

МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI: 10.31429/vestnik-18-2-19-25

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ УПРУГИХ И ПРЕДЕЛЬНЫХ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕНОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Колесников В. И., Бардушкин В. В., Сычев А. П., Сычев А. А., Бардушкин А. В.

MODELING OF THE LOCAL ELASTIC AND LIMITING STRENGTH CHARACTERISTICS OF FOAM-POLYMER MATERIALS

V. I. Kolesnikov¹, V. V. Bardushkin², A. P. Sychev^{1,3}, A. A. Sychev¹, A. V. Bardushkin^{2,4}¹ Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia² National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia³ Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia⁴ AlphaCHIP LLC, Zelenograd, Moscow, Russia

e-mail: alekc_sap@mail.ru

Abstract. In this work, a model for predicting local elastic characteristics (components of the stress concentration operator) and ultimate strength indicators for uniaxial compression of foam-polymer materials is constructed, taking into account the volumetric content of air-filled spherical pores. Epoxy binders ED-16 and ED-22, hardened with “Т” grade aromatic polyamine, were considered as a matrix. To calculate the local elastic characteristics of foam-epoxy materials, the generalized singular approximation of the random fields theory in a version of the iterative self-consistency method was used. In this case, the values of the elastic modulus tensor obtained at the previous iteration step were taken as the parameters of the homogeneous comparison body. The elastic characteristics in the Voight approximation were used as the initial values of the parameters of the reference body, since this approximation does not require inversion of the singular matrix of the tensor of elastic moduli for such a component of foam-epoxy materials as pores filled with air. Based on the developed model, in this work a numerical simulation of the values of the components of the stress concentration operator of foam-epoxy materials depending on the volumetric content of pores is carried out.

When modeling the values of the ultimate strength of foam-epoxy materials, a method developed by the authors for predicting the ultimate strength characteristics of matrix composites was used, based on the concept of the stress concentration operator and information on the strength properties of the polymer matrix. According to this method, a compressive load applied to a composite material in a certain direction becomes destructive when the internal stress in the polymer matrix begins to exceed its ultimate strength. For the mentioned above foam-epoxy materials based on ED-16 and ED-22, a numerical simulation of their ultimate strength parameters under uniaxial compression was carried out. Model calculations considered changes in the volumetric content of pores in the material. It is numerically confirmed that an increase in porosity leads to a weakening of the strength indicators of model foam-epoxy materials, which in this case change according to a law close to linear.

Keywords: modeling, stress concentration operator, local elastic characteristics, mechanical strength, foam-polymer material, foam-epoxy material, pores, epoxy binder.

Колесников Владимир Иванович, д-р техн. наук, академик РАН, заведующий кафедрой «Теоретическая механика», президент Ростовского государственного университета путей сообщения; e-mail: kvi@rgups.ru

Бардушкин Владимир Валентинович, д-р физ.-мат. наук, профессор Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ»; e-mail: bardushkin@mail.ru.

Сычев Александр Павлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» Ростовского государственного университета путей сообщения, заведующий лабораторией «Транспорт, композиционные материалы и конструкции» Федерального исследовательского центра Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: alekc_sap@mail.ru.

Сычев Алексей Александрович, канд. техн. наук, ведущий инженер кафедры «Теоретическая механика» Ростовского государственного университета путей сообщения; e-mail: alexsis1983@gmail.com.

Бардушкин Андрей Владимирович, инженер-электроник Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ», инженер ООО «Альфачип» (Зеленоград); e-mail: i170k@yandex.ru.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (20-08-00155-а).

Введение

Пористые и ячеистые материалы находят широкое применение в таких отраслях промышленного производства как авиа- и судостроение, транспорт, радиоэлектроника и др. Эти отрасли требуют создания эластичных и жестких материалов, обладающих низким объемным весом, стойкостью к действию влаги и агрессивных сред, значительной прочностью, плавучестью, высокими электро-, тепло- и звукоизоляционными свойствами. При этом с точки зрения эксплуатационных характеристик одними из наиболее перспективных пористых материалов являются пенопласты, в частности, пенополиэпоксиды, т.к. они обладают высокими упругопрочностными и диэлектрическими показателями, низким водопоглощением (менее 1÷3 % по массе), устойчивы к действию высоких температур. В Российской Федерации для получения пенополиэпоксидов обычно используются эпоксидно-диановые олигомеры ЭД-16, ЭД-20, ЭД-22, Э-41, ЭДП [1–5].

Экспериментальные методы разработки и создания пеноматериалов со стабильными свойствами являются довольно дорогостоящими. Поэтому при решении проблемы подбора состава и оптимизации содержания компонентов пенополимерных материалов все большее значение приобретают теоретические подходы к прогнозированию напряженно-деформированного состояния, теплопроводящих, диэлектрических и других физико-механических характеристик пористых сред. Помимо эксплуатационных (эффективных) характеристик пенополимеров [6–8] большое значение имеют их локальные (внутренние) физико-механические, в частности упругие, характеристики, определяемые тензорами (операторами) концентрации физических полей [9, 10]. Так, например, знание значений компонент операторов концентрации напряжений и деформаций позволяет прогнозировать перераспределение упругих полей между элементами неоднородности в материале при приложении к нему внешнего механического воздействия. Кроме того, с помощью оператора концентрации напряжений возможно также прогнозирование предельных разрушающих характеристик неоднородных сред [11, 12].

Целью работы является построение модели и проведение численных расчетов значений локальных упругих характеристик (ком-

понент оператора концентрации напряжений) и предельных прочностных показателей (при сжатии) пеноэпоксидов с заполненными воздухом порами, форма которых близка к сферической.

Необходимо отметить, что численное моделирование эффективных, локальных упругих характеристик и предельных прочностных показателей материалов с порами, заполненными жидкостью или газом, затруднено по причине вырожденности матрицы тензора модулей упругости для флюида, являющегося наполнителем пор [6–8, 10, 12–15]. Для преодоления возникающих по этой причине вычислительных проблем в работах [6–8, 10, 12, 14, 15] для прогнозирования упругих свойств пористозаполненных сред использовалось обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей (ОСП) [16] в варианте метода самосогласования [16, 17]. Аналогичный подход используется и в настоящей работе при моделировании локальных упругих и предельных прочностных характеристик пенополимерных материалов.

1. Построение модели

В основе решения задачи моделирования локальных (внутренних) упругих характеристик пенополимерных материалов лежат численные расчеты и анализ значений компонент $K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r})$ тензора (оператора) концентрации напряжений $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ [9]. Оператор $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ связывает напряжения $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ внутри каждого из элементов неоднородности со средним (внешним) напряжением $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$, приложенным ко всему материалу

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle, \quad (1.1)$$

$$i, j, k, l = 1, 2, 3,$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор произвольной (случайной) точки в неоднородной среде. Угловые скобки в (1.1) и далее по тексту определяют процедуру статистического усреднения по объему [16]. Для неоднородного материала с изотропными компонентами операция усреднения по объему для некоторой случайной величины \mathbf{b} сводится к суммированию

$$\langle \mathbf{b} \rangle = \sum_s v_s \mathbf{b}_s, \quad (1.2)$$

где v_s — объемное содержание изотропного компонента s -го типа, при этом $\sum_s v_s = 1$,

а \mathbf{b}_s — соответствующая этому компоненту случайная величина [16].

Моделирование разрушающих характеристик пеноэпоксидных материалов основывается на разработанном в статье [11] методе прогнозирования предельных прочностных показателей матричных композитов при сжатии, опирающемся на понятие оператора концентрации напряжений $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ (1.1). 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 ее разрушение приводит к потере композитом монолитности и, как следствие, выходу из строя изделий из подобных материалов. Кроме того, сведения о пределах прочности полимерных материалов широко представлены в научно-технической литературе [18, 19].

В силу структуры рассматриваемых в работе пеноэпоксидов численное моделирование их предельных прочностных характеристик проводится для сжимающей нагрузки, направленной только вдоль оси z системы координат. Рассматривается хрупкое разрушение пеноэпоксидных материалов. Моделирование опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей (ОСП). Соотношение для вычисления оператора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ в ОСП имеет следующий вид [9]:

$$\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \times \langle \mathbf{c}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}. \quad (1.3)$$

В формуле (1.3) $\mathbf{c}(\mathbf{r})$ — тензор модулей упругости элемента неоднородности; $\mathbf{c}''(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r}) - \mathbf{c}^c$, где \mathbf{c}^c — тензор модулей упругости однородного тела сравнения (вспомогательный тензор, определяемый из теории [16]); \mathbf{I} — единичный тензор четвертого

ранга; $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ — тензор четвертого ранга с компонентами [16]

$$g_{ijkl} = a_i(kl)(j). \quad (1.4)$$

В формуле (1.4) круглые скобки в индексах компонент a_{ijkl} тензора четвертого ранга \mathbf{A} (в скобки заключены пары индексов i, j и k, l) обозначают выполнение процедуры симметризации [16]. 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 φ и θ — углы сферической системы координат, t_{il}^{-1} — условное обозначение для элементов матрицы, обратной к матрице \mathbf{T} с элементами $t_{il} = c_{iklj}^e n_k n_j$, где n_k и n_j ($k, j = 1, 2, 3$) — компоненты вектора внешней нормали к поверхности эллипсоида дальнего включения с полуосями l_1, l_2 и l_3 , определяемые как $n_1 = l_1^{-1} \sin \theta \cos \varphi$, $n_2 = l_2^{-1} \sin \theta \sin \varphi$, $n_3 = l_3^{-1} \cos \theta$.

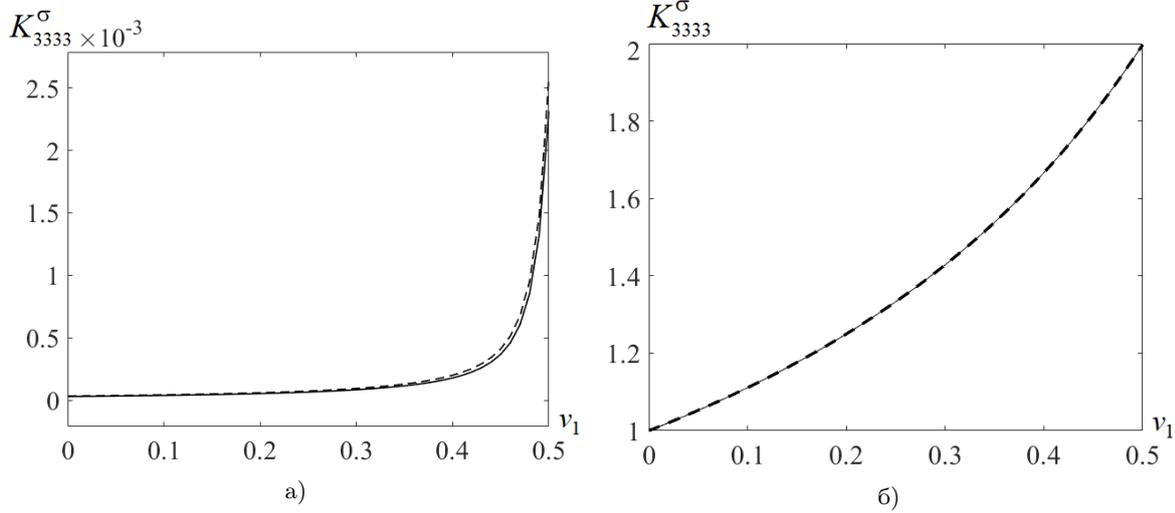
2. Проведение модельных расчетов

Для проведения численных модельных расчетов в работе рассматривались пеноэпоксиды с наполненными воздухом порами сферической формы (компонент 1-го типа). Объемный модуль воздуха полагался равным $1,21 \cdot 10^{-4}$ ГПа, сдвиговый модуль — 0 ГПа [18]. Известно, что локальные упругие характеристики и прочность на сжатие отвержденных эпоксилов существенно зависят от типа отвердителя. В качестве матрицы пеноэпоксидов (компонент 2-го типа) в работе рассматривались диановые смолы ЭД-22 и ЭД-16, отвержденные ароматическим полиамином марки «Т». Подобные составы полимеров представляют особый интерес, т.к. их использование позволяет получать высокопрочные и теплостойкие пеноэпоксиды. Физико-механические свойства (при сжатии) рассматриваемых эпоксилов смол приведены в табл. 1 [19].

Для рассматриваемых в работе пенополимерных материалов соотношение (1.3) для матрицы тензора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ в элементе неоднородности s -го типа ($s = 1, 2$), с учетом формулы

Таблица 1. Физико-механические свойства (при сжатии) полимеров на основе эпоксидных диановых смол и полиамина марки «Т»

Состав полимеров	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Разрушающее напряжение σ_p , МПа
ЭД-22 + полиамин «Т»	3,8	0,39	200
ЭД-16 + полиамин «Т»	3,4	0,38	190

Рис. 1. Зависимости значений компоненты тензора концентрации напряжений K_{3333}^{σ} в порах (а) и в полимерной матрице (б) модельных пеноэпоксидов от пористости v_1

(1.2), преобразуется к следующему виду [9]:

$$\mathbf{K}_s^{\sigma} = \mathbf{c}_s (\mathbf{I} - \mathbf{g}_s(\mathbf{c}_s - \mathbf{c}^c))^{-1} \times \\ \times \left(v_1 \mathbf{c}_1 (\mathbf{I} - \mathbf{g}_1(\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}^c))^{-1} + \right. \\ \left. + v_2 \mathbf{c}_2 (\mathbf{I} - \mathbf{g}_2(\mathbf{c}_2 - \mathbf{c}^c))^{-1} \right)^{-1}. \quad (2.1)$$

Здесь \mathbf{c}_s — тензор модулей упругости компонента s -го типа; \mathbf{g}_s — тензор $\mathbf{g}(\mathbf{r})$, соответствующий компоненту пеноэпоксидов s -го типа, вычисляемый с помощью соотношения (1.4).

При проведении моделирования полагалось, что все элементы неоднородности — поры и полимерная матрица — имеют сферическую форму радиусом R , где $R = l_1 = l_2 = l_3 = 1$. Значения компонент тензора концентрации напряжений $\mathbf{K}^{\sigma}(\mathbf{r})$ модельных пеноматериалов вычислялись по формуле (2.1) в приближении самосогласования [16,17]. С этой целью, как и в [7,8], была организована итерационная процедура, в которой в качестве параметров \mathbf{c}^c тела сравнения брались 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 Фойгта $\mathbf{c}_{\text{Voight}} = \sum_s v_s \mathbf{c}_s$ [16].

Выбор нулевого приближения Фойгта был обусловлен тем, что при данном подходе не требуется обращение вырожденной матрицы тензора модулей упругости для такого компонента пеноматериала как поры, наполненные воздухом. Выход из итерационной процедуры происходил, когда максимальная разница между соответствующими элементами матрицы тензора \mathbf{c}^c составляла менее 0,01 ГПа.

На рис. 1 приведены результаты модельных расчетов только значений компоненты K_{3333}^{σ} тензора концентрации напряжений $\mathbf{K}^{\sigma}(\mathbf{r})$ от пористости v_1 пеноэпоксидов на основе ЭД-22 (сплошная линия на графиках) и ЭД-16 (пунктирная линия). Это обусловлено тем, что именно компонента 3333 определяет связь между приложенным к неоднородному материалу внешним сжимающим воздействием в направлении 33 (т.е. вдоль вертикальной оси z) и внутренним «откликом» в этом же

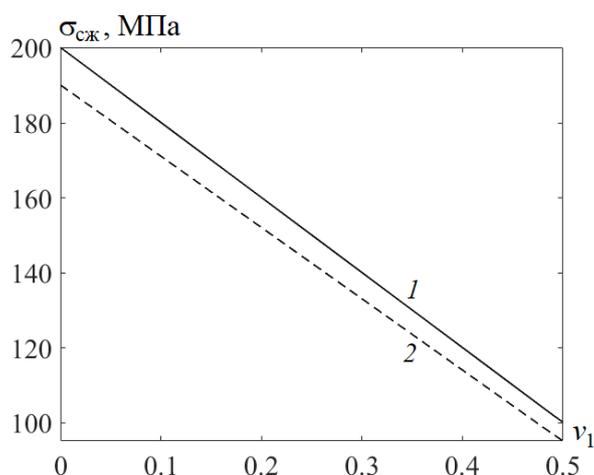


Рис. 2. Зависимости значений прочностных показателей (при одноосном сжатии) модельных пеноэпоксидов от пористости v_1 : 1 — ЭД-22 + полиамин «Т», 2 — ЭД-16 + полиамин «Т»

направлении 33. А значит, компонента K_{3333}^σ является наиболее важной при дальнейших расчетах значений предельных сжимающих характеристик пеноэпоксидов.

Модельные расчеты пределов прочности рассматриваемых пеноэпоксидов проводились, как указывалось выше, с помощью метода, разработанного в статье [11]. Внешнее сжимающее воздействие $\langle \sigma \rangle$ (МПа), направленное вдоль оси z , задавалось в виде матрицы размерностью 3×3 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 пеноэпоксида (при фиксированном значении объемного содержания пор v_1) по формуле (2.1) вычислялся оператор \mathbf{K}_2^σ (в эпоксидной матрице). Затем, опираясь на определение (1.1) тензора концентрации напряжений, вычислялись элементы σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) тензора напряжений для эпоксидного полимера. После этого вычисленное значение σ_{33} сравнивалось с σ_p (для эпоксидного полимера). Если $\sigma_{33} < \sigma_p$, то значение B увеличивалось на 0,1 МПа и вычисление элементов σ_{ij} тензора напряжений для эпоксидного полимера повторялось заново. Вычислительная процедура останавливалась сразу, как только выполнялось условие $\sigma_{33} \geq \sigma_p$, а последнее значение B принималось в качестве предела прочности $\sigma_{сж}$ пеноэпоксида при одноосном сжатии. Затем фиксировалось новое значение объемного содержания пор v_1 и вычисление $\sigma_{сж}$ повторялось заново.

Результаты расчетов предельных значений прочностных показателей (при одноосном сжатии) модельных пеноэпоксидов представлены на рис. 2.

Отметим, что значения предельных прочностных показателей в направлениях осей x и y совпадают с аналогичными значениями $\sigma_{сж}$ в направлении оси z в силу структуры рассматриваемых пенополимерных материалов.

Заключение

В работе построена модель, позволяющая прогнозировать значения локальных упругих характеристик и предельных прочностных показателей (при одноосном сжатии) пеноэпоксидных материалов от изменения их пористости. На основании проведенных модельных расчетов можно заключить следующее:

1. Анализ ненулевых значений компонент K_{ijkl}^σ тензора $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ показывает, что: а) эти значения практически одинаковы для пеноэпоксидов на основе рассматриваемых смол ЭД-22 и ЭД-16; б) увеличение пористости материалов приводит к их нелинейному росту.

2. Значения K_{3333}^σ в порах, заполненных воздухом, близки к нулю (рис. 1а), т.е. в рассматриваемых пеноэпоксидных материалах приложенные напряжения концентрируются и перераспределяются, в основном, в полимерной матрице. Кроме того, значения K_{3333}^σ в полимерной матрице, наоборот, больше 1 (рис. 1б), достигая при $v_1 = 0,5$ величины, равной 2. Следовательно, при увеличении пористости локальные (внутренние) напряжения в эпок-

сидном связующем значительно (более чем в 1,5 раза) превышают значения напряжений, приложенных ко всему материалу. Это должно приводить к уменьшению значений предельных прочностных показателей (при сжатии) пенополимеров.

3. При малой пористости ($v_1 \approx 0$) значения компоненты K_{3333}^σ в порах равны нулю, а в полимерной матрице — единице, что согласуется с априорными представлениями о перераспределении напряжений в однородном полимерном материале.

4. При $v_1 \approx 0$ значения $\sigma_{сж}$ совпадают с соответствующими значениями разрушающих напряжений σ_r пеноэпоксидов на основе ЭД-22 и ЭД-16 (табл. 1), что свидетельствует о согласованности предложенной модели с начальными условиями задачи.

5. Увеличение объемного содержания пор приводит к ослаблению прочностных показателей модельных пеноэпоксидов, при этом изменение значений $\sigma_{сж}$ происходит по закону, близкому к линейному (рис. 2).

Литература

1. Берлин А.А., Шутков Ф.А. Пенополимеры на основе реакционно-способных олигомеров. М.: Химия, 1978. 296 с.
2. Берлин А.А., Шутков Ф.А. Упрочненные газонаполненные пластмассы. М.: Химия, 1980. 224 с.
3. Дементьев А.Г., Тараканов О.Г. Структура и свойства пенопластов. М.: Химия, 1983. 176 с.
4. Тараканов О.Г., Шамов И.В., Альперн В.Д. Наполненные пенопласты. М.: Химия, 1989. 344 с.
5. Дворко И.М., Коцелайнен И.В. Пенопласты на основе порошковых эпоксидно-новолачных композиций // Пластические массы. 1998. № 2. С. 40–42.
6. Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П. Моделирование эксплуатационных упругих свойств полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 43–47.
7. Бардушкин В.В., Лавров И.В., Бардушкин А.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Сычев А.А. Прогнозирование эксплуатационных упругих характеристик пенополимерного материала // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. Т. 21. № 6. С. 265–269. DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-6-265-269.
8. Бардушкин В.В., Сычев А.П., Сычев А.А., Бардушкин А.В. Моделирование эффективных упругих характеристик пенополимерного материала с однонаправленно ориентированными неизометричными порами // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2020. Т. 17. № 3. С. 22–28. DOI: 10.31429/vestnik-17-3-22-28.
9. Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Сычев А.П. О прогнозировании распределений локальных упругих полей в неоднородных средах на основе обобщенного сингулярного приближения // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. Т. 11. № 3. С. 11–17.
10. Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П. Концентрация напряжений и деформаций в полимерных композитах с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла // Вестник РГУПС. 2016. № 1. С. 8–13.
11. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Кириллов Д.А., Сорокин А.И. О методе прогнозирования предельных прочностных характеристик матричных композитов, основанном на использовании оператора концентрации напряжений // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2014. № 1. С. 45–51.
12. Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П. Моделирование предельных значений прочностных показателей полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла // Вестник РГУПС. 2016. № 3. С. 8–13.
13. Левин В.А., Лохин В.В., Зингерман К.М. О построении эффективных определяющих соотношений для пористых материалов со случайно распределенными порами при конечных деформациях и их наложении // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естественные науки. 2000. Спецвыпуск. С. 107–115.
14. Баяк И.О. Теоретические основы определения эффективных физических свойств коллекторов углеводородов // Ежегодник РАО. 2011. Вып. 12. С. 107–120.
15. Баяк И.О. Междисциплинарный подход к прогнозированию макроскопических и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородов. Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. М., 2013. 188 с.
16. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
17. Паньков А.А. Методы самосогласования механики композитов. Пермь: изд-во ПГТУ, 2008. 253 с.
18. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
19. Лапцук В.А., Крицук А.А. Физико-меха-

нические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков. Киев: Наукова думка, 1986. 92 с.

References

- Berlin, A.A., Shutov, F.A. *Foam polymers based on reactive oligomers*. Khimiya, Moscow, 1978. (In Russian)
- Berlin, A.A., Shutov, F.A. *Strengthened gas-filled plastics*. Khimiya, Moscow, 1980. (In Russian)
- Demytyev A.G., Tarakanov O.G. *The structure and properties of foams*. Khimiya, Moscow, 1983. (In Russian)
- Tarakanov, O.G., Shamov, I.V., Al'pern, V.D. *Filled foam plastics*. Khimiya, Moscow, 1989. (In Russian)
- Dvorko, I.M., Kotselainen, I.V. Foams based on powder epoxy-novolac compositions. *Plasticheskiye massy* [Plastic mass], 1998, no. 2, pp. 40–42. (In Russian)
- Bardushkin, V.V., Sorokin, A.I., Sychev, A.P. Modeling of performance elastic properties of polymer-based composites with lubricated spherical microcapsules and disperse inclusions of E-glass. *Treniye i smazka v mashinakh i mekhanizmach* [Friction & lubrication in machines and mechanisms], 2015, no. 10, pp. 43–47. (In Russian)
- Bardushkin, V.V., Lavrov, I.V., Bardushkin, A.V., Yakovlev, V.B., Sychev, A.P., Sychev, A.A. Predicting the operational elastic characteristics of foam-polymer materials. *Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii* [Assembling in mechanical engineering and instrument-making], 2020, vol. 21, no. 6, pp. 265–269. DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-6-265-269 (In Russian)
- Bardushkin, V.V., Sychev, A.P., Sychev, A.A., Bardushkin, A.V. Modeling of the effective elastic characteristics of foam materials with unidirectionally oriented non-isometric pores. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 22–28. DOI: 10.31429/vestnik-17-3-22-28 (In Russian)
- Kolesnikov, V.I., Yakovlev, V.B., Bardushkin, V.V., Sychev, A.P. On the prediction of local elastic fields' distributions in non-uniform media on the basis of a generalized singular approximation. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 11, no. 3, pp. 11–17. (In Russian)
- Bardushkin, V.V., Sorokin, A.I., Sychev, A.P. Stress and strain concentration in the polymer-based composites with lubricated spherical microcapsules and disperse inclusions of E-glass. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of RGUPS], 2016, no. 1, pp. 8–13. (In Russian)
- Kolesnikov, V.I., Bardushkin, V.V., Yakovlev, V.B., Sychev, A.P., Kirillov, D.A., Sorokin, A.I. 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*, 2014, no. 1, pp. 45–51. (In Russian)
- Bardushkin, V.V., Sorokin, A.I., Sychev, A.P. Modeling the limiting strength of the polymer-based composites with spherical microcapsules filled with lubricate and disperse inclusions of E-glass. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of RGUPS], 2016, no. 3, pp. 8–13. (In Russian)
- Levin, V.A., Lokhin, V.V., Zingerman, K.M. On the construction of effective defining relations for porous materials with randomly distributed pores at finite strains and their superposition. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennyye nauki* [Bulletin of higher education institutes North Caucasus region. Natural sciences], 2000, special iss., pp. 107–115. (In Russian)
- Bayuk, I.O. The theoretical basis for determining the effective physical properties of hydrocarbon reservoirs. *Yezhegodnik RAO* [RAE Yearbook], 2011, iss. 12, pp. 107–120. (In Russian)
- Bayuk, I.O. *Interdisciplinary approach to predicting macroscopic and filtration-capacitive properties of hydrocarbon reservoirs*. Dr. phys.-math. sci. diss. Moscow, 2013. (In Russian)
- Shermergor, T.D. *Micromechanics of inhomogeneous medium*. Nauka, Moscow, 1977. (In Russian)
- Pan'kov, A.A. *Methods of self-consistency mechanics of composites*. Perm State Technical University Publ., Perm, 2008. (In Russian)
- Grigor'ev, I.S., Meilikhov, E.Z. (eds.) *Physical Quantities: A Handbook*. Energoatomizdat, Moscow, 1991. (In Russian)
- Lapitsky, V.A., Kricuk, A.A. *Physical and mechanical properties of the epoxy polymers and fiberglasses*. Naukova Dumka, Kiev, 1986. (In Russian)