sup>2</sup>, A.P. Sychev<sup>3</sup>, A.A. Sychev<sup>1</sup>, V.B. Yakovlev<sup>2,4</sup>**

**Abstract.** The paper solves the problem of constructing a model and carrying out numerical calculations of the values of the ultimate strength indicators for uniaxial compression of polymeric frictional composites. Epoxyphenol-based composites reinforced with short E-glass fibers randomly oriented in the space of the material and dispersed additives of rubber, alumina, graphite and barite are considered. In the simulation original method for predicting the ultimate strength characteristics of matrix composites is used, according to which a compressive load applied to the composite in a certain direction becomes destructive when the internal stress in the polymer matrix begins to exceed its ultimate strength. This method is based on the generalized singular approximation of random field theory, the concept of the stress concentration operator (tensor of the fourth rank), which connects the local (internal) values of the stress tensor with the average (external) stresses over the material, and information on the strength properties of the matrix.

The dependences of the values of the ultimate strength indicators under uniaxial compression of polymeric frictional composites on variations in the volume concentrations of fillers – E-glass fibers, dispersed inclusions of rubber and mineral powder, consisting of alumina, graphite and barite in equal volume fractions – have been investigated. As a result of the carried out model calculations, it was found that an increase in the volumetric content of rubber inclusions leads to a weakening of the strength indicators of model composites, which in this case change according to a law close to linear. It is shown that an increase in the concentration of other fillers (both glass fibers and inclusions of mineral powder) leads to a significant improvement in the ultimate strength characteristics of polymeric frictional composite materials, while the nature of the dependences is monotonic.

**Keywords:** modeling, polymeric frictional composite, inclusion, matrix, stress concentration operator, mechanical strength.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие транспортной и машиностроительной отраслей невозможно без постоянного совершенствования тормозных систем [1; 2]. Применяемые в этих системах материалы должны обеспечивать быстрое замедление движения машин и механизмов, независимость их характеристик от погодных условий, высокую долговечность и малошумность процесса торможения. Кроме того, использование таких материалов должно быть экономически целесообразным и безвредным для окружающей среды и здоровья людей [1–4]. Поэтому, особенно в связи с развитием и совершенствованием безасбестовых технологий, задача разработки полимерных фрикционных композитов и исследования их физико-механических свойств является актуальной.

Для полимерных композитов, применяемых в тормозных системах, большое значение имеют составы используемых компонентов, их геометрическая форма, ориентация и концентрация в материале. При этом наряду с экспериментальными методами оптимизации состава, структуры и кон-

центрации наполнителей все большую значимость приобретают теоретические методы моделирования и расчета эффективных (эксплуатационных), локальных (внутренних) упругих свойств и предельных прочностных характеристик полимерных фрикционных композитов [5–7].

Целью работы является построение модели и проведение на ее основе численных расчетов значений предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) полимерных фрикционных композитов, армированных хаотически ориентированными короткими волокнами и дисперсными функционализирующими добавками, с учетом изменения объемных содержаний наполнителей неоднородных материалов.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Моделирование разрушающих характеристик фрикционных полимерных композитных материалов основывается на разработанном в статье [7] методе прогнозирования предельных прочност-

ных свойств матричных композитов при сжатии. Согласно этому методу приложенная к композиту сжимающая (в определенном направлении) нагрузка становится разрушающей, когда внутреннее напряжение в матрице начинает превышать предел ее прочности. При этом величина внутреннего напряжения, возникающего в матрице при внешнем воздействии на композит, сравнивается с ее известным (справочным) значением предела прочности. Значение предела прочности матрицы должно соответствовать внешней сжимающей нагрузке (в том же направлении, что и для рассматриваемого композита), приложенной к однородному телу, состоящему только из материала матрицы. Использование в указанном методе данных о предельных прочностных характеристиках матрицы обусловлено прежде всего тем, что разрушение полимерной матрицы приводит к потере композитом монолитности и, как следствие, выходу из строя изделий из подобных материалов. Кроме того, сведения о пределах прочности полимерных связующих широко представлены в научно-технической литературе [8].

В силу структуры рассматриваемых неоднородных материалов численное моделирование предельных прочностных характеристик хаотически армированных короткими волокнами композитов с дисперсными функционализирующими добавками в работе проводится для сжимающей нагрузки, направленной только вдоль вертикальной оси  $z$  лабораторной системы координат. Рассматривается хрупкое разрушение композитных материалов. Моделирование опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей [9] и понятие оператора концентрации напряжений  $K^\sigma(\mathbf{r})$  (тензора четвертого ранга), связывающего напряжения  $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$  внутри каждого из элементов неоднородности со средним (внешним) напряжением  $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ , приложенным ко всему композиту [6; 7]:

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

где  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор произвольной (случайной) точки в неоднородном материале. Угловые скобки в (1) и далее по тексту определяют процедуру статистического усреднения (по объему или по ориентациям кристаллографических осей кристаллитов) [9]. При этом процедура усреднения в многокомпонентном композитном материале для некоторой случайной величины  $b$  сводится к суммированию

$$\langle b \rangle = \sum_s v_s \langle b_s(\mathbf{r}) \rangle, \quad (2)$$

где  $v_s$  – объемное содержание элемента неоднородности  $s$ -го типа,  $b_s(\mathbf{r})$  – соответствующая  $s$ -му элементу неоднородности случайная величина, а для объемных содержаний наполнителей и матрицы в композите выполняется условие  $\sum_s v_s = 1$  [5–7; 9].

Соотношение для вычисления оператора  $K^\sigma(\mathbf{r})$  в обобщенном сингулярном приближении теории случайных полей имеет следующий вид (индексы для лучшего восприятия формулы опущены) [6; 7]:

$$K^\sigma(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \times \langle c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}. \quad (3)$$

В формуле (3)  $c(\mathbf{r})$  – тензор модулей упругости элемента неоднородности;  $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^c$ , где  $c^c$  – тензор модулей упругости однородного тела сравнения (вспомогательный тензор, определяемый из теории [9]);  $I$  – единичный тензор четвертого ранга;  $g(\mathbf{r})$  – тензор четвертого ранга с компонентами [9]:

$$g_{ijkl} = a_{i(jkl)}. \quad (4)$$

В формуле (4) круглые скобки в индексах компонент  $a_{ijkl}$  тензора четвертого ранга  $a(\mathbf{r})$  (в скобки заключены пары индексов  $i, j$  и  $k, l$ ) обозначают выполнение процедуры симметризации [9]. Компоненты  $a_{ijkl}$  вычисляются с помощью соотношения

$$a_{ijkl} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} \sin \theta d\theta d\varphi,$$

где  $\varphi$  и  $\theta$  – углы сферической системы координат;

$t_{il}^{-1}$  – условное обозначение для элементов матрицы, обратной матрице  $T$  с элементами  $t_{il} = c_{ijkl}^c n_k n_j$ , где  $n_k, n_j$  ( $k, j = 1, 2, 3$ ) – компоненты вектора внешней нормали к поверхности эллипсоидального включения с полуосями  $l_1, l_2$  и  $l_3$ , определяемые как

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

Далее в работе, как и в статьях [5; 6] при моделировании эффективных и локальных упругих характеристик полимерных фрикционных композитов, рассматривали композиты с включениями нескольких типов. К первому типу относили равномерно распределенные в пространстве композита дисперсные включения каучука. Ко второму типу – рубленые короткие волокна бесщелочного стекла (БЩС), хаотически распределенные в пространстве композита. К третьему типу – равномерно распределенные в пространстве материала дисперсные включения минерального порошка, состоящего

**Таблица 1.** Значения упругих характеристик изотропных компонентов полимерных фрикционных композитов  
**Table 1.** Values of elastic characteristics of isotropic components of polymeric frictional composites

| Тип компонента<br>Component type | Материал компонента<br>Component material | Модуль Юнга, ГПа<br>Young's modulus, GPa | Коэффициент Пуассона<br>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                                    |

из поликристаллов глинозема, графита и барита, взятых в отношении 1 : 1 : 1 (по объему). В качестве элемента неоднородности четвертого типа было выбрано эпоксифенольное связующее (ЭФС), представляющее собой диановую смолу, отверждаемую новолачной фенолформальдегидной смолой с низким содержанием фенола (не более 0,5 %) в соотношении (по массе) 60 : 40 (изготовитель – ЗАО «ЭНПЦ Эпитал», Москва, Россия) [8]. Все компоненты модельных композитов, кроме графита, полагали изотропными. Значения упругих характеристик изотропных компонентов приведены в таблице 1 [8; 10–13].

Для проведения численных расчетов с тензорами применялась их запись в матричном виде. Причем для изотропных наполнителей композитов при вычислении элементов  $c_{ij} \neq 0$  ( $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ) симметрической матрицы  $c$  тензора модулей упругости 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,  $\nu$  – коэффициент Пуассона [9].

Графит – компонент третьего типа – обладает гексагональной кристаллической структурой и сильно анизотропен. Поэтому для элементов  $c_{ij} \neq 0$  матрицы  $c$  тензора модулей упругости 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 модельных расчетов, как и в работах [5; 6], использовали эффективные характеристики поликристаллического графита, полученные методом самосогласования [9; 15]. Эти характеристики были определены с помощью усреднения по всевозможным ориентациям кристаллографических осей кристаллитов графита (с изотропной функцией распределения), сводящегося к интегрированию по всевозможным углам Эйлера [9; 15]. Для этого была организована итерационная процедура, в которой в качестве значений элементов матрицы  $c^c$  брали значения матрицы тензора модулей упругости поликристаллического графита, вычисленные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений элементов матрицы  $c^c$  (нулевое приближение итерационной процедуры) выбрали упругие характеристики поликристаллического графита в приближении Фойгта [9; 15]. Выход из итерационной процедуры происходил, когда максимальная разница между соответствующими модулями матрицы  $c^c$  становилась меньше 0,01 ГПа.

При построении модели прогнозирования значений предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) рассматриваемых в работе фрикционных материалов основывались на представлении их структуры в виде статистически однородных матричных композитов. Считалось, что дисперсные включения каучука, глинозема, графита и барита имеют вид сфер одинакового 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 этом эллипсоиды ориентированы своей большей полуосью в пространстве композита в семи различных направлениях относительно лабораторной системы координат – параллельно координатным осям (три направления) и параллельно прямым, образующим равные углы со всеми координатными осями (четыре направле-

ния). Кроме того, считалось, что модельные композиты имеют объемные концентрации компонентов  $v_1, v_2, v_3$  и  $v_4$ , где индекс 1 относится к каучуку, индекс 2 – к волокнам БЩС, 3 – к минеральному порошку, а 4 – к связующему ЭФС [5; 6].

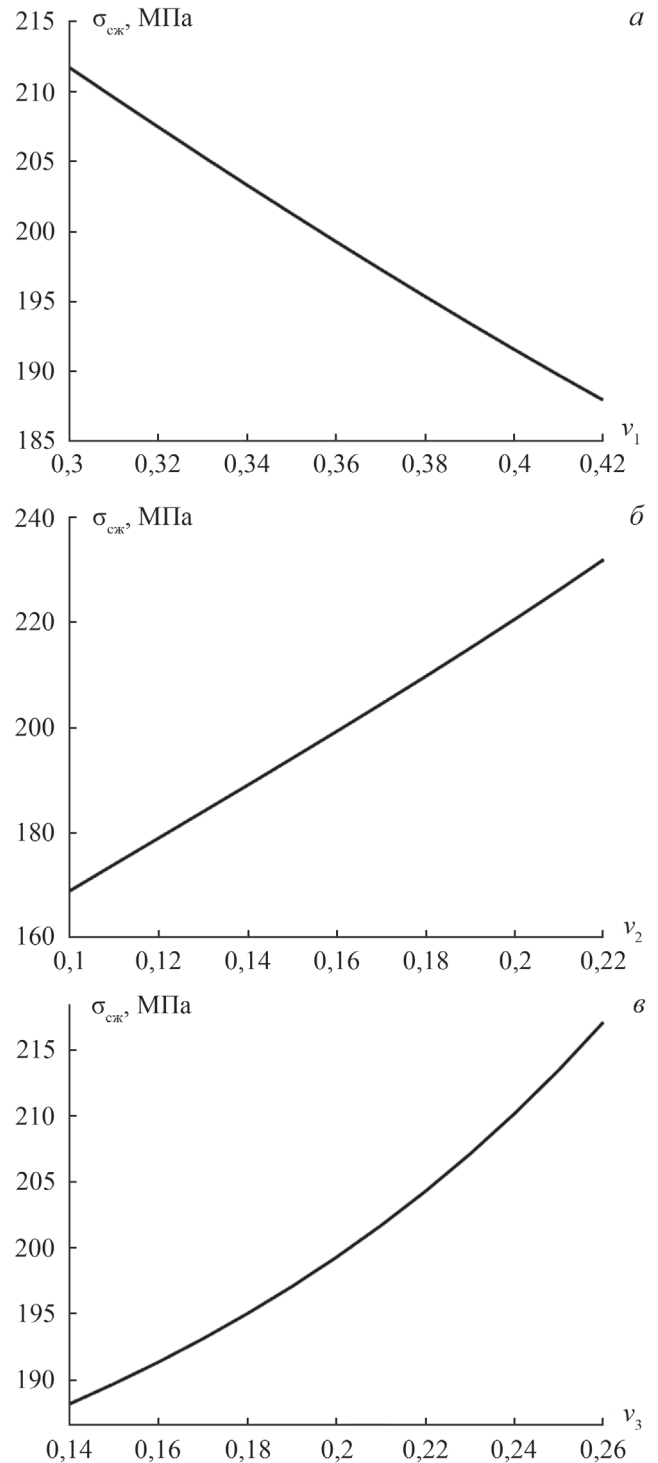
Для полимерных фрикционных композитов с изотропными компонентами соотношение (3) для матрицы тензора  $K^\sigma(\mathbf{r})$  в элементе неоднородности  $s$ -го типа с учетом формулы (2) преобразуется к следующему виду [6; 7]:

$$K_s^\sigma = c_s \left( I - g_s (c_s - c^c) \right)^{-1} \times \left( \sum_i v_i c_i \left( I - g_i (c_i - c^c) \right)^{-1} \right)^{-1}. \quad (5)$$

В выражении (5)  $c_s$  и  $c^c$  – матрицы тензоров модулей упругости элемента неоднородности  $s$ -го типа композита и однородного тела сравнения соответственно;  $g_s$  – это тензор  $g(\mathbf{r})$  элемента неоднородности  $s$ -го типа, вычисляемый по формуле (4). При этом  $g_1, g_3$  соответствуют сферическим включениям каучука, глинозема, графита и барита ( $l_1 = l_2 = l_3 = R = 1$ );  $g_2$  – эллипсоидальным включениям (волокон) БЩС, ориентированным относительно осей координат вдоль указанных выше семи направлений, с главной полуосью  $L = 50$  и остальными полуосями, равными 1;  $g_4$  – связующему ЭФС ( $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ ). Считалось также, что объемные содержания эллипсоидальных включений (волокон) БЩС в каждом из семи указанных направлений одинаковы и равны  $v_2/7$ .

Для вычисления упругих характеристик  $c^c$  однородного тела сравнения рассматриваемых полимерных фрикционных композитов, как и в работах [5; 6], применяли метод самосогласования [9; 15]. Для этого была организована итерационная процедура, в которой в качестве значений элементов матрицы  $c^c$  брали значения матрицы тензора модулей упругости, вычисленные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений элементов матрицы  $c^c$  (нулевое приближение итерационной процедуры) выбирали упругие характеристики в приближении Хилла (среднее арифметическое значений в приближениях Фойгта и Ройсса) [9; 15]. Выход из итерационной процедуры происходил, когда максимальная разница между соответствующими модулями матрицы  $c^c$  составляла меньше 0,01 ГПа.

Модельные расчеты пределов прочности рассматриваемых фрикционных композитов проводи-



**Рис. 1.** Зависимости предельных прочностных показателей модельных фрикционных композитов при варьировании объемных содержаний включений каучука (а) при  $0,3 \leq v_1 \leq 0,42$ ,  $v_2 = 0,16$ ,  $v_3 = 0,2$ ; волокон БЩС (б) при  $v_1 = 0,36$ ,  $0,1 \leq v_2 \leq 0,22$ ,  $v_3 = 0,2$ ; включений минерального порошка (в) при  $v_1 = 0,36$ ,  $v_2 = 0,16$ ,  $0,14 \leq v_3 \leq 0,26$ .

**Fig. 1.** Dependences of the ultimate strength characteristics of model frictional composites with the variation of the volumetric contents of rubber inclusions (a) when  $0.3 \leq v_1 \leq 0.42$ ,  $v_2 = 0.16$ ,  $v_3 = 0.2$ ; fibers of E-glass (b) when  $v_1 = 0.36$ ,  $0.1 \leq v_2 \leq 0.22$ ,  $v_3 = 0.2$ ; mineral powder (v) when  $v_1 = 0.36$ ,  $v_2 = 0.16$ ,  $0.14 \leq v_3 \leq 0.26$ .

ли с помощью метода, разработанного в статье [7]. При этом использовали данные о разрушающем напряжении при сжатии  $\sigma_p = 150$  МПа для ЭФС [8]. Внешнее сжимающее воздействие  $\langle \sigma \rangle$  (МПа), направленное вдоль оси  $z$ , задавали в виде  $(3 \times 3)$ -матрицы с единственным положительным ненулевым элементом  $B$ , расположенным в третьей строке и третьем столбце  $\langle \sigma \rangle$ . Вычислительная процедура была организована следующим образом. Вначале для модельного фрикционного композита (при фиксированных значениях объемных содержаний наполнителей) по формуле (5) вычисляли оператор  $K^c(\mathbf{r})$  (в связующем ЭФС). Затем, опираясь на определение (1) оператора концентрации напряжений, вычисляли элементы  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) матрицы тензора напряжений для ЭФС. После этого сравнивали вычисленное значение  $\sigma_{33}$  с  $\sigma_p$  (для ЭФС). Если  $\sigma_{33} < \sigma_p$ , то значение  $B$  увеличивали на 0,1 МПа и вычисление элементов  $\sigma_{ij}$  матрицы тензора напряжений для ЭФС повторяли заново. Вычислительную процедуру останавливали сразу, как только выполнялось условие  $\sigma_{33} \geq \sigma_p$ , а последнее значение  $B$  принимали в качестве предела прочности  $\sigma_{сж}$  фрикционного композита при одноосном сжатии. Затем фиксировали новые значения объемных содержаний наполнителей модельного фрикционного композита и вычисления  $\sigma_{сж}$  повторяли заново.

Результаты расчетов предельных значений прочностных показателей (при одноосном сжатии) модельных фрикционных композитов представлены на рисунке 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построена модель, позволяющая прогнозировать значения предельных прочностных пока-

зателей (при одноосном сжатии) полимерных фрикционных композитов в зависимости от вариаций объемных концентраций наполнителей – волокон бесщелочного стекла, дисперсных включений каучука и минерального порошка, состоящего из глинозема, графита и барита в равных объемных долях. На основании проведенных модельных расчетов для практически значимых диапазонов изменений объемных содержаний наполнителей можно заключить следующее:

– Увеличение объемного содержания включений каучука приводит к ослаблению прочностных показателей модельных композитов, при этом зависимости  $\sigma_{сж}$  имеют монотонный характер, близкий к линейному закону (рис. 1а).

– Увеличение концентрации волокон БЩС приводит к существенному улучшению предельных прочностных характеристик исследуемых полимерных фрикционных композитных материалов, при этом зависимости  $\sigma_{сж}$  имеют монотонный характер, близкий к линейному закону (рис. 1б).

– Увеличение объемного содержания включений минерального порошка приводит к усилению предельных прочностных показателей модельных трибокомпозитов, при этом зависимости  $\sigma_{сж}$  имеют нелинейный характер (рис. 1в).

Таким образом, необходимы дополнительные экспериментальные исследования по оптимизации процентного содержания наполнителей с целью максимального улучшения трибохарактеристик рассматриваемых полимерных фрикционных композитов без существенного снижения их прочностных показателей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-08-00111-а и в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН (№ гр. проекта ААА-А-А16-116012610052-3).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плескачевский Ю.М., Сергиенко В.П. 2005. Фрикционные материалы с полимерной матрицей: перспективы исследований, достигнутый уровень, рынок. *Наука и инновации*. 5: 46–53.
2. 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
3. Sergienko V.P., Bukharov S.N. 2015. *Noise and vibration in friction systems*. Springer: 251 p.
4. Мышкин Н.К., Сергиенко В.П., Бухаров С.Н., Мясникова Н.А. 2017. Влияние наноразмерных наполнителей на виброакустические характеристики фрикционных композитов. *Вестник РГУПС*. 1(65): 30–35.
5. Бардушкин В.В., Сычев А.П., Карташов Д.А. 2019. Моделирование эффективных упругих характеристик и параметров анизотропии фрикционных полимерных композитов, армированных ориентированными волокнами. *Полимерные материалы и технологии*. 5(3): 42–47. doi: 10.32864/polymmattech-2019-5-3-42-48
6. Бардушкин В.В., Сычев А.П., Сычев А.А. 2020. Концентрация напряжений во фрикционных полимерных композициях, армированных ориентированными волокнами. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 21(5): 223–229. doi: 10.36652/0202-3350-2020-21-5-223-229
7. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Кириллов Д.А., Сорокин А.И. 2014. О методе прогнозиро-

- вания предельных прочностных характеристик матричных композитов, основанном на использовании оператора концентрации напряжений. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 1: 45–51.
8. Лапицкий В.А., Крицук А.А. 1986. *Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков*. Киев, Наукова думка: 92 с.
  9. Шермергор Т.Д. 1977. *Теория упругости микронеоднородных сред*. М., Наука: 399 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. *Стекловолоконные 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.
  5. Bardushkin V.V., Sychev A.P., Kartashov D.A. 2019. [Modeling of effective elastic characteristics and anisotropy parameters of friction polymeric composites reinforced by oriented fibers]. *Polimernye materialy i tekhnologii*. 5(3): 42–47. (In Russian). doi: 10.32864/polymmattech-2019-5-3-42-48
  6. Bardushkin V.V., Sychev A.P., Sychev A.A. 2020. [Stress concentration in frictional polymeric composites reinforced by oriented fibers]. *Assembling in mechanical engineering and instrument-making*. 21(5): 223–229. (In Russian). doi: 10.36652/0202-3350-2020-21-5-223-229
  7. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Yakovlev V.B., Sychev A.P., Kirillov D.A., Sorokin A.I. 2014. [About a method of predicting of ultimate strength characteristics of the matrix composites, based on use of the operator of stresses concentration]. *Ecological bulletin of research centers of the Black Sea economic cooperation*. 1: 45–51. (In Russian).
  8. 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).
  9. Shermergor T.D. 1977. *Teoriya uprugosti mikhronednorodnykh sred*. [Micromechanics of inhomogeneous medium]. Moscow, Nauka: 399 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).

## REFERENCES

Поступила 24.11.2020