

УДК 539.3:621.891; 678.5
DOI: 10.7868/S25000640180301

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРИБОКОМПОЗИТОВ С НАПОЛНЕННЫМИ ЖИДКОЙ СМАЗКОЙ СФЕРИЧЕСКИМИ МИКРОКАПСУЛАМИ

© 2018 г. Академик РАН В.И. Колесников¹, В.В. Бардушкин²,
А.А. Кочетыгов², А.П. Сычев³

Аннотация. Предложен метод прогнозирования предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) многокомпонентных композитов, содержащих включения в виде заполненных жидкостью шарообразных микрокапсул. Метод позволяет учитывать структуру микрокапсул, а также состав и объемную концентрацию компонентов дисперсно-наполненных композитов. Структура микрокапсул описана с помощью безразмерного параметра, равного отношению толщины оболочки к радиусу ее внутреннего жидкого наполнителя. Для вычисления пределов прочности композитов применен двухэтапный подход, основанный на обобщенном сингулярном приближении теории случайных полей и методе самосогласования. На первом этапе вычисляются эффективные упругие характеристики двухкомпонентного композита, имитирующего сферические микрокапсулы, заполненные жидкостью. На втором этапе прогнозируются предельные прочностные показатели (при одноосном сжатии) многокомпонентного дисперсно-наполненного композита, содержащего сферические включения материала с эффективными упругими свойствами, вычисленными на первом этапе, а также другие функционализирующие добавки.

Проведены численные модельные расчеты пределов прочности (при одноосном сжатии) трехкомпонентного трибокомпозита на основе фенилона, с шарообразными микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла. Капсулируемое вещество – глицерин, материал оболочек капсул – каптон. Получены зависимости предельных прочностных показателей от изменения параметра структуры микрокапсул и объемных концентраций элементов неоднородности трибокомпозита.

Ключевые слова: композит, включение, микрокапсула, смазка, оператор концентрации напряжений, механическая прочность, моделирование.

PREDICTING THE ULTIMATE STRENGTH INDICES OF TRIBOCOMPOSITES WITH SPHERICAL MICROCAPSULES FILLED WITH LIQUID LUBRICANT

Academician RAS V.I. Kolesnikov¹, V.V. Bardushkin²,
A.A. Kochetygov², A.P. Sychev³

Abstract. A method is proposed for predicting the ultimate strength indices (for uniaxial compression) of multicomponent composites containing inclusions in the form of spherical microcapsules filled with liquid. The method allows to take into account the structure of microcapsules, as well as the composition and volume concentration of components of dispersed-filled composites. The structure of the microcapsules is described by a dimensionless parameter equal to the ratio of the shell thickness to the radius of its internal liquid filler.

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 РАН (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

To calculate the strength limits of composites, a two-stage approach is used, based on the generalized singular approximation of the random fields theory and the self-consistent method. At the first stage, the effective elastic characteristics of a two-component composite simulating spherical microcapsules filled with a liquid are calculated. At the second stage, the ultimate strength indices (under uniaxial compression) of a multicomponent dispersion-filled composite containing spherical inclusions of a material with effective elastic properties computed in the first stage, as well as other functionalizing additives are predicted.

Numerical model calculations of the tensile strengths (under uniaxial compression) of a three-component tribocomposite based on phenylon, with spherical microcapsules and disperse inclusions of E-glass are carried out. The encapsulated substance is glycerin, the material of capsule shells is capton. The dependences of the ultimate strength parameters on the change in the structure parameter of microcapsules and the volume concentrations of the tribocomposite inhomogeneity elements are obtained.

Keywords: composite, inclusion, microcapsule, lubricant, stress concentration operator, mechanical strength, modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения работоспособности узлов трения все большее распространение получает подход, связанный с нанесением на поверхности трибосопряжений антифрикционных полимерных покрытий, модифицированных с помощью микрокапсул – микрочастиц смазочных материалов в полимерных оболочках. Микрокапсулы могут выделять активное вещество при механическом разрушении в результате нагрузок на поверхностях трения, что приводит к снижению коэффициента трения и повышению износостойкости деталей машин и механизмов [1; 2].

При эксплуатации в узлах трения, особенно тяжело нагруженных, модифицированные с помощью микрокапсул полимерные покрытия находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии. При этом многофакторный характер эксплуатационных воздействий и сложный состав компонентов существенно ограничивают возможности экспериментальных исследований по проектированию и разработке модифицированных с помощью микрокапсул композитов, поскольку требуют больших финансовых и временных затрат. Поэтому проведение комплексных теоретических исследований по прогнозированию физико-механических свойств микрокапсулированных композитов является актуальной задачей [1; 2].

Численное моделирование упругих характеристик – эксплуатационных и предельных разрушающих – неоднородных материалов с включениями, находящимися в жидкой фазе, затруднено из-за того, что значения их сдвигового модуля упругости близки к нулю, а значит, матрица тензора модулей

упругости является вырожденной [3]. Для преодоления возникающих сложностей используют различные приемы. Например, в статье [4] предложен подход к вычислению эффективных (эксплуатационных) упругих свойств композитов, заключающийся в рассмотрении концентрических сфер (внутренняя сфера состоит из материала включения, а внешняя – из материала матрицы) в матрице, образованной материалом с эффективными свойствами. В работах [5–7] для вычисления эксплуатационных, локальных и предельных разрушающих упругих свойств трибокомпозитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла (БЩС) применяли обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей (ОСП) в варианте метода самосогласования. В качестве нулевого приближения для параметров тела сравнения (использование однородного тела сравнения является важнейшим моментом ОСП) были выбраны характеристики в приближении Фойгта [3]. Однако основным недостатком подхода, примененного в статьях [5–7], являлось предположение о том, что оболочка микрокапсул не оказывает влияния на свойства материалов. В работе [8] с помощью ОСП в варианте метода самосогласования предложен подход к вычислению эффективных упругих свойств трибокомпозитов, позволяющий учитывать структуру микрокапсул. Этот подход, в отличие от метода расчета, рассмотренного в статье [5], позволил учесть влияние характерного размера микрокапсул (отношение толщины оболочки к радиусу жидкого наполнителя), состава и объемного содержания компонентов композитов на их эксплуатационные свойства.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В настоящей работе предложен метод прогнозирования предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) многокомпонентных матричных композитов, содержащих включения в виде заполненных жидкостью шарообразных микрокапсул, который позволяет учитывать геометрические размеры включений в оболочке, а также состав и объемную концентрацию компонентов неоднородного материала.

Рассматриваемый метод опирается на разработанный в работе [9] подход к моделированию предельных прочностных характеристик матричных композитов при их хрупком разрушении, основанный на использовании оператора концентрации напряжений (тензора четвертого ранга) $K^\sigma(\mathbf{r})$. Этот оператор связывает локальные значения тензора напряжений $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ с внешними (средними) по материалу напряжениями $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ (\mathbf{r} – радиус-вектор случайной точки неоднородной среды) [10]:

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

Суть разработанного в работе [9] подхода состоит в следующем. В матричных композитах фундаментальную роль играет матрица, так как она перераспределяет механические напряжения между всеми элементами неоднородности материала и делает его монолитным. Разрушение матрицы приводит к потере композитом сплошности и, как следствие, к выходу из строя изделий из рассматриваемых материалов. Поэтому, согласно работе [9], считается, что приложенная к композиту нагрузка (например сжатие в определенном направлении) 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 известным значением предела прочности матрицы. Значение предела прочности матрицы должно соответствовать внешней нагрузке (например сжатию, совершаемому в том же направлении, что и для рассматриваемого композита), приложенной к однородному телу, состоящему только из материала матрицы.

С помощью оператора концентрации напряжений $K^\sigma(\mathbf{r})$ (1) можно судить о виде и величине напряжения $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$, возникающего внутри элемента неоднородности любого типа в композите, зная характер внешнего воздействия $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$. В настоя-

щей работе вычисление всех тензорных величин, используемых для решения поставленной задачи, основывается на ОСП [3]. Тогда выражение для оператора $K^\sigma(\mathbf{r})$ в ОСП имеет следующий вид (индексы опущены) [10]:

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

где I – единичный тензор четвертого ранга; $c(\mathbf{r})$ – тензор модулей упругости; двумя штрихами обозначена разность между соответствующими параметрами неоднородной среды и однородного тела сравнения, характеристики которого обозначаются далее верхним индексом «с»: $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^c$; $g(\mathbf{r})$ – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия, являющийся тензором четвертого ранга. Для вычисления компонент g_{ijkl} тензора $g(\mathbf{r})$ необходимо вначале осуществить расчеты компонент a_{ijkl} тензора четвертого ранга A , а затем в a_{ijkl} по двум парам индексов (i, j и k, l) провести операцию симметризации [3]. Компоненты a_{ijkl} тензора A вычисляются с помощью следующего соотношения:

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

где $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ – элемент телесного угла в сферической системе координат, t_{il}^{-1} – элементы матрицы, обратной матрице T с элементами $t_{il} = c_{ijkl}^c n_k n_j$, а n_k и n_j ($k, j = 1, 2, 3$) – компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения. Для эллипсоидальных включений с главными полуосями l_1, l_2 и l_3 компоненты вектора нормали определяются соотношениями $n_1 = l_1^{-1} \sin\theta \cos\varphi$, $n_2 = l_2^{-1} \sin\theta \sin\varphi$, $n_3 = l_3^{-1} \cos\theta$.

В случае выполнения условия эргодичности можно использовать усреднение по объему (для каждого компонента композита). Тогда операция усреднения по всему объему материала для некоторой случайной величины $a(\mathbf{r})$ сводится к суммированию:

$$\langle a(\mathbf{r}) \rangle = \sum_s v_s \langle a_s(\mathbf{r}) \rangle, \quad (4)$$

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]. Следовательно,

для матричного композита с изотропными включениями соотношение (2) для оператора concentra-

ции напряжений в компоненте композита s -го типа с учетом (4) имеет следующий вид:

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

где c_s – тензор модулей упругости s -го компонента композита; g_s – тензор $g(\mathbf{r})$, соответствующий s -му компоненту композита, вычисляемый с помощью соотношения (3) и последующей процедуры симметризации.

Далее перейдем к подробному описанию метода прогнозирования предельных значений прочностных показателей (при одноосном сжатии) многокомпонентных матричных композитов со сферическими включениями в виде микрокапсул, заполненных жидкостью. Метод состоит из двух этапов.

На первом этапе осуществляется вычисление эффективных упругих свойств двухкомпонентного композита, имитирующего сферические микрокапсулы, заполненные жидкостью. Эффективные упругие свойства 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 неоднородном материале:

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

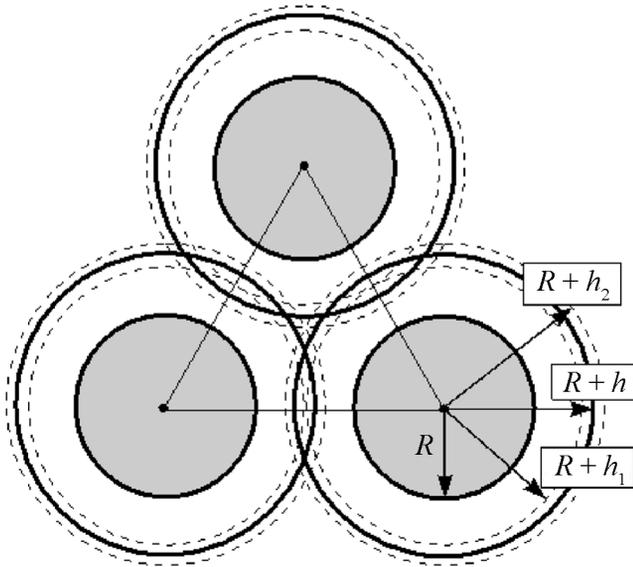


Рис. 1. Модель первого этапа метода прогнозирования предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) композитов.

Fig. 1. Model of the first stage of the method for predicting ultimate strength parameters (under uniaxial compression) of composites.

Выражение для c^* в ОСП имеет следующий вид (индексы опущены) [3]:

$$c^* = \langle c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle \langle (I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}. \quad (6)$$

В предположении, что компоненты композита изотропны, соотношение (6) с учетом (4) имеет следующий вид:

$$c^* = \left(\sum_s v_s c_s \left(I - g_s(c_s - c^c) \right)^{-1} \right) \times \left(\sum_s v_s \left(I - g_s(c_s - c^c) \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (7)$$

В формулах (6) и (7) тензоры имеют тот же смысл, что и соотношениях (2) и (5) для оператора $K^\sigma(\mathbf{r})$.

На втором этапе вначале осуществляется расчет по формуле (5) оператора $K^\sigma(\mathbf{r})$ для многокомпонентного матричного композита, включениями которого служат сферические микрокапсулы с эффективными модулями упругости, вычисленными на первом этапе, и функционализирующие добавки других материалов. А затем, используя вычисленное значение оператора $K^\sigma(\mathbf{r})$, с помощью разработанного в работе [9] подхода, описанного выше, осуществляется численное моделирование предельных прочностных характеристик указанного композита.

Опишем теперь подробнее первый этап метода прогнозирования пределов прочности матричных композитов со сферическими включениями в виде микрокапсул, заполненных жидкостью. Выполнение этого этапа позволяет учитывать геометрические размеры включений в оболочке. С этой целью рассмотрим двухкомпонентный матричный композит (материалом матрицы служит материал оболочек микрокапсул), в котором случайным образом расположены включения жидкого вещества, имеющие сферическую форму среднего радиуса R . Положим, что материал является статистически однородным. Это приводит к наличию среднего расстояния между включениями, которое связано с их объемной концентрацией. Для установления данной связи рассмотрим некоторый усредненный элементарный объем, в котором находятся три одинаковых включения (рис. 1). Пусть отдельное включение представляет собой шар радиусом $R + h_1$, где величина h_1 такова, что все три шара касаются друг друга. Тогда расстояние между центрами шаров равно $2(R + h_1)$. Поскольку в пространстве между касающимися друг друга шарами образу-

ются пустоты, за характерную толщину h оболочек микрокапсул следует выбрать величину, несколько большую, чем h_1 . Положим, $h = 0,5(h_1 + h_2)$, где значение h_2 соответствует случаю, когда все три шара радиусом $R + h_2$ проходят через центр равностороннего треугольника со стороной $2(R + h_1)$ (рис. 1).

Теперь можно ввести безразмерный параметр микроструктуры h/R и установить его связь с объемной долей «внутреннего» жидкого тела v_T (или объемной долей оболочки $v_{об}$). Для этого следует рассмотреть систему уравнений, связывающих объемные доли и геометрические размеры компонентов:

$$v_T + v_{об} = 1, \\ \frac{v_{об}}{v_T} = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^3 - 1.$$

Отсюда объемные доли v_T и $v_{об}$ можно выразить через характерный размер h/R следующим образом:

$$v_T = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-3}, \quad v_{об} = 1 - \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-3}. \quad (8)$$

Следовательно, опираясь на соотношения (8), вычисления по формуле (7) тензора c^* на первом этапе метода можно проводить при всех возможных значениях параметра микроструктуры h/R .

ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Для проведения численного моделирования в работе был рассмотрен трехкомпонентный композит, изотропной матрицей которого служит фенилон марки С2 (модуль Юнга 2,82 ГПа, коэффициент Пуассона 0,21, разрушающее напряжение при сжатии $\sigma_p = 225,9$ МПа) [11]. Фенилоновый образец наполнен сферическими микрокапсулами, средний размер которых может варьироваться от 120 до 250 мкм. Капсулируемое вещество – глицерин, объемный модуль которого равен 4,4 ГПа [12]. Оболочки капсул – изотропный ароматический полиимид каптон марки DuPont Kapton®HN (модуль Юнга 2,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,34) [13]. Средняя толщина оболочки может варьироваться от 25 до 50 мкм. С целью упрочнения композита в фенилоновую матрицу вносятся также изотропные дисперсные включения БЩС (модуль Юнга 76,2 ГПа, коэффициент Пуассона 0,22) [12]. Тогда, учитывая указанные геометрические размеры микрокапсул, возможные значения безразмерного параметра структуры h/R могут изменяться в пределах от 0,2 до 0,85.

При операциях над тензорами использовали матричную форму записи [3]. При этом ненулевые элементы c_{ij} ($i, j = 1, \dots, 6$) симметрической матрицы тензора c модулей упругости для изотропного материала выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν следующим образом:

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

Важнейшим моментом ОСП является использование однородного тела сравнения, материальные константы которого входят в окончательные выражения для вычисления упругих характеристик неоднородного материала. Одним из широко применяемых подходов для вычисления параметров тела сравнения служит метод самосогласования [3; 14]. На первом этапе прогнозирования этот метод использовался при проведении расчетов по формуле (7) тензора эффективных упругих свойств c^* микрокапсул. Для получения упругих характеристик c^c тела сравнения при каждом фиксированном значении h/R ($0,2 \leq h/R \leq 0,85$) организовывалась итерационная процедура, в которой для параметров c^c брались значения тензора эффективных модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве нулевого приближения для параметров тела сравнения выбирались характеристики в приближении Фойгта $c_{\text{Voight}} = v_T c_T + v_{об} c_{об}$, где v_T и $v_{об}$ определялись по формулам (8), c_T и $c_{об}$ – тензоры модулей упругости соответственно «внутреннего» жидкого тела и оболочки микрокапсул [3]. Такой подход позволил проводить вычисления в двухкомпонентных композитах, имитирующих сферические микрокапсулы, «внутреннее» тело которых является жидкостью с объемным модулем, отличным от нуля, а модуль сдвига равен нулю. Во время проведения итерационной процедуры считалось, что включения жидкого вещества (глицерин) имеют средний радиус $R = 1$. Кроме того, при вычислении по соотношению (3) компонент тензора $g(\mathbf{r})$ полагалось, что $l_1 = l_2 = l_3 = R = 1$ для глицерина и $l_1 = l_2 = l_3 = h/2$ для оболочек микрокапсул (каптон). Выход из итерационной процедуры осуществлялся, когда максимальная разница между модулями c^c составляла менее 0,01.

На втором этапе метода прогнозирования по соотношению (5) проводились численные модельные расчеты тензора $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ в трехкомпонентном трибокомposite на основе фенилоновой матрицы, со сферическими микрокапсулами (эффективные модули упругости которых при $0,2 \leq h/R \leq 0,85$ были вычислены на первом этапе) и дисперсными включениями БЩС. Для вычисления параметров тела сравнения, как и на первом этапе, применялся метод самосогласования [3; 14]. С этой целью при каждом значении параметра h/R и объемных концентраций компонентов трибокомposite организовывалась итерационная процедура, в которой для параметров c^c тела сравнения выбирались значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения брались упругие характеристики в приближении Хилла, то есть среднего арифметического значений, полученных в приближениях Ройса

$$c_{\text{Reuss}} = \left[\sum_s v_s (c_s)^{-1} \right]^{-1} \text{ и Фойгта } c_{\text{Voight}} = \sum_s v_s c_s$$

[3]. При вычислении по соотношению (3) компонент тензора $g(\mathbf{r})$ полагалось, что $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ для всех элементов неоднородности модельного три-

бокомposite. Выход из итерационной процедуры осуществлялся, когда максимальная разница между модулями c^c составляла менее 0,01.

В конце второго этапа (после вычисления тензора $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ в фенилоновой матрице) выполнялись модельные расчеты предела прочности трибокомposite с помощью подхода, разработанного в работе [9]. При этом использовали данные о разрушающем напряжении при сжатии $\sigma_p = 225,9$ МПа для фенилона [11]. Внешнее сжимающее воздействие $\langle \sigma \rangle$ (МПа), направленное параллельно оси z лабораторной системы координат, задавали в виде (3×3) -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 трибокомposite (при фиксированных значениях параметра h/R и объемного содержания элементов неоднородности) по формуле (5) вычисляли оператор $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ (в фенилоновой матрице). Затем, опираясь на определение (1) оператора концентрации напряжений, вычисляли элементы σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) матрицы тензора напряжений для фенилона. После этого сравнивали вычисленное значение σ_{33} с σ_p (для фенилона). Если $\sigma_{33} < \sigma_p$, то значение B увеличивали на 1 МПа и вычисление элементов σ_{ij} матрицы тензора напряжений для фенилона повторяли заново. Вычислительную процедуру останавливали сразу, как только выполнялось условие $\sigma_{33} \geq \sigma_p$, а последнее значение B принимали в качестве предела прочности $\sigma_{\text{сж}}$ трибокомposite при одноосном сжатии. Затем фиксировали новые значения параметра h/R и объемного содержания элементов неоднородности модельного трибокомposite, и вычисления $\sigma_{\text{сж}}$ повторяли заново.

Результаты расчетов предельных значений прочностных показателей (при одноосном сжатии) модельных трибокомposite представлены на рисунках 2–4 ($V_{\text{капс}}$ и $V_{\text{БЩС}}$ – процентные объемные содержания микрокапсул и включений БЩС соответственно).

Графики, представленные на рисунке 2, описывают зависимости значений пределов прочности (при сжатии) от изменения параметра структуры h/R и фиксированных объемных процентных содержаниях наполнителей трибокомposite.

На рисунках 3 и 4 показаны результаты численного моделирования значений разрушающего напряжения (при осевом сжатии) для рассматри-

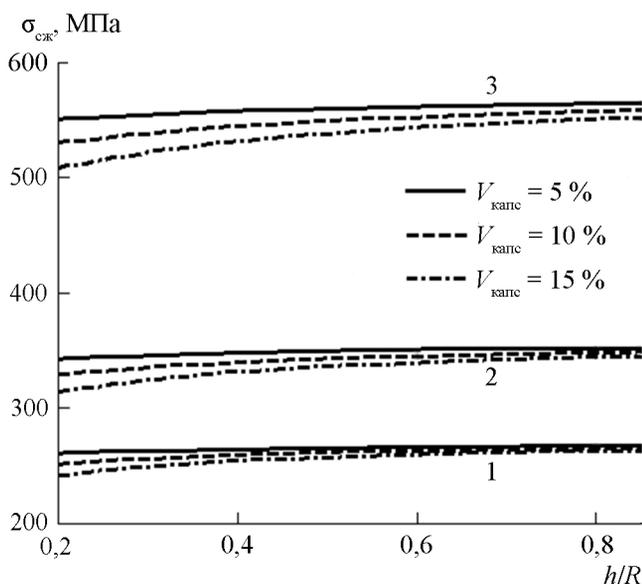


Рис. 2. Зависимости предельных прочностных показателей трибокомposite (при одноосном сжатии) от изменения параметра структуры h/R : 1 – $V_{\text{БЩС}} = 15\%$; 2 – $V_{\text{БЩС}} = 30\%$; 3 – $V_{\text{БЩС}} = 45\%$.

Fig. 2. Dependences of the limiting strength parameters of tribocomposites (under uniaxial compression) on the change in the structure parameter h/R : 1 – $V_{\text{E-glass}} = 15\%$; 2 – $V_{\text{E-glass}} = 30\%$; 3 – $V_{\text{E-glass}} = 45\%$.

ваемых трибокомпозитов от изменений объемных процентных содержаний его компонентов при различных фиксированных характерных размерах h/R микрокапсул.

Результаты численного моделирования показали следующее:

- увеличение параметра структуры h/R приводит к незначительному улучшению предельных прочностных показателей (при сжатии) трибокомпозитов, причем тенденция к более значительному усилению $\sigma_{сж}$ проявляется отчетливее при больших концентрациях микрокапсул;

- вариация процентного содержания включений БЩС приводит к существенному изменению значений $\sigma_{сж}$, при этом увеличение $V_{БЩС}$ приводит к росту $\sigma_{сж}$;

- вариация процентного содержания микрокапсул мало влияет на изменение значений $\sigma_{сж}$, при этом увеличение $V_{капс}$ приводит к уменьшению $\sigma_{сж}$, особенно при $h/R < 0,5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод прогнозирования предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) многокомпонентных матричных композитов, содержащих включения в виде заполненных жидкостью шарообразных микрокапсул.

Метод позволяет учитывать характерные относительные геометрические размеры микрокапсул (с помощью введения безразмерного параметра структуры h/R), а также концентрацию микрокапсул и включений других материалов (функционализирующих добавок).

С помощью разработанного метода проведено численное моделирование предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) трехкомпонентного трибокомпозита на основе фенилона со сферическими микрокапсулами (капсулируемое вещество – глицерин, оболочка – каптон) и армирующими дисперсными включениями БЩС. Получены зависимости пределов прочности при сжатии от изменения параметра структуры микрокапсул и объемных концентраций элементов неоднородности трибокомпозита.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 16-08-00262-а, 17-08-01374-а, в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН (№ госрег. проекта ААА-А-А16-116012610052-3).

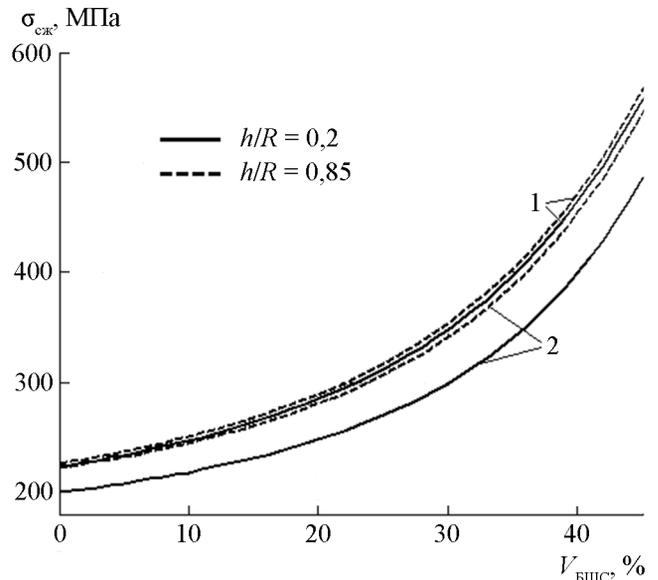


Рис. 3. Зависимости предельных прочностных показателей трибокомпозитов (при одноосном сжатии) от изменения процентного объемного содержания БЩС: 1 – $V_{капс} = 3\%$; 2 – $V_{капс} = 20\%$.

Fig. 3. Dependences of the ultimate tensile strengths of tribocomposites (under uniaxial compression) on the change in the percentage volume content of E-glass: 1 – $V_{caps} = 3\%$; 2 – $V_{caps} = 20\%$.

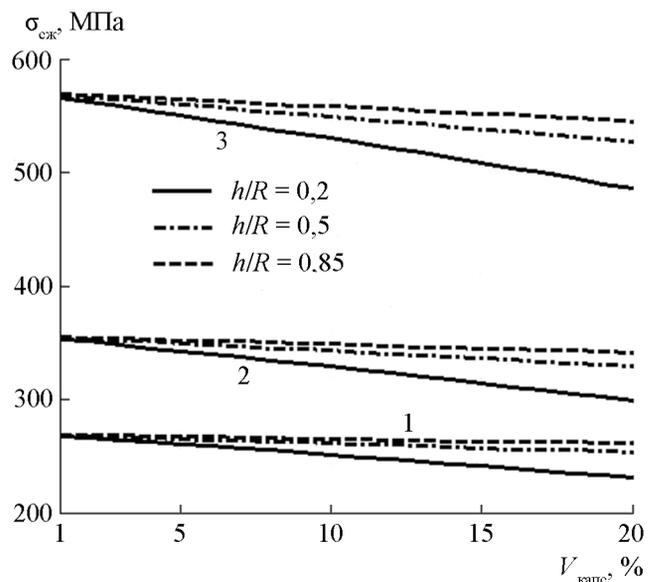


Рис. 4. Зависимости предельных прочностных показателей трибокомпозитов (при одноосном сжатии) от изменения процентного объемного содержания микрокапсул: 1 – $V_{БЩС} = 15\%$; 2 – $V_{БЩС} = 30\%$; 3 – $V_{БЩС} = 45\%$.

Fig. 4. Dependence of the limiting strength parameters of tribocomposites (under uniaxial compression) on the change in the percentage volume content of microcapsules: 1 – $V_{E-glass} = 15\%$; 2 – $V_{E-glass} = 30\%$; 3 – $V_{E-glass} = 45\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солодовник В.Д. 1980. *Микрокапсулирование*. М., Химия: 216 с.
2. Лопанов А.Н., Тихомирова К.В. 2015. *Физико-химические аспекты инженерии капсулирования*. Белгород, изд-во Белгородского государственного технического университета: 294 с.
3. Шермергор Т.Д. 1977. *Теория упругости микронеоднородных сред*. М., Наука: 399 с.
4. Christensen R.M. 1990. A critical evaluation for a class of micro-mechanics models. *J. Mech. Phys. Solids*. 38(3): 379–404. doi: 10.1016/0022-5096(90)90005-0
5. Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П. 2015. Моделирование эксплуатационных упругих свойств полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 10: 43–47.
6. Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П. 2016. Концентрация напряжений и деформаций в полимерных композитах с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла. *Вестник РГУПС*. 1: 8–13.
7. Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П. 2016. Моделирование предельных значений прочностных показателей полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла. *Вестник РГУПС*. 3: 8–13.
8. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Колесников И.В., Мясников Ф.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б. 2017. Прогнозирование эксплуатационных упругих свойств трибокомпозитов с микрокапсулами, заполненными жидкой смазкой. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 18(9): 398–403.
9. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Кириллов Д.А., Сорокин А.И. 2014. О методе прогнозирования предельных прочностных характеристик матричных композитов, основанном на использовании оператора концентрации напряжений. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 1: 45–51.
10. Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Сычев А.П. 2015. О прогнозировании распределений локальных упругих полей в неоднородных средах на основе обобщенного сингулярного приближения. *Вестник Южного научного центра*. 11(3): 11–17.
11. Буря А.И., Шерстюк А.И., Иващенко В.Н. 2009. Влияние содержания ультрадисперсных алмазов на свойства композитов на основе ароматического полиамида. В кн.: *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. Вып. 12*. Киев, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины: 336–341.
12. *Физические величины: справочник*. 1991. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., Энергоатомиздат: 1232 с.
13. Dupont kapton summary of properties. URL: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf> (дата обращения: 12.12.2017).
14. Паньков А.А. 2008. *Методы самосогласования механики композитов*. Пермь, изд-во Пермского государственного технического университета: 253 с.

REFERENCES

1. Solodovnik V.D. 1980. *Mikrokapsulirovanie*. [Microencapsulation]. Moscow, Khimiya: 216 p. (In Russian).
2. Lopanov A.N., Tikhomirova K.V. 2015. *Fiziko-khimicheskie aspekty inzhenerii kapsulirovaniya*. [Physicochemical aspects of encapsulation engineering]. Belgorod, Belgorod State Technical University Publishers: 294 p. (In Russian).
3. Shermergor T.D. 1977. *Teoriya uprugosti mikhronednorodnykh sred*. [Micromechanics of inhomogeneous media]. Moscow, Nauka: 399 p. (In Russian).
4. Christensen R.M. 1990. A critical evaluation of a class of micro-mechanics models. *J. Mech. Phys. Solids*. 38(3): 379–404. doi: 10.1016/0022-5096(90)90005-0
5. Bardushkin V.V., Sorokin A.I., Sychev A.P. 2015. [Modeling of performance elastic properties of polymer-based composites with lubricated spherical microcapsules and disperse inclusions of E-glass]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*. 10: 43–47. (In Russian).
6. Bardushkin V.V., Sorokin A.I., Sychev A.P. 2016. [Stress and strain concentration in the polymer-based composites with lubricated spherical microcapsules and disperse inclusions of E-glass]. *Vestnik RGUPS*. 1: 8–13. (In Russian).
7. Bardushkin V.V., Sorokin A.I., Sychev A.P. 2016. [Modeling the limiting strength of the polymer-based composites with spherical microcapsules filled with lubricate and disperse inclusions of E-glass]. *Vestnik RGUPS*. 3: 8–13. (In Russian).
8. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Kolesnikov I.V., Myasnikov F.V., Sychev A.P., Yakovlev V.B. 2017. [Forecasting the operational elastic properties of tribocomposites with microcapsules filled with liquid lubricant]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii*. 18(9): 398–403. (In Russian).
9. 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).
10. Kolesnikov V.I., Yakovlev V.B., Bardushkin V.V., Sychev A.P. 2015. [On the prediction of local elastic fields' distributions in non-uniform media on the basis of a generalized singular approximation]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 11(3): 11–17. (In Russian).
11. Burya A.I., Sherstyuk A.I., Ivashchenko V.N. 2009. [Influence of the content of ultradispersed diamonds on the properties of composites based on aromatic polyamide]. In: *Porodorazrushayushchiy i metalloobrabatyvayushchiy instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya: Sbornik nauchnykh трудов. Вып. 12*. [Rock-destructive and metalworking tool - technique and technology of its fabrication and application: Collection of scientific papers. Vol. 12]. Kiev, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of the Ukraine: 336–341. (In Russian).

12. *Fizicheskie velichiny: spravochnik. [Physical quantities: a handbook]*. 1991. I.S. Grigor'ev, E.Z. Meilikhov (eds). Moscow, Energoatomizdat: 1232 p. (In Russian).
13. *Dupont kapton summary of properties*. Available at: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf> (accessed 12 December 2017).
14. Pan'kov A.A. 2008. *Metody samosoglasovaniya mekhaniki kompozitov. [Methods of self-consistency mechanics of composites]*. Perm, Perm State Technical University Publishers: 253 p. (In Russian).

Поступила 13.03.2018