УДК 539.3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. БАРДУШКИН[1], Д.А. КИРИЛЛОВ[1], А.П. СЫЧЕВ[2,3+]

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ», пл. Шокина, 1, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Россия;
[2] Южный научный центр РАН, пр-т Чехова, 41, 344006, г. Ростов-на-Дону, Россия;
[3] Ростовский государственный университет путей сообщения, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, 344038, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Решается задача численного прогнозирования предельных значений прочностных показателей в композитных материалах, имеющих неодинаковую плотность размещения сферических включений в различных направлениях. В качестве дисперсного наполнителя пространственно неоднородных материалов рассматривается графит. В качестве матрицы – эпоксидные связующие ЭД-20, ЭХД и УП-610. Исследованы зависимости пределов прочности при одноосном сжатии в различных направлениях от изменения структуры композитов, а также состава компонентов и их концентрации.

Ключевые слова: прогнозирование, матричные композиты, включения, оператор концентрации напряжений, механическая прочность.

Введение

В работе решается задача численного прогнозирования пределов прочности при одноосном сжатии дисперсно-наполненных композитных материалов, имеющих неодинаковую плотность размещения сферических включений в различных направлениях. Проявления подобной пространственной неоднородности композитов могут быть обусловлены рядом причин. Это могут быть специальные требования к разрабатываемым изделиям, заставляющие исследователей искать оригинальные технологические решения для достижения неравномерности распределения включений в материалае. Пространственная неоднородность создаваемых композитов может быть вызвана также объективными трудностями проектирования и разработки технологического оборудования [1–4]. В триботехнике ситуация с неравномерным распределением наполнителей в полимерных связующих возникает, например, при создании слоистых антифрикционных композитных структур [2, 3]. Примерами пространственно неоднородных сред в электронной технике могут служить структуры на пористом кремнии и углероде, у которых сформированные поры заполняются рабочим материалом, т. е. формируется классический композит «матрица-включение». В плоскости, параллельной подложке, их структура хорошо подчиняется условию пространственной однородности, однако в вертикальном направлении (от подложки к поверхности) сформированные полости имеют определенную пространственную неоднородность [4].

Неравномерное распределение включений в пространстве композитов приводит к анизотропии их физико-механических свойств (упругих, оптических, сегнетоэлектрических и др.). Это необходимо учитывать при создании изделий, использующих подобные материалы. Поэтому методы оценки равномерности распределения включений и анализа влияния этого фактора на физико-механические (в частности, упругие) свойства матричных композитов актуальны. При анализе напряженно-деформированного состояния подобных композитов встает проблема прогнозирования не только их эффективных (эксплуатационных) [2, 5, 6], локальных (внутренних) упругих свойств [2, 7], но и предельных прочностных характеристик [2, 8]. Теоретическое прогнозирование предельных прочностных характеристик позволяет уже на стадии проектирования материалов делать заключения о их возможном поведении при экстремальных нагрузках, давать рекомендации по подбору состава компонентов, их концентрации и т. п.

Построение модели и постановка задачи

Структура реальных пространственно неодно-

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

родных материалов представляет собой стохастическую (случайно неоднородную) сплошную среду. Центральным моментом при использовании статистических методов прогнозирования их физико-механических характеристик является возможность выделения представительного объема, т. е. некоторой области бесконечно большого обьема материала, свойства которой аналогичны свойствам материала в целом, а также свойствам подобной области, расположенной пространственно в другом месте. Удовлетворение этого условия приводит к выполнению условия эргодичности, т. е. дает возможность проводить усреднение по объему материала, а не по ансамблю реализаций [2, 9]. Для пространственно однородных материалов это условие выполняется. Это же условие может выполняться и для пространственно неоднородных материалов [5].

Для построения модели рассмотрим матричный композит, состоящий из двух изотропных компонентов – включений сферической формы примерно одинакового радиуса R и окружающей их сплошной матрицы. Причем структура неоднородного материала такова, что плотность «укладки» элементов неоднородности в различных направлениях неодинакова. Примем, что любой представительный объем (рис. 1) композитного материала имеет такое расположение включений, что в направлении Ox прямоугольной системы координат среднее расстояние между центрами соседних сфер равно a, в направлении Oy – b, а в направлении Oz – c. Отметим, что вдоль направления любой из осей системы координат этот материал является пространственно однородным, однако в целом однородность отсутствует.

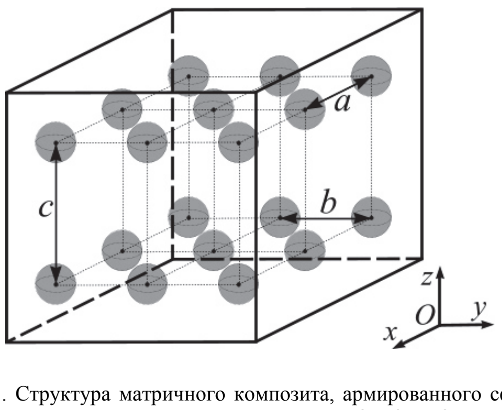

Рис. 1. Структура матричного композита, армированного сферическими включениями в направлениях осей Ox, Oy и Oz

Приведем исходную структуру материала к виду, позволяющему проводить прогнозирование его упругих характеристик. С этой целью совершим аффинное преобразование сжатия-растяжения пространства композита

$$x' = \frac{c}{a}x\,,\ y' = \frac{c}{b}y\,,\ z' = z\,. \tag{1}$$

В результате этого преобразования сферические включения радиуса R примут форму эллипсоидов с полуосями cR/a, cR/b, R, причем средние расстояния между центрами соседних эллипсоидов вдоль каждой из координатных осей будут одинаковыми, равными c. Таким образом, весь материал станет пространственно однородным. При этом:

– объем каждого сферического включения изменяется в $c^2/(ab)$ раз (следовательно, и объем всех элементов неоднородности изменяется в это же количество раз), однако объем всего композитного материала также изменяется в $c^2/(ab)$ раз, а значит, концентрация включений остается неизменной;

– компоненты матричного композита остаются изотропными (если коэффициенты c/a и c/b в преобразовании сжатия-растяжения (1) принимают значения, при которых сохраняется способность материала к обратимой деформации);

– в силу пространственной однородности «нового» материала в качестве элементарного объема можно рассматривать одно эллипсоидальное включение с различными полуосями cR/a, cR/b, R, окруженное сплошной матрицей.

В работе [5] обоснована корректность подхода, связанного с аффинным преобразованием сжатия-растяжения пространства композита, к прогнозированию эффективных (эксплуатационных) упругих свойств пространственно неоднородных материалов в рамках обобщенного сингулярного приближения [9]. Опираясь на [5], можно утверждать о корректности этого же подхода к прогнозированию предельных прочностных характеристик указанных композитов.

При решении задачи прогнозирования значений предельного разрушающего напряжения (при одноосном сжатии) пространственно неоднородных материалов будем рассматривать композиты на полимерной основе с дисперсными включениями графита. Прогнозирование разрушающих характеристик таких композитов основывается на разработанном в статье [10] методе прогнозирования предельных прочностных свойств матричных композитных материалов при сжатии. Рассматривается хрупкое разрушение неоднородных материалов.

Согласно этому методу приложенная к композиту сжимающая (в определенном направлении) нагрузка становится разрушающей тогда и только тогда, когда внутреннее напряжение в матрице начинает превышать предел ее прочности. При этом величина интенсивности внутренних напряжений, возникающих в матрице при внешнем воздействии на композит, сравнивается с ее известным (справочным) значением предела прочности. Использование в указанном методе данных о предельных прочностных характеристиках матрицы обусловлено в первую очередь 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 для полимерных связующих широко представлены в научно-технической литературе.

Прогнозирование опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей [9] и понятии 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 [2, 11–14]:

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

где $\mathbf{r}$ – радиус-вектор случайной точки композитной среды. Угловые скобки в (2) и далее по тексту определяют процедуру статистического усреднения, которая при выполнении гипотезы эргодичности совпадает с усреднением по объему [2, 9].

Для определения $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ необходимо решать уравнения равновесия упругой неоднородной среды. Однако в общем случае получить соотношение для численных расчетов оператора концентрации напряжений не удается. Поэтому для вычисления $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ используются различные приближения. Одним из таких приближений, учитывающих взаимодействия включений, является обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей [9]. 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 окончательные выражения для вычисления $K^{\sigma}(\mathbf{r})$. Физический смысл обобщенного сингулярного приближения заключается в предположении однородности полей напряжений и деформаций в пределах элемента неоднородности. В этом случае выражение для $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ имеет следующий вид (индексы опущены) [2, 13, 14]:

$$K^{\sigma}(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r})\left[I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r})\right]^{-1}\left\langle c(\mathbf{r})\left[I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r})\right]^{-1}\right\rangle^{-1}. \qquad (3)$$

Здесь I – единичный тензор четвертого ранга; $c(\mathbf{r})$ – тензор модулей упругости; $g(\mathbf{r})$ – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия, являющийся тензором четвертого ранга; $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^{\mathrm{c}}$ – разность между соответствующими параметрами неоднородной среды и однородного тела сравнения, где c^{c} – упругие характеристики тела сравнения.

Для вычисления компонент g_{ijkl} тензора $g(\mathbf{r})$ необходимо вначале осуществить расчеты компонент a_{iklj} интеграла от вторых производных тензора Грина, а затем в a_{iklj} по двум парам индексов (i, j и k, l) провести операцию симметризации [9]. Компоненты a_{iklj} вычисляются с помощью следующего соотношения:

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

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 $t_{il} = c^{\mathrm{c}}_{iklj} n_k n_j$, 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

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

Как указывалось, в случае выполнения условия эргодичности можно использовать усреднение по объему. Тогда для двухкомпонентного композита с изотропными включениями и матрицей операция усреднения по всему объему материала для некоторой случайной величины $a(\mathbf{r})$ сводится к суммированию (здесь и далее индекс «в» будет относиться к включениям, а «м» – к матрице) [2, 9, 15]:

$$\langle a(\mathbf{r})\rangle = v_{\text{в}} a_{\text{в}} + v_{\text{м}} a_{\text{м}}\,, \qquad (5)$$

где $v_{\text{в}}$ и $v_{\text{м}}$ – объемные концентрации включений и матрицы ($v_{\text{в}} + v_{\text{м}} = 1$); $a_{\text{в}}$ и $a_{\text{м}}$ – соответствующая указанному компоненту случайная величина.

Проведение модельных расчетов

Для проведения модельных расчетов в работе были рассмотрены композиты с изотропными компонентами на основе известных и широко применяемых на практике эпоксидных связующих ЭД-20 (модуль Юнга $E = 3{,}8$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}39$, разрушающее напряжение при сжатии $\sigma_{\text{р}} = 198$ МПа), ЭХД ($E = 4{,}5$ ГПа, $\nu = 0{,}36$, $\sigma_{\text{р}} = 320$ МПа) и УП-610 ($E = 5{,}2$ ГПа, $\nu = 0{,}41$, $\sigma_{\text{р}} = 347$ МПа) с включениями графита ($E = 10{,}9$ ГПа, $\nu = 0{,}235$) [16, 17].

С учетом (5), соотношение (3) для оператора концентрации $K^{\sigma}_{\text{м}}$ в связующем (матрице) примет следующий вид:

$$K^{\sigma}_{\text{м}} = c_{\text{м}}\left[\,I - g_{\text{м}}\left(c_{\text{м}} - c^{\mathrm{c}}\right)\right]^{-1} \times \left\{ \begin{array}{l} v_{\text{в}} c_{\text{в}}\left[\,I - g_{\text{в}}\left(c_{\text{в}} - c^{\mathrm{c}}\right)\right]^{-1} + \\ + v_{\text{м}} c_{\text{м}}\left[\,I - g_{\text{м}}\left(c_{\text{м}} - c^{\mathrm{c}}\right)\right]^{-1} \end{array} \right\}^{-1}, \qquad (6)$$

где $g_{\text{в}}$ – тензор $g(\mathbf{r})$ во включении с компонентами, вычисляемыми с помощью соотношения (4) при $l_1 = cR/a$, $l_2 = cR/b$, $l_3 = R$; $g_{\text{м}}$ – тензор $g(\mathbf{r})$ в матрице с компонентами, также вычисляемыми с помощью (4); $c_{\text{в}}$ и $c_{\text{м}}$ – тензоры модулей упругости включений и матрицы соответственно.

При вычислении компонент тензоров $g_{\text{в}}$ и $g_{\text{м}}$ в формуле (6) полагалось $R = 1$ и $a = b$, т. е. считалось, что в направлениях *Ox* и *Oy* плотность сферических включений в пространственно неоднородном материале примерно одинакова.

В операциях над тензорами использовали матричную форму записи [9]. При этом ненулевые элементы c_{ij} $(i, j = 1, \ldots, 6)$ симметрической матрицы тензора c модулей упругости для изотропного материала выражали через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν следующим образом:

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

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

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

Упругие характеристики однородного тела сравнения вычисляли методом самосогласования [2, 9, 15], для чего использовали итерационную процедуру, в которой в качестве параметров c^{c} тела сравнения использовали тензоры модулей упругости (в матричной записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения брали упругие характеристики, полученные в приближении Хилла, т. е. среднее арифметическое значений, полученных в приближениях Ройсса $c_{\text{Reuss}} = \left(v_{\text{в}} c_{\text{в}}^{-1} + v_{\text{м}} c_{\text{м}}^{-1} \right)^{-1}$ и Фойгта $c_{\text{Voight}} = v_{\text{в}} c_{\text{в}} + v_{\text{м}} c_{\text{м}}$ [2, 9]. Итерационную процедуру прекращали при максимальном изменении модулей c^{c} менее чем на 1%.

Для проведения модельных расчетов, позволяющих учитывать неравномерность распределения включений в матрице, был введен безразмерный параметр cR/a. Исследовалось влияние изменения этого параметра на предельные прочностные показатели рассматриваемых пространственно неоднородных материалов.

В модельных расчетах использовали данные о разрушающем напряжении при сжатии $\sigma_{\text{р}}$ указанных выше полимерных связующих. Внешнее сжимающее воздействие $\langle\sigma\rangle$ (МПа) задавали в лабораторной системе координат *Oxyz* матрицей

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

Были рассмотрены следующие случаи осевого сжатия $\langle\sigma\rangle$: 1) $\sigma_{33} = A$, $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0$ (параллельно оси *Oz*); 2) $\sigma_{11} = B$, $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ (параллельно оси *Ox*). Отметим, что в силу структуры рассматриваемых неоднородных материалов моделирование сжимающего воздействия в направлении оси *Oy* равносильно второму случаю.

Вычислительная процедура была организована следующим образом. Вначале для модельного композита при фиксированных значениях процентного содержания его элементов неоднородности и параметра cR/a по формуле (6) вычисляли оператор $K_{\text{м}}^{\sigma}$ (в связующем). Далее в $\langle\sigma\rangle$ задавали определенные положительные значения A и B (для первого и второго случаев соответственно). Затем, опираясь на определение (2) оператора концентрации напряжений, вычисляли элементы σ_{ij} $(i, j = 1, 2, 3)$ матрицы тензора напряжений в связующем. После этого происходило сравнение значений вычисленных элементов σ_{33} (для первого случая) и σ_{11} (для второго случая) со справочной величиной предела прочности при сжатии $\sigma_{\text{р}}$ для рассматриваемого связующего. Если $\sigma_{33} < \sigma_{\text{р}}$ (соответственно $\sigma_{11} < \sigma_{\text{р}}$), то значение A (соответственно B) увеличивали на 0,01 МПа и вычисление элементов σ_{ij} матрицы тензора напряжений в связующем повторяли заново. Вычислительную процедуру останавливали сразу, как только выполнялось условие $\sigma_{33} \geq \sigma_{\text{р}}$ (соответственно $\sigma_{11} \geq \sigma_{\text{р}}$), а последнее значение A (соответственно B) принимали в качестве предела прочности $\sigma_{\text{сж}}$ композитного материала при одноосном сжатии параллельно оси *Oz* (соответственно параллельно оси *Ox*). Затем фиксировали новое значение параметра cR/a, и вычисления пределов прочности $\sigma_{\text{сж}}$ вдоль каждой из осей для модельного композита повторяли заново.

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета значений разрушающего напряжения для рассматриваемых композитных материалов при сжатии параллельно осям *Ox* и *Oz* от изменения структурного параметра cR/a.

Модельные расчеты, представленные на рис. 2, проводились при объемной концентрации наполнителя $v_{\text{в}} = 0{,}05$.

Дальнейшие исследования были посвящены изучению влияния концентрации наполнителя $v_{\text{в}}$ на величину предела прочности $\sigma_{\text{сж}}$ композитов на основе эпоксидных смол марок ЭД-20, ЭХД и УП-610 при сжатии в направлении осей *Ox* и *Oz*. На рис. 3

представлены результаты модельных расчетов только для композитов на основе связующего ЭД-20, т. к. для материалов на основе эпоксидных смол марок ЭХД и УП-610 характер указанных зависимостей был аналогичен, отличаясь только по величине.

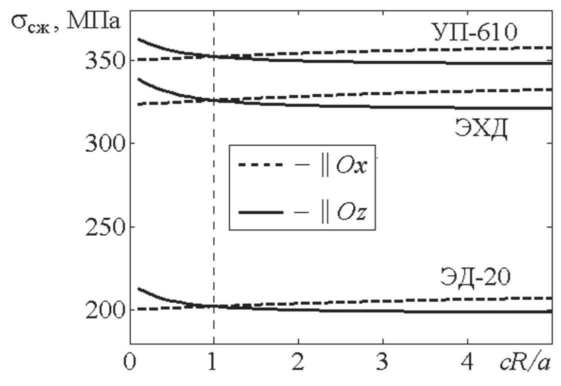

Рисунок 2 – Зависимости предельных прочностных показателей (при осевом сжатии) модельных композитов на основе связующих ЭД-20, ЭХД и УП-610 от изменения параметра *cR*/*a*

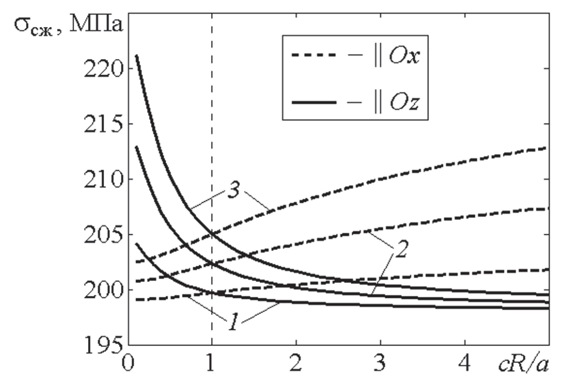

Рисунок 3 – Зависимости предельных прочностных показателей (при осевом сжатии) модельных композитов на основе связующего ЭД-20 от параметра *cR*/*a* и объемной концентрации $v_в$ наполнителя (графит): *1* – $v_в$ = 0,02; *2* – $v_в$ = 0,05; *3* – $v_в$ = 0,08

Заключение

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

1. Зависимости значений предельных прочностных показателей от параметра cR/a имеют нелинейный и монотонный характер. При этом значения $\sigma_{сж}$ возрастают при одноосном сжатии вдоль *Ox* и убывают при сжатии вдоль оси *Oz*.

2. Рассматриваемые пространственно неоднородные композитные материалы с дисперсными добавками графита имеют более высокие предельные прочностные показатели по сравнению с аналогичными характеристиками соответствующих отдельно взятых полимерных связующих вне зависимости от величины параметра cR/a, концентрации включений $v_в$ и направления приложения сжимающей нагрузки, т. е. $\sigma_{сж} > \sigma_р$.

3. Точка $cR/a = 1$ соответствует пространственно однородному композитному материалу со сферическими включениями одинакового радиуса. Поэтому на рис. 2 и 3 кривые, соответствующие одноосным внешним воздействиям в направлениях *Ox* и *Oz*, попарно пересекаются при $cR/a = 1$.

Исследование выполнено в рамках реализации Государственного задания на 2016 г. № 007-01114-16 ПР (проект 0256-2015-0074) и при поддержке РФФИ (гранты 14-08-00654-а, 16-08-00262-а).

Литература

1. Избранные задачи современного материаловедения: кластеры, покрытия, порошки, композиты, неразъемные соединения / Под ред. А.А. Лозована. – М.: Пробел-2000, 2014. – 484 с.
2. Колесников, В.И. Микромеханика поликристаллов и композитов (напряженно-деформированное состояние и разрушение) / В.И. Колесников, В.В. Бардушкин, В.Б. Яковлев, А.П. Сычев, И.В. Колесников. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС, 2012. – 288 с.
3. Машков, Ю.К. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю.К. Машков, З.Н. Овчар, М.Ю. Байбарацкая, О.А. Мамаев. – М.: Недра, 2004. – 261 с.
4. Нанотехнологии в электронике. Выпуск 3 / Под ред. чл.-корр. РАН Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2015. – 480 с.
5. Бардушкин, В.В. Эффективные упругие характеристики пространственно неоднородных материалов / В.В. Бардушкин // Известия вузов. Электроника. – 2005. – № 2. – С. 19–24.
6. Колесников, В.И. Влияние распределения наполнителя в полимерном связующем на эффективные упругие свойства антифрикционных композитов / В.И. Колесников, В.В. Бардушкин, А.П. Сычев, Д.А. Кириллов, В.В. Даньков // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 12. – С. 38–43.
7. Бардушкин, В.В. Влияние распределения наполнителя в полимерном связующем на локальные упругие характеристики антифрикционных композитов / В.В. Бардушкин, Д.А. Кириллов, А.П. Сычев, В.А. Кохановский, А.А. Сычев // Вестник РГУПС. – 2015. – № 3. – С. 8–13.
8. Бардушкин, В.В. Влияние концентрации, формы и ориентации включений на предельные значения прочностных показателей матричных композитов при сжатии / В.В. Бардушкин, И.В. Колесников, А.П. Сычев, А.И. Сорокин // Материалы, технологии, инструменты. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 13–18.
9. Шермергор, Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред / Т.Д. Шермергор. – М.: Наука, 1977. – 399 с.
10. Колесников, В.И. О методе прогнозирования предельных прочностных характеристик матричных композитов, основанном на использовании оператора концентрации напряжений / В.И. Колесников, В.В. Бардушкин, В.Б. Яковлев, А.П. Сычев, Д.А. Кириллов, А.И. Сорокин // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2014. – № 1. – С. 45–51.
11. Победря, Б.Е. Концентрация напряжений и деформаций в композитах / Б.Е. Победря, В.И. Горбачев // Механика композитных материалов. – 1984. – № 2. – С. 207–214.
12. Маслов, Б.П. Концентрация напряжений в изотропной матрице, армированной анизотропными включениями / Б.П. Маслов // Прикладная механика. – 1987. – Т. 23, № 10. – С. 73–79.
13. Yakovlev, V.B. Local stress-strain conditions of textured polycrystals under high pressure / V.B. Yakovlev // High Pressure Research. – 2000. – Vol. 17. – P. 375–383.
14. Колесников, В.И. О прогнозировании распределений локальных упругих полей в неоднородных средах на основе обобщенного сингулярного приближения / В.И. Колесников,

В.Б. Яковлев, В.В. Бардушкин, А.П. Сычев // Вестник Южного научного центра РАН. – 2015. – Т. 11. № 3. – С. 11–17.
15. Паньков, А.А. Методы самосогласования механики композитов / А.А. Паньков. – Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2008. – 253 с.
16. Лапицкий, В.А. Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков / В.А. Лапицкий, А.А. Крицук. – Киев: Наукова думка, 1986. – 92 с.
17. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Bardushkin V.V., Kirillov D.A., Sychev A.P.

Forecasting of limiting strength in the spatially non-uniform materials.

The problem of limiting strength numerical forecasting in composites having unequal density of the spherical inclusions in different directions, is solved. Graphite is considered as disperse fillers of spatially non-uniform composites. The epoxy binders ED-20, EHD and UP-610 are considered as a matrix. Dependencies of limiting strength characteristics by uniaxial compression in different directions from variation of the structure of the composites and their components' consistency and concentration, were investigated.

Keywords: forecasting, matrix composite, inclusions, operator of stresses concentration, mechanical strength.

Поступила в редакцию 22.06.2016.