

МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI: 10.31429/vestnik-17-3-22-28

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЕНОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ОДНОНАПРАВЛЕННО ОРИЕНТИРОВАННЫМИ
НЕИЗОМЕТРИЧНЫМИ ПОРАМИ**

Бардушкин В. В., Сычев А. П., Сычев А. А., Бардушкин А. В.

MODELING OF THE EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS OF FOAM
MATERIALS WITH UNIDIRECTIONALLY ORIENTED NON-ISOMETRIC PORES

V. V. Bardushkin¹, A. P. Sychev², A. A. Sychev³, A. V. Bardushkin¹

¹ National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

² Federal State Budgetary Institution of Science “Federal Research Centre the Southern Scientific
Centre of the Russian Academy of Sciences”, Rostov-on-Don, Russia

³ Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia
e-mail: alekc_sap@mail.ru

Abstract. In this work, a model for predicting effective elastic characteristics (components of the tensor of effective elastic moduli) of foam polymer materials is constructed with consideration of the volume content and shape of unidirectionally oriented non-isometric pores. The model is based on a generalized singular approximation of random field theory. To calculate the effective elastic characteristics of the foam polymers, an iterative method of self-consistency was used, and the elastic modulus tensor values obtained at the previous iteration step were taken as parameters of a homogeneous comparison body. The elastic parameters in the Voight approximation were taken as the initial values of the parameters of the comparison body. This approximation does not require the inversion of the singular matrix of the elastic moduli tensor for such a component of foam polymers as pores filled with air. The usage of this approach allowed providing calculations of the effective elastic moduli of porous materials.

Based on the developed model, a numerical simulation of the effective elastic characteristics of the foamed epoxides and elastic anisotropy parameters in the directions of the axes of a rectangular coordinate system was carried out in this work. An epoxy binder ED-20 was considered as a matrix. It was reckoned that the pores have the form of ellipsoids of revolution oriented by their main semiaxis along the vertical axis. Simulation considered a change in the volumetric content of pores and a variation in their aspect ratio. Numerical calculations showed that with an increase in porosity, the values of the effective elastic moduli decrease without becoming negative, i.e. foams maintain their integrity at a high pore concentration. In addition, an increase in both the volumetric content of pores and deviations from unity of the value of their aspect ratio leads to increased anisotropy in the directions of all axes of the rectangular coordinate system (especially along the direction of the vertical axis).

Keywords: modeling, foam-polymer material, foam-epoxy material, pores, epoxy binder, effective elastic moduli, anisotropy.

Введение

Пористые полимерные материалы находят широкое применение в промышленности.

Они используются в качестве теплоизоляционных покрытий трубопроводов, плит стеновых панелей, как части конструкций, несущих силовую нагрузку (например, в качестве

Бардушкин Владимир Валентинович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Высшая математика № 2» Национального исследовательского университета «МИЭТ»; e-mail: bardushkin@mail.ru.

Сычев Александр Павлович, канд. физ.-мат. наук, 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, магистрант кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем Национального исследовательского университета «МИЭТ»; e-mail: i170k@yandex.ru.

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

элементов крыльев легких самолетов). Также пенополимеры применяются в качестве функциональных материалов, например, элементов фильтрующих устройств, фитилей для подъема углеводородных жидкостей за счет капиллярного эффекта, матриц-носителей катализаторов и так далее [1, 2]. Указанные пористые структуры должны обладать механической прочностью, достаточной для их длительной эксплуатации, хорошими теплоизолирующими, диэлектрическими характеристиками, стойкостью к влиянию различных внешних эксплуатационных факторов. Поэтому при разработке и создании пеноматериалов со стабильными свойствами актуальными являются не только вопросы подбора и оптимизации состава компонентов, их процентного содержания, но и задачи разработки теоретических моделей прогнозирования напряженно-деформированного состояния, теплопроводящих, диэлектрических и других физико-механических характеристик пористых сред.

К настоящему времени проведено множество исследований, посвященных практическим основам разработки и создания пенополимерных материалов и исследования их свойств (см., например [3–6]). Однако следует констатировать определенное отставание теории с точки зрения адекватного отражения характеристик реальных пеноматериалов от практики их создания. Поэтому проблема разработки теоретических методов прогнозирования физико-механических свойств пеноматериалов с учетом взаимодействия их элементов неоднородности является актуальной. При этом сочетание теоретических и экспериментальных исследований является подходом, позволяющий эффективнее создавать новые пенополимерные материалы с заранее заданными свойствами.

Численное моделирование упругих свойств пористозаполненных (жидкостью или газом) неоднородных сред затруднено по причине того, что значения сдвигового модуля упругости для пор, рассматриваемых как включения, находящиеся в жидкой или газообразной фазе, близки к нулю (а значит, матрица тензора модулей упругости является вырожденной) [7–12]. С целью преодоления возникающих по этой причине вычислительных проблем в работах [8–12] для прогнозирования эффективных (эксплуатационных) упругих характеристик неод-

нородных сред использовалось обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей (ОСП) [13] в варианте метода самосогласования [13–15]. Аналогичный подход используется и в настоящей работе при моделировании эксплуатационных упругих характеристик пенополимерных материалов с неизометричными порами.

1. Построение модели

Эффективные упругие характеристики определяются с помощью тензора четвертого ранга \mathbf{c}^* , связывающего средние значения напряжений $\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle$ и деформаций $\langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ в пенополимерном материале:

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

Здесь \mathbf{r} — радиус-вектор случайной точки пористой среды; символ «*» обозначает, что рассматриваются эффективные характеристики; угловые скобки определяют статистическое усреднение по объему неоднородной среды [13, 14].

Отметим, что для композита с изотропными компонентами операция усреднения по всему объему материала для некоторой случайной величины \mathbf{b} сводится к суммированию

$$\langle \mathbf{b} \rangle = \sum_s v_s \mathbf{b}_s, \quad (1.1)$$

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 [13, 14].

Для приближений, учитывающих взаимодействие элементов неоднородности, формулу для вычисления компонент тензора эффективных модулей упругости \mathbf{c}^* можно получить, решая уравнение равновесия (систему дифференциальных уравнений второго порядка со случайными кусочно-однородными коэффициентами) [13, 14]. Используя метод функций Грина, с помощью ОСП [13] и специально вводимого однородного тела сравнения формула для \mathbf{c}^* имеет вид (индексы опущены) [13, 14]

$$\mathbf{c}^* = \left\langle \mathbf{c}(\mathbf{r}) (\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle \times \left\langle (\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r})\mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle^{-1}, \quad (1.2)$$

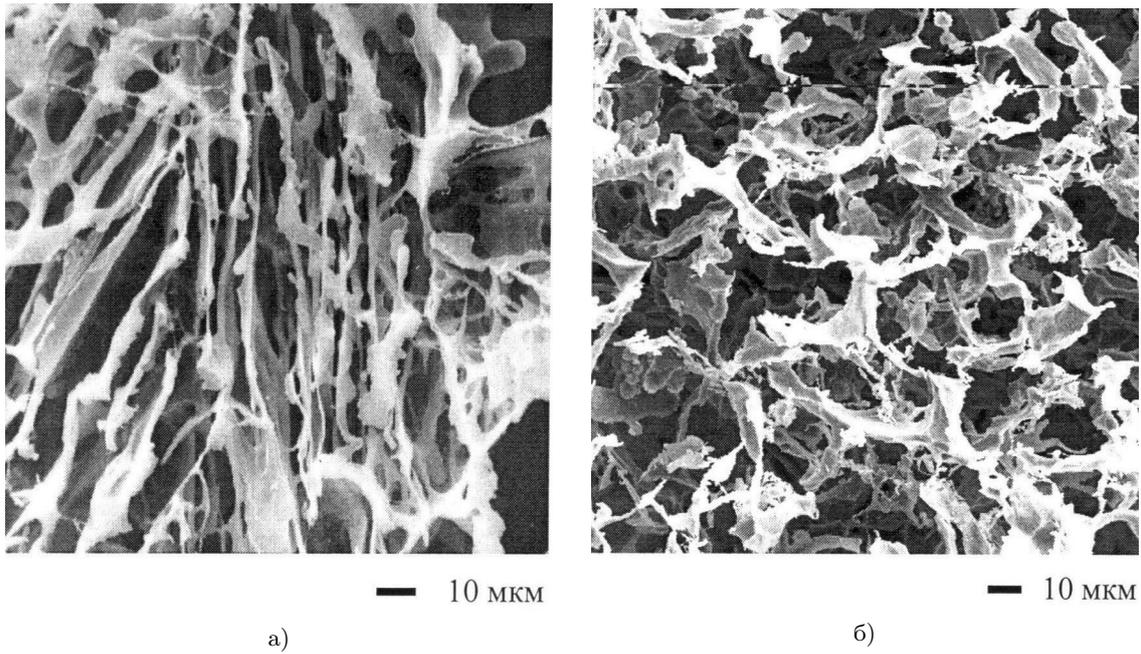


Рис. 1. Микрофотографии структуры пенополимеров [6]

где \mathbf{I} — единичный тензор; $\mathbf{c}(\mathbf{r})$ — тензор модулей упругости; двумя штрихами обозначена разность между соответствующими параметрами неоднородной среды и однородного тела сравнения, характеристики которого обозначаются далее верхним символом «с»: $\mathbf{c}''(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r}) - \mathbf{c}^c$; $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ — интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия. Для вычисления компонент g_{ijkl} тензора $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ необходимо вначале осуществить расчеты компонент a_{ijkl} тензора четвертого ранга \mathbf{A} , а затем в a_{ijkl} по двум парам индексов (i, j и k, l) провести операцию симметризации [13]. Компоненты a_{ijkl} тензора \mathbf{A} вычисляются с помощью соотношения

$$a_{ijkl} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega, \quad (1.3)$$

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

$$n_1 = l_1^{-1} \sin \theta \cos \varphi, \quad n_2 = l_2^{-1} \sin \theta \sin \varphi,$$

$$n_3 = l_3^{-1} \cos \theta.$$

Далее в работе рассматривались пенополимерные материалы с однонаправленно ориентированными неизометричными порами. Полагалось, что форма пор близка к эллипсоидальной. В качестве подтверждающего примера на рис. 1 приведены микрофотографии двух различных морфологических типов пенополимеров (форма и значения полуосей эллипсоидов зависят от технологических режимов создания пористых структур) [6].

2. Проведение модельных расчетов

Для проведения численных модельных расчетов в работе рассматривались пеноэпоксиды с порами эллипсоидальной формы, наполненными воздухом (компонент 1-го типа). Объемный модуль воздуха полагался равным $1,21 \cdot 10^{-4}$ ГПа, сдвиговый модуль — 0 ГПа [16]. В качестве матрицы пеноэпоксидов (компонент 2-го типа) рассматривалось связующее ЭД-20 (модуль Юнга при сжатии — 3,8 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,39) [17]. Полагалось, что эллипсоидальные поры ориентированы вдоль оси z прямоугольной системы координат и имеют длины полуосей l_1, l_2 и l_3 ($l_1 = l_2$).

С учетом (1.1), выражение (1.2) для вычисления эффективных упругих характеристик композитов с изотропными компонента-

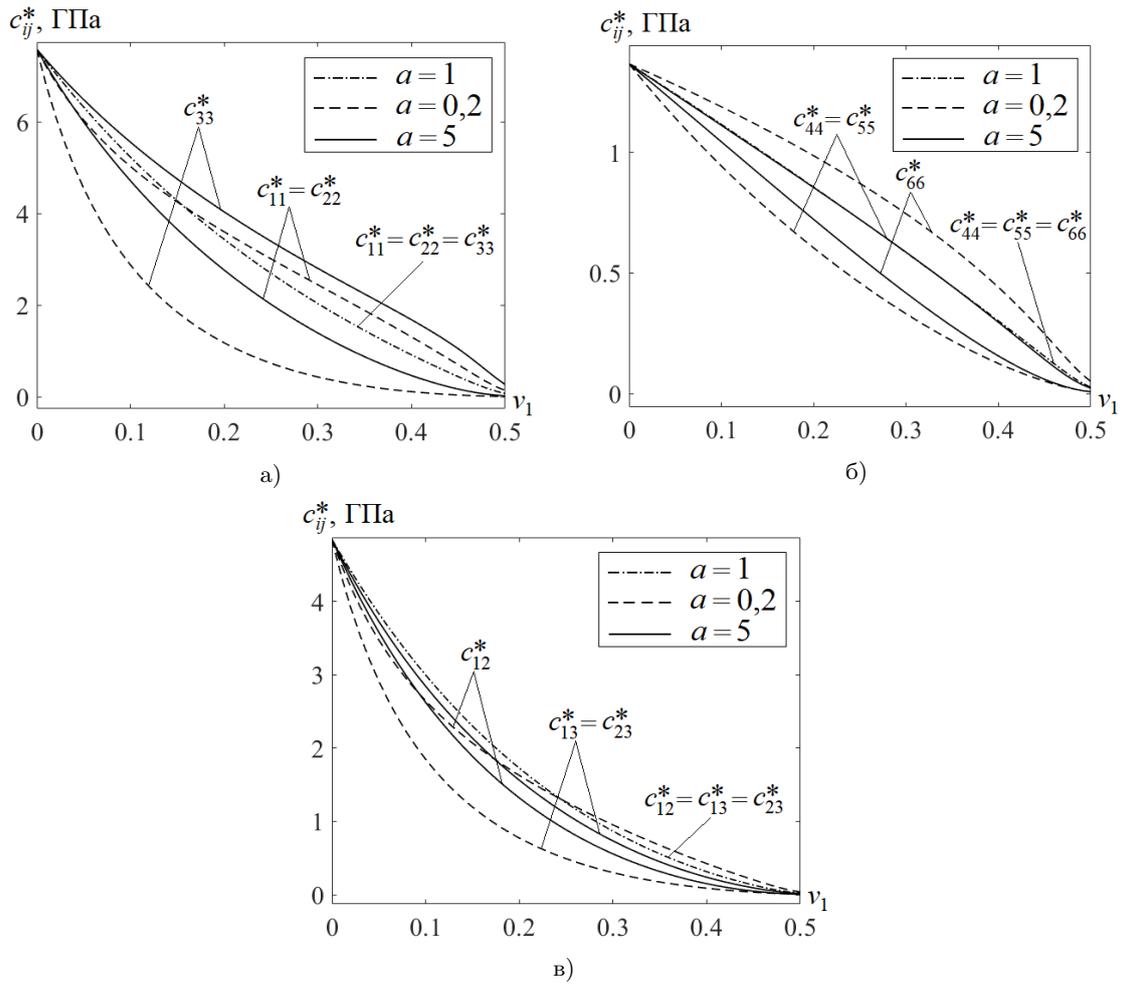


Рис. 2. Зависимости значений ненулевых элементов c_{ij}^* (ГПа) матрицы тензора \mathbf{c}^* пеноэпоксидов от пористости v_1 : а) c_{11}^* , c_{22}^* , c_{33}^* ; б) c_{44}^* , c_{55}^* , c_{66}^* ; в) c_{12}^* , c_{13}^* , c_{23}^*

ми имеет вид

$$\mathbf{c}^* = \left(\sum_s v_s \mathbf{c}_s (\mathbf{I} - \mathbf{g}_s (\mathbf{c}_s - \mathbf{c}^c))^{-1} \right) \times \left(\sum_s v_s (\mathbf{I} - \mathbf{g}_s (\mathbf{c}_s - \mathbf{c}^c))^{-1} \right)^{-1}, \quad (2.1)$$

где \mathbf{c}_s — тензор модулей упругости компонента s -го типа; \mathbf{g}_s — тензор $\mathbf{g}(\mathbf{r})$, соответствующий компоненту композита s -го типа, вычисляемый с помощью соотношения (1.3) и последующей процедуры симметризации.

Эффективные упругие характеристики модельных пеноматериалов вычислялись по формуле (2.1) в приближении самосогласования [13–15]. С этой целью, как и в работах [10–12], 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 $\mathbf{c}^c_{\text{Voight}} = \sum_s v_s \mathbf{c}_s$ [13]. 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. При этом считалось, что матрица \mathbf{c}^c , полученная на последнем шаге итерационной процедуры, является матрицей \mathbf{c}^* .

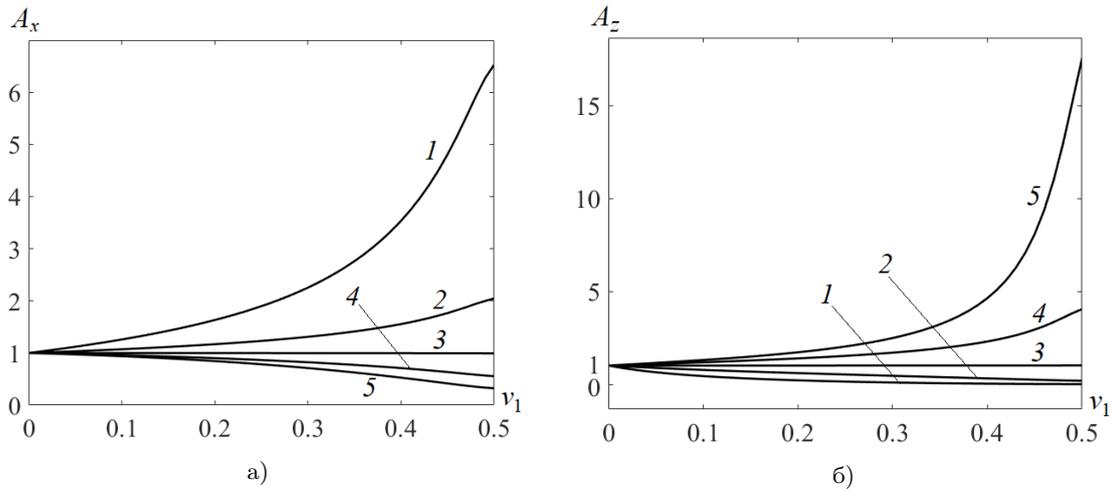


Рис. 3. Зависимости значений параметров упругой анизотропии а) A_x и б) A_z пеноэпоксидов от пористости v_1 : 1 – $a = 0,2$; 2 – $a = 0,5$; 3 – $a = 1$; 4 – $a = 2$; 5 – $a = 5$

Численное моделирование, проведенное по соотношению (2.1) для различных значений объемного содержания (v_1) и аспектного отношения ($a = l_3/l_1$) однонаправленно ориентированных неизометричных пор, показало, что пеноматериалы с порами, форма которых близка к сферической ($l_1 = l_2 = l_3$), обладали изотропией эффективных упругих свойств, т.к. для ненулевых элементов c_{ij}^* ($i, j = 1, \dots, 6$) симметрической матрицы \mathbf{c}^* выполнялись равенства $c_{11}^* = c_{22}^* = c_{33}^*$, $c_{12}^* = c_{13}^* = c_{23}^*$, $c_{44}^* = c_{55}^* = c_{66}^* = 0,5(c_{11}^* - c_{12}^*)$. При наличии однонаправленно ориентированных пор ($l_1 = l_2 \neq l_3$) пеноэпоксиды обладали гексагональной симметрией эффективных характеристик, т.к. выполнялись соотношения $c_{11}^* = c_{22}^* \neq c_{33}^*$, $c_{12}^* \neq c_{13}^* = c_{23}^*$, $c_{44}^* = c_{55}^* \neq c_{66}^*$ и $c_{66}^* = 0,5(c_{11}^* - c_{12}^*)$ [13].

На рис. 2 приведены результаты численных расчетов значений ненулевых элементов c_{ij}^* ($i, j = 1, \dots, 6$) матрицы тензора \mathbf{c}^* (ГПа) модельных пеноэпоксидов от изменения их пористости (объемного содержания пор) v_1 . При этом на рис. 2 показаны три случая возможных значений параметра $a = l_3/l_1$:

- $a = 1$ (поры имеют сферическую форму);
- $a = 0,2$ (поры имеют форму плоских дисков);
- $a = 5$ (поры имеют веретенообразную форму).

На рис. 3 приведены результаты численных расчетов значений параметров упругой анизотропии A_x (рис. 3а) и A_z (рис. 3б) пе-

ноэпоксидов в направлениях осей x и z прямоугольной системы координат соответственно [13, 14]:

$$A_x = \frac{c_{11}^* - c_{12}^*}{2c_{44}^*}, \quad A_z = \frac{c_{33}^* - c_{23}^*}{2c_{66}^*}.$$

Расчеты учитывали изменение пористости v_1 и вариацию аспектного отношения пор a . Значения параметра анизотропии A_y в направлении оси y совпадают со значениями A_x в силу структуры рассматриваемых материалов. Поэтому значения A_y на рис. 3 не показаны.

Заключение

В работе построена теоретическая модель прогнозирования эффективных упругих характеристик пенополимерных материалов с учетом объемного содержания и формы однонаправленно ориентированных неизометричных пор. Модель опирается на ОСП, при этом для вычисления эффективных упругих характеристик пеноматериалов использовался итерационный метод самосогласования с выбором в качестве начальных значений параметров однородного тела сравнения (использование тела сравнения составляет основу метода ОСП) эффективных упругих характеристик неоднородных материалов в приближении Фойгта. Данное приближение не требует обращения вырожденной матрицы тензора модулей упругости для такого компонента пеноматериала как поры, наполненные воздухом.

На основании проведенных исследований можно также заключить следующее.

– Разработанный подход к вычислению эффективных модулей упругости пенополимерных материалов является адекватным. Это подтверждается тем, что при отсутствии пор ($v_1 = 0$) значения эффективных модулей упругости – элементов c_{ij}^*

($i, j = 1, \dots, 6$) матрицы тензора \mathbf{c}^* – совпадают с аналогичными характеристиками эпоксидного связующего ЭД-20. Кроме того, при увеличении пористости значения c_{ij}^* уменьшаются, не становясь при этом отрицательными, т.е. пеноматериалы сохраняют свою целостность при высокой концентрации пор.

– Численное моделирование эффективных упругих характеристик пеноэпоксидов с однонаправленно ориентированными неизометричными порами показало, что увеличение как объемного содержания пор v_1 , так и отклонения от единицы значения их аспектного отношения (параметр a) приводит к усилению анизотропии в направлениях всех осей прямоугольной системы координат (особенно вдоль направления вертикальной оси z).

Литература

1. Берлин А.А., Шутков Ф.А. Упрочненные газонаполненные пластмассы. М.: Химия, 1980. 224 с.
2. Тараканов О.Г., Шамов И.В., Альперн В.Д. Наполненные пенопласты. М.: Химия, 1989. 344 с.
3. Патент РФ 2187433. Способ получения теплоизоляционного материала на основе синтактной пены, теплоизолированная труба и способ нанесения теплоизоляционного покрытия на внешнюю поверхность трубы / Телегин В.А., Телегина Е.Б., Горев В.А., Шестаков С.П., Ремизов В.В., Михайлов Н.В., Тимонин В.И., Газиянц А.П. Заявл. 21.10.1999. Опубл. 20.08.2002. Бюлл. № 23.
4. Патент РФ 2694325. Теплоизоляционный материал на основе пенополиуретана / Кочерженко А.В., Сулейманова Л.А., Кочерженко В.В. Заявл. 25.06.2018. Опубл. 11.07.2019. Бюлл. № 20.
5. Патент РФ 2526549. Композиция на основе вспениваемых винилароматических полимеров с улучшенной теплоизоляционной способностью, способы ее получения и вспененное изделие, полученное из этой композиции / Понтикьялло А., Гидони Д., Фелисари Р. Заявл. 01.05.2009. Опубл. 27.08.2014. Бюлл. № 24.
6. Патент РФ 2528842. Способ изготовления деталей из полимерного ультрадисперсного пористого материала / Маркелов В.В., Кременчугский М.В., Пинегин А.В. Заявл. 09.04.2013. Опубл. 20.09.2014. Бюлл. № 26.
7. 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.
8. Баяк И.О. Теоретические основы определения эффективных физических свойств коллекторов углеводородов // Ежегодник РАО. 2011. Вып. 12. С. 107–120.
9. Баяк И.О. Междисциплинарный подход к прогнозированию макроскопических и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородов. Автореф. ... дис. докт. физ.-мат. наук. М., 2013. 188 с.
10. 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.
11. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Колесников И.В., Мясников Ф.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б. Прогнозирование эксплуатационных упругих свойств трибокомпозитов с микрокапсулами, заполненными жидкой смазкой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. Т. 18. № 9. С. 398–403.
12. Бардушкин В.В., Лавров И.В., Бардушкин А.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Сычев А.А. Прогнозирование эксплуатационных упругих характеристик пенополимерных материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. Т. 21. № 6. С. 265–269. DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-6-265-269.
13. Шермергор Т.Д. Теория упругости микроненормированных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
14. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Колесников И.В. Механика поликристаллов и композитов (напряженно-деформированное состояние и разрушение). Ростов-на-Дону: изд-во РГУПС, 2012. 288 с.
15. Паньков А.А. Методы самосогласования механики композитов. Пермь: изд-во ПГТУ, 2008. 253 с.
16. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
17. Лапицкий В.А., Крицук А.А. Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков. Киев: Наукова думка, 1986. 92 с.

References

1. Berlin, A.A., Shutov, F.A. *Strengthened gas-filled plastics*. Khimiya, Moscow, 1980. (In Russian)
2. Tarakanov, O.G., Shamov, I.V., Al'pern, V.D. *Filled foam plastics*. Khimiya, Moscow, 1989. (In Russian)
3. Telegin, V.A., Telegina, E.B., Gorev, V.A., Sheshtakov, S.P., Remizov, V.V., Mikhajlov, N.V., Timonin, V.I., Gazijants, A.P. *Patent RU 2187433. Method for production of heat-insulating material based on sintact froth, heat-insulated pipe and method for application of heat-insulating coating on pipe outer surface*. Ann. 21.10.1999. Publ. 20.08.2002. Bull. no. 23. (In Russian)
4. Kocherzhenko, A.V., Sulejmanova, L.A., Kocherzhenko, V.V. *Patent RU 2694325. Heat-insulating material based on foamed polyurethane*. Ann. 25.06.2018. Publ. 11.07.2019. Bull. no. 20. (In Russian)
5. Pontik'ello, A., Gidoni, D., Felisari, R. *Patent RU 2526549. Composition, based on foamed vinylaromatic polymers with improved heat-insulating ability, methods of its obtaining and foamed product, obtained from thereof*. Ann. 01.05.2009. Publ. 27.08.2014. Bull. no. 24. (In Russian)
6. Markelov, V.V., Kremenchugskij, M.V., Pinegin, A.V. *Patent RU 2528842. Method of making components from ultrafine porous polymer material*. Ann. 09.04.2013. Publ. 20.09.2014. Bull. no. 26. (In Russian)
7. 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)
8. 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)
9. Bayuk, I.O. *Interdisciplinary approach to predicting macroscopic and filtration-capacitive properties of hydrocarbon reservoirs*. Dr. phys.-math. sci. diss. Moscow, 2013. (In Russian)
10. 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 mekhanizmakh* [Friction & lubrication in machines and mechanisms], 2015, no. 10, pp. 43–47. (In Russian)
11. Kolesnikov, V.I., Bardushkin, V.V., Kolesnikov, I.V., Myasnikov, F.V., Sychev, A.P., Yakovlev, V.B. Forecasting the operational elastic properties of tribocomposites with microcapsules filled with liquid lubricant. *Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii* [Assembling in mechanical engineering and instrument-making], 2017, vol. 18, no. 9, pp. 398–403. (In Russian)
12. 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)
13. Shermergor, T.D. *Micromechanics of inhomogeneous medium*. Nauka, Moscow, 1977. (In Russian)
14. Kolesnikov, V.I., Bardushkin, V.V., Yakovlev, V.B., Sychev, A.P., Kolesnikov, I.V. *Micromechanics of polycrystals and composites (stress-strain state and destruction)*. Rostov State Transport University Publ., Rostov-on-Don, 2012. (In Russian)
15. Pan'kov, A.A. *Methods of self-consistency mechanics of composites*. Perm State Technical University Publ., Perm, 2008. (In Russian)
16. Grigor'ev, I.S., Meilikhov, E.Z. (eds.) *Physical Quantities: A Handbook*. Energoatomizdat, Moscow, 1991. (In Russian)
17. Lapitsky, V.A., Kricuk, A.A. *Physical and mechanical properties of the epoxy polymers and fiberglasses*. Naukova Dumka, Kiev, 1986. (In Russian)