

Эффективные упругие характеристики эпоксидных композиций с полыми стеклянными микросферами

В. В. Бардушкин ¹, А. П. Сычев ^{2,3,✉}, И. В. Лавров ¹, В. Б. Яковлев ^{1,4},
А. В. Бардушкин ^{1,5}, А. А. Сычев ²

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

² Ростовский государственный университет путей сообщения, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, Ростов-на-Дону, 344038, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр-кт Чехова, 41, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

⁴ Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, ул. Нагатинская, 16а, корп. 11, Москва, 115487, Россия

⁵ ООО «АльфаЧип», Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 8, Москва, 124498, Россия

✉ Сычев Александр Павлович; e-mail: alekc_sap@mail.ru

В работе решается задача построения модели прогнозирования эффективных упругих характеристик — модуля Юнга и коэффициента Пуассона — эпоксидных композиций с полыми стеклянными микросферами (синтактиков). Модель опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей в варианте метода самосогласования и позволяет учитывать состав, объемные концентрации компонентов синтактиков и характерный размер микросфер. Указанный характерный размер представляет собой отношение толщины оболочки микросферы к радиусу ее полости. Опираясь на разработанную модель, для синтактичных материалов на полимерной основе (эпоксидные смолы одной из следующих марок — ЭХД, УП-610 и УП-610 + Э-181) с полыми микросферами из бесщелочного стекла проведены численные модельные расчеты значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона, учитывающие изменение характерного размера и процентного объемного содержания микросфер.

Численное моделирование показало, что для синтактичных материалов на основе всех рассмотренных типов эпоксидных смол увеличение характерного размера микросфер в используемом на практике диапазоне при их фиксированной объемной доле приводит к незначительному росту значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Расчеты показали также, что в рассматриваемых синтактичных материалах увеличение процентного содержания микросфер при фиксированных значениях их характерного размера приводит к уменьшению значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона по закону, близкому к линейному.

Сравнение полученных в работе расчетных значений модуля Юнга для рассматриваемых синтактичных материалов и экспериментальных данных, приведенных в научной литературе, показало их удовлетворительное соответствие.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА моделирование, эффективные упругие характеристики, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, синтактик, микросфера, эпоксидное связующее.

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

ПОЛУЧЕНО 12 января 2022 г. **ПРИНЯТО** 14 февраля 2022 г. **ПУБЛИКАЦИЯ** 30 марта 2022 г.

ЦИТИРОВАНИЕ Бардушкин В. В., Сычев А. П., Лавров И. В., Яковлев В. Б., Бардушкин А. В., Сычев А. А. Эффективные упругие характеристики эпоксидных композиций с полыми стеклянными микросферами // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2022. Т. 19. № 1. С. 50–57. DOI 10.31429/vestnik-19-1-50-57

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи.

© Автор(ы), 2022. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Effective Elastic Characteristics of Epoxy Compositions with Hollow Glass Microspheres

Vladimir V. Bardushkin¹, Aleksandr P. Sychev^{2,3,✉}, Igor V. Lavrov¹, Viktor B. Yakovlev^{1,4},
Andrey V. Bardushkin^{1,5}, Aleksey A. Sychev²

¹ National Research University of Electronic Technology, Shokina sq., 1, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

² Rostov State Transport University, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don, 344038, Russia

³ Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Prospekt Chekhova, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia

⁴ Institute of Nanotechnology Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Nagatinskaya str., 16a/11, Moscow, 115487, Russia

⁵ AlphaCHIP LLC, Shokina sq., 1/8, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

✉ Aleksandr P. Sychev; e-mail: alekc_sap@mail.ru

The problem of constructing a model for predicting effective elastic characteristics – Young’s modulus and Poisson’s ratio – of epoxy compositions with hollow glass microspheres (syntactics) is solved in this work. The model is based on the generalized singular approximation of the random fields theory in a version of the self-consistency method and allows considering the composition, volume concentrations of syntactic components, and the characteristic size of microspheres. The specified characteristic size is the ratio of the microsphere’s shell thickness to its cavity radius. Based on the developed model, for syntactic materials on a polymer basis (epoxy binders of one of the following brands – EHD, UP-610 and UP-610 + E-181) with hollow microspheres made of E-glass, numerical model calculations of the values of Young’s modulus and Poisson’s ratio were carried out, which consider the change in the characteristic size and percentage of the volumetric content of microspheres.

Numerical modeling has shown that for syntactic materials based on all the considered types of epoxy binders, an increase in the characteristic size of microspheres in the range used in practice with their fixed volume fraction leads to an insignificant increase in the values of Young’s modulus and Poisson’s ratio. Calculations also showed that, in the syntactic materials under consideration, an increase in the percentage of microspheres at fixed values of their characteristic size leads to a decrease in the values of Young’s modulus and Poisson’s ratio according to a law close to linear.

Comparison of the calculated values of Young’s modulus obtained in this work for the syntactic materials under consideration and experimental data given in the scientific literature showed their satisfactory agreement.

KEYWORDS modeling, effective elastic characteristics, Young’s modulus, Poisson’s ratio, syntactic, microsphere, epoxy binder.

FUNDING The work was carried out with the financial support of the RFBR grant (20-08-00155-a).

RECEIVED 12 January 2022. **ACCEPTED** 14 February 2022. **PUBLISHED** 30 March 2022.

CITE AS Bardushkin V. V., Sychev A. P., Lavrov I. V., Yakovlev V. B., Bardushkin A. V., Sychev A. A. Effective elastic characteristics of epoxy compositions with hollow glass microspheres. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 50–57. DOI 10.31429/vestnik-19-1-50-57

The author(s) declare no competing interests. The author(s) contributed equally.

© The Author(s), 2022. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

Полимерные композиции, основным наполнителем которых являются полые микросферы, называемые также сферопластиками (или синтактиками), находят широкое применение в авиа-, автомобиле- и судостроении, нефтяной, электронной промышленности и других областях науки и техники. Для полимерной основы синтактиков часто используются эпоксидные, фенолоформальдегидные или кремнийорганические связующие, а в качестве наполнителя — полые стеклянные микросферы. Хорошая адгезия полых стеклянных микросфер к полимерным связующим позволяет создавать структуры с низкой плотностью и широким спектром физико-механических характеристик [1–4].

Основная проблема, возникающая при численном моделировании упругих характеристик неоднородных материалов с включениями, находящимися в газообразной (или жидкой) фазе, состоит в том, что модули упругости таких элементов неоднородности близки к нулю (сдвиговый и объемный — для газа, сдвиговый — для жидкости). Поэтому для преодоления возникающих вычислительных трудностей исследователи используют различные приемы. Так, например, в работах [5–9] моделирование эффективных свойств пористых и пористо-заполненных жидкостью неоднородных материалов осуществлялось в рамках обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей (ОСП) [10]. При выборе характеристик тела сравнения (одна из важнейших особенностей метода ОСП в работах [5, 6] вводился эмпирический параметр, выражающий степень связности включений и принимающий значения от 0 до 1. В работе [7] для вычисления эффективных упругих характеристик полимерных трибокомполитов с наполненными минеральным маслом сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла также использовалось ОСП в варианте метода самосогласования (в качестве нулевого приближения для параметров тела сравнения выбирались характеристики в приближении Фойгта) [10, 11]. Прием, аналогичный предло-

женному в работе [7], был применен в работах [8,9] для вычисления эффективных упругих свойств пенополимерных материалов. Основным недостатком подхода, описанного в [7], являлось предположение о том, что сферическая оболочка микрокапсул не оказывает влияния на свойства неоднородных материалов. Поэтому в работе [12] с помощью ОСП в варианте метода самосогласования был предложен двухэтапный подход, позволяющий учитывать влияние характерного размера микрокапсул (отношение толщины оболочки к радиусу жидкого наполнителя), состава и концентрации компонентов на эффективные упругие свойства капсулированных трибокомполитов. Аналогичный описанному в [12] двухэтапный подход будет использован в настоящей работе, которая посвящена разработке метода прогнозирования и проведению численного моделирования эффективных упругих характеристик эпоксидных композиций с полыми стеклянными микросферами с учетом их объемного содержания в материале и характерного размера (отношение толщины оболочки микросферы к радиусу ее полости).

1. Построение модели

Эффективные упругие свойства неоднородных структур, обозначаемые символом «*», определяются тензором модулей упругости \mathbf{c}^* , связывающим средние значения напряжений $\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle$ и деформаций $\langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ в материале

$$\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle = c_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3. \quad (1.1)$$

В формуле (1.1) \mathbf{r} — радиус-вектор случайной точки в неоднородном материале, угловые скобки указывают на то, что выполняется процедура статистического усреднения [10, 11].

Для проведения моделирования эффективных упругих свойств неоднородных материалов, позволяющего учитывать взаимодействие элементов неоднородности, состав, форму, ориентацию и концентрацию компонентов, в настоящей работе применяется ОСП [10]. Тогда формула для вычисления тензора \mathbf{c}^* имеет следующий вид (индексы опущены):

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

В формуле (1.2) $\mathbf{c}(\mathbf{r})$ — тензор модулей упругости отдельного элемента неоднородности композитной структуры; $\mathbf{c}''(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r}) - \mathbf{c}^c$, где \mathbf{c}^c — специально вводимый в рамках ОСП тензор модулей упругости однородного тела сравнения; \mathbf{I} — единичный тензор четвертого ранга; $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ — сингулярная составляющая второй производной тензора Грина уравнений равновесия [10].

Рассматриваемые в работе сферопластики представляют собой композиции на полимерной основе (эпоксидные смолы одной из следующих марок — ЭХД, УП-610 и УП-610 + Э-181) с полыми микросферами из бесцелочного стекла. Учет влияния на эффективные упругие характеристики синтактных материалов геометрических размеров микросфер требует значительного усложнения расчетной модели. В разработанной модели расчеты выполняются в два этапа.

На первом этапе, опираясь на ОСП, по соотношению (1.2) вычисляются эффективные модули упругости пористого материала, состоящего из заполненных газом сферических пустот среднего радиуса R в матрице из бесцелочного стекла. Проведенные расчеты дают эффективные модули упругости неоднородного материала, из которого затем «вырезаются» шарообразные включения, имитирующие полые стеклянные микросферы. Эти «вырезанные» микросферы затем «погружаются» в полимерную матрицу. Выполнение первого этапа позволяет учитывать характерный геометрический размер «вырезанных» микросфер (отношение толщины оболочки микросферы к радиусу ее полости).

На втором этапе, опираясь на ОСП, по соотношению (1.2) проводится численное моделирование эффективных упругих характеристик двухкомпонентной матричной композитной структуры, матрицей в которой служит эпоксидная смола одной из следующих марок — ЭХД,

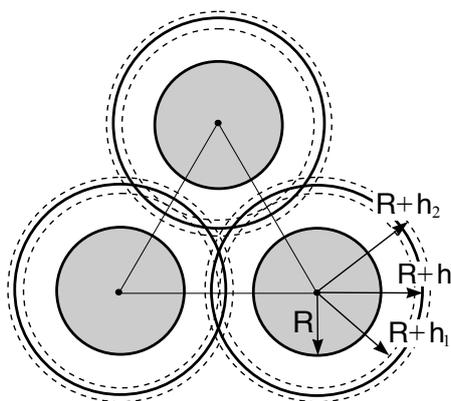


Рис. 1. Модель первого этапа прогнозирования эффективных упругих характеристик синтактных материалов

УП-610 и УП-610 + Э-181, а наполнителем — «вырезанные» шарообразные включения, соответствующие полым стеклянным микросферам с модулями упругости, найденными на первом этапе.

Опишем более подробно основные пункты первого этапа метода моделирования. Как указывалось, рассматривается статистически однородная двухфазная матричная композитная среда (матрица — бесцелочное стекло, служащее материалом стенок микросфер), в котором случайным образом расположены «включения», представляющие собой заполненные воздухом сферические пустоты среднего радиуса R . В силу статистической однородности рассматриваемой пористой среды можно определить среднее расстояние между шарообразными полостями и связать его с объемной концентрацией пор. Для этого можно рассмотреть так называемую тетраэдрическую укладку микросфер и выделить в ней элементарный объем в виде трех касающихся друг друга полых шаров среднего радиуса $R + h_1$. В этом случае расстояние между центрами микросфер будет равно $2(R + h_1)$ (рис. 1). Однако при такой тетраэдрической укладке в пространстве между соприкасающимися полыми микросферами образуются пустоты. Поэтому за характерную толщину h стенок микросфер в настоящей работе бралось значение большее, чем h_1 , а именно

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2},$$

где $h_2 = \frac{(2-\sqrt{3})R+2h_1}{\sqrt{3}}$, а величина h_2 соответствует случаю, когда поверхности всех трех полых шаров радиуса $R + h_2$ проходят через центр равностороннего треугольника со стороной $2(R + h_1)$ (вершинами треугольника служат центры соприкасающихся полых шаров среднего радиуса $R + h_1$).

Далее, установив характерную толщину h стенок микросфер, можно естественным образом ввести безразмерный микроструктурный параметр h/R и установить его связь с объемным содержанием пор $v_{\text{п}}$ (или объемным содержанием оболочки $v_{\text{об}}$). Для этого следует составить и решить следующую систему уравнений:

$$v_{\text{п}} + v_{\text{об}} = 1, \quad \frac{v_{\text{об}}}{v_{\text{п}}} = \frac{(4\pi(R+h)^3/3) - (4\pi R^3/3)}{4\pi R^3/3} = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^3 - 1.$$

Отсюда объемная концентрация пор $v_{\text{п}}$ выражается через характерный размер h/R с помощью следующей формулы: $v_{\text{п}} = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-3}$. И наоборот, характерный размер h/R связан с объемной концентрацией пор $v_{\text{п}}$ с помощью соотношения

$$\frac{h}{R} = \frac{1}{\sqrt[3]{v_{\text{п}}}} - 1. \quad (1.3)$$

Таблица 1. Упругие характеристики эпоксидных связующих

Марка связующего	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
ЭХД	4,5	0,36
УП-610	5,2	0,41
УП-610 + Э-181	5,4	0,42

2. Проведение модельных расчетов

Диаметр стеклянных микросфер, как указывается в работах [1, 13], обычно варьируется в пределах от 20 до 160 мкм, при этом толщина оболочки составляет величину, не превосходящую 2 мкм. Поэтому для образцов микросфер при проведении численного моделирования можно считать, что безразмерный параметр h/R может изменяться в пределах от 0,014 до 0,052.

В настоящей работе все численные расчеты с тензорами на обоих этапах моделирования выполнялись в матричной форме [10]. Для нахождения значений ненулевых элементов симметрических матриц тензора модулей упругости для каждого из изотропных компонентов синтактиков использовались следующие данные об их упругих характеристиках [14–16]:

- воздух: объемный модуль — $1,21 \cdot 10^{-4}$ ГПа, сдвиговый модуль — 0 ГПа;
- бесцелочное стекло: модуль Юнга — 76,2 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,22;
- эпоксидное связующее (см. табл. 1).

На первом этапе моделирования при вычислениях по формуле (1.2) тензора \mathbf{c}^* применялся дифференциальный метод самосогласования [17]. Идея этого метода состоит в пошаговом добавлении малыми порциями включений в виде сферических пор в эквивалентную (эффективную) среду, образованную полимерной матрицей и всеми сферическими порами, внедренными на предыдущих шагах. Для вычисления эффективных упругих характеристик каждой из вновь образованных на очередном шаге неоднородных сред (с добавленной порцией пор) применялся метод самосогласования [10, 11].

В настоящей работе включения в виде сферических пор добавлялись 5 %-ми (по объему) порциями в полученную на предыдущем шаге эквивалентную неоднородную среду. Затем на каждом шаге, зная для указанной среды объемную долю пор v_p , по формуле (1.3) определялся характерный размер h/R стеклянных микросфер и эффективные модули упругости пористого материала.

На втором этапе моделирования значений эффективных упругих характеристик синтактиков при вычислениях по формуле (1.2) тензора \mathbf{c}^* применялся метод самосогласования [10, 11]. После выполнения модельных расчетов значений ненулевых элементов c_{ij}^* ($i, j = 1, \dots, 6$) симметрической матрицы \mathbf{c}^* для синтактиков вычислялись их эффективные упругие характеристики — модуль Юнга E^* (ГПа) и коэффициент Пуассона ν^* . Вычисления значений E^* и ν^* выполнялись с помощью элементов c_{ij}^* матрицы \mathbf{c}^* по следующим формулам [10]:

$$E^* = \frac{c_{44}^*(3c_{12}^* + 2c_{44}^*)}{c_{12}^* + c_{44}^*}, \quad \nu^* = \frac{c_{12}^*}{2(c_{12}^* + c_{44}^*)}.$$

На рис. 2 приведены графики расчетных зависимостей значений эффективных упругих характеристик E^* и ν^* от изменения параметра h/R ($0,014 \leq h/R \leq 0,052$) при 40 %-м объемном содержании полых микросфер только для сферопластиков на основе эпоксидной смолы УП-610. Анализ значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона для сферопластиков на основе эпоксидных смол ЭХД, УП-610 и УП-610 + Э-181 от изменения параметра h/R при других фиксированных объемных долях микросфер показал, что графики имеют аналогичный вид, отличаясь от зависимостей, приведенных на рис. 2, только значениями величин E^* и ν^* .

Далее в работе были проведены исследования влияния процентных концентраций микросфер V_1 и эпоксидного связующего V_2 ($V_1 + V_2 = 100\%$) на эффективные упругие характеристики синтактиков.

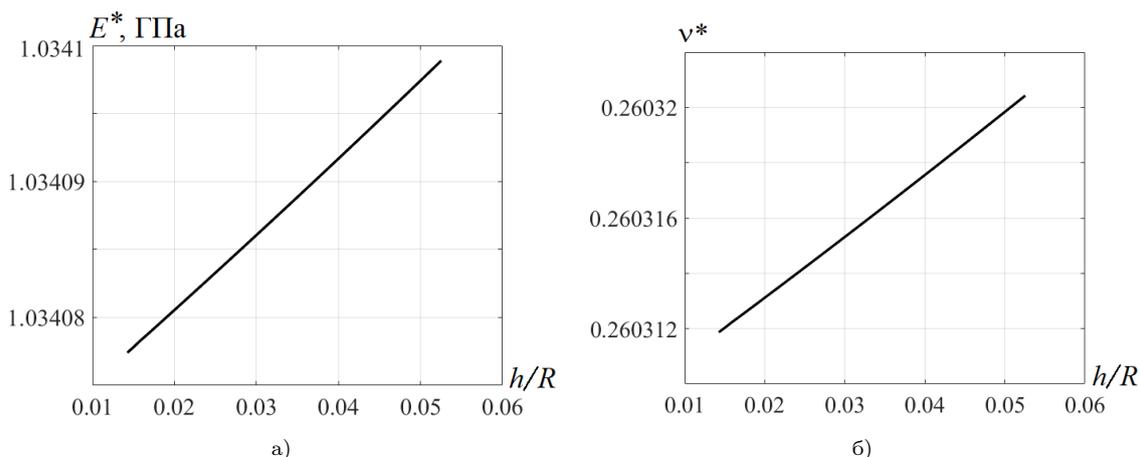


Рис. 2. Зависимости значений эффективных упругих характеристик синтактиков на основе эпоксидной смолы УП-610 от изменения параметра h/R при 40 %-м объемном содержании микросфер: a — модуль Юнга; b — коэффициент Пуассона

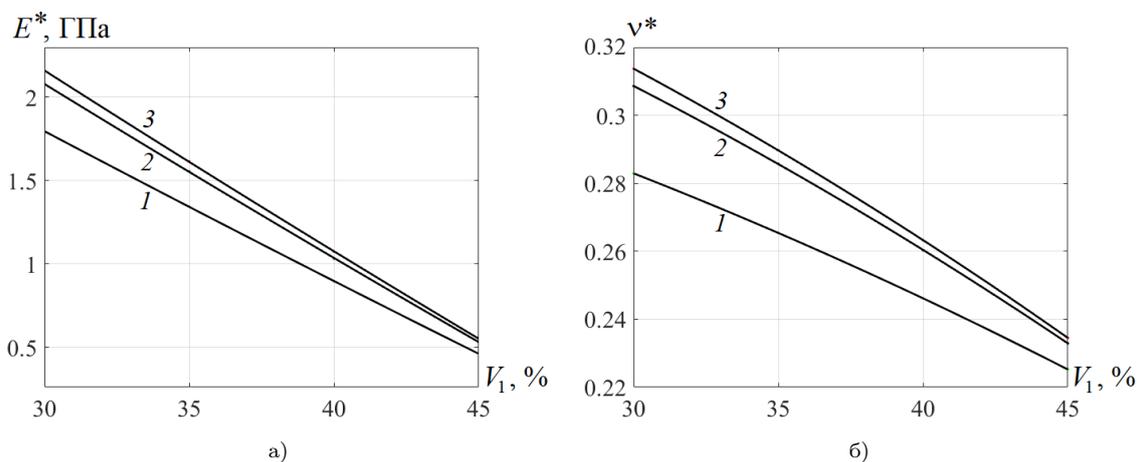


Рис. 3. Зависимости значений эффективных упругих характеристик синтактиков от изменения процентного объемного содержания в неоднородном материале полых микросфер: a — модуль Юнга; b — коэффициент Пуассона

На рис. 3 представлены результаты модельных расчетов значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона сферопластиков на основе эпоксидных смол ЭХД (кривая 1), УП-610 (кривая 2) и УП-610 + Э-181 (кривая 3) от изменения процентного объемного содержания в них полых стеклянных микросфер V_1 при $h/R = 0,03$.

Заключение

На основании проведенного численного моделирования значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона можно заключить следующее:

- изменение безразмерного параметра h/R в диапазоне от 0,014 до 0,052 при фиксированной объемной доле полых микросфер приводит к незначительному увеличению значений E^* и ν^* (рис. 2);
- увеличение процентного содержания микросфер при фиксированных значениях параметра h/R приводит к уменьшению значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона по закону,

близкому к линейному (рис. 3);

Отметим также, что полученные в работе расчетные значения модуля Юнга E^* (ГПа) для эпоксидных композиций с полыми стеклянными микросферами удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным, приведенным в статье [18], согласно которым $1 \leq E^* \leq 3$ (при этом в [18] не указано для каких значений процентных объемных содержаний стеклянных микросфер в синтактиках и для какого вида полимерного связующего эти данные были получены).

Литература [References]

1. Трофимов А.Н. *Высокотехнологичные эпоксидные связующие, полимерные композиты и инновационные технологии получения радиопрозрачных изделий специального назначения из конструктивных стеклопластиков*: дисс. д-ра техн. наук, 05.17.06. Москва, 2018. [Trofimov A.N. *High-tech epoxy binders, polymer composites and innovative technologies for the production of special-purpose radio-transparent products from structural fiberglass*: Diss. Ph.D. in Tech. Sci., 05.17.06. Moscow, 2018. (in Russian)]
2. Соколов И.И. *Сферопластики на основе термореактивных связующих для изделий авиационной техники*: дисс. канд. техн. наук, 05.16.09. Москва, 2013. [Sokolov I.I. *Spheroplastics based on thermosetting binders for aviation products*: Diss. Ph.D. in Tech. Sci., 05.16.09, Moscow, 2013. (in Russian)]
3. Юреско Т.А. Сферопластик как тепловая изоляция обитаемых подводных технических средств. *Вестник Астраханского ГТУ. Морская техника и технология*, 2014, № 2, с. 21–26. [Yuresko T.A. Spheroplastic as thermal insulation of manned underwater technical equipment. *Vestnik Astrakhanskogo GTU. Morskaya tekhnika i tekhnologiya = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Marine engineering and technology*, 2014, no. 2, pp. 21–26. (in Russian)]
4. Селиванов О.Г., Михайлов В.А. Теплоизоляционные синтактовые материалы на основе термостойкого кремнийорганического полимера. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2014, № 7, с. 12–13. [Selivanov O.G., Mikhailov, V.A. Heat-insulating syntactic materials based on heat-resistant organosilicon polymer. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2014, no. 7, pp. 12–13. (in Russian)]
5. Баяк И.О. Теоретические основы определения эффективных физических свойств коллекторов углеводородов. *Ежегодник РАО*, 2011, вып. 12, с. 107–120. [Bayuk I.O. The theoretical basis for determining the effective physical properties of hydrocarbon reservoirs. *Yezhegodnik RAO = RAE Yearbook*, 2011, no. 12, pp. 107–120. (in Russian)]
6. Баяк И.О. *Междисциплинарный подход к прогнозированию макроскопических и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородов*: дисс. д-ра физ.-мат. наук, 25.00.10. Москва, 2013. [Bayuk I.O. *Interdisciplinary approach to predicting macroscopic and filtration-capacitive properties of hydrocarbon reservoirs*: Diss. PhD in Phys.-Math. Sci., 25.00.10. Moscow, 2013. (in Russian)]
7. 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. [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 mekhanizmax = Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2015, no. 10, pp. 43–47. (in Russian)]
8. 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. [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. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii = Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 265–269. (in Russian)] DOI [10.36652/0202-3350-2020-21-6-265-269](https://doi.org/10.36652/0202-3350-2020-21-6-265-269)
9. Бардушкин В.В., Сычев А.П., Сычев А.А., Бардушкин А.В. Моделирование эффективных упругих характеристик пенополимерных материалов с однонаправленно ориентированными неизометричными порами. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2020, т. 17. № 3, с. 22–28. [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. (in Russian)] DOI [10.31429/vestnik-17-3-22-28](https://doi.org/10.31429/vestnik-17-3-22-28)
10. Шермергор Т.Д. *Теория упругости микронеоднородных сред*. Наука, Москва, 1977. [Shermergor T.D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred = Micromechanics of inhomogeneous medium*. Moscow, Nauka, 1977. (in Russian)]
 11. Паньков А.А. *Методы самосогласования механики композитов*. Изд-во ПГТУ, Пермь, 2008. [Pan'kov A.A. *Metody samosoglasovaniya mekhaniki kompozitov = Methods of self-consistency mechanics of composites*. Perm State Technical University Publ., Perm, 2008. (in Russian)]
 12. 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. [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. *Sborok v mashinostroyenii, priborostroyenii = Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2017, vol. 18, no. 9, pp. 398–403. (in Russian)]
 13. Горенберг А.Я., Трофимов А.Н., Иванова-Мумжиева В.Г., Плешков Л.В., Байков А.В. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 3. О толщине стенок промышленных полых стеклянных микросфер. *Пластические массы*. 2021. № 3–4. С. 32–36. [Gorenberg A.Ya., Trofimov A.N., Ivanova-Mumzhieva V.G., Pleshkov L.V., Baikov A.V. Morphology and properties of hollow glass microspheres. Part 3. On the wall thickness of industrial hollow glass microspheres. *Plasticheskie massy = Plastic mass*, 2021, no. 3–4, pp. 32–36. (in Russian)] DOI [10.35164/0554-2901-2021-3-4-32-36](https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-32-36)
 14. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. (под ред.) *Физические величины: Справочник*. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. [Grigor'ev I.S., Meilikhov E.Z. (eds.) *Physical Quantities: A Handbook*. Energoatomizdat, Moscow, 1991. (in Russian)]
 15. Гутников С.И., Лазорjak Б.И., Селезнев А.Н. *Стеклянные волокна*. Изд-во МГУ, Москва, 2010. [Gutnikov S.I., Lazorjak B.I., Seleznev A.N. *Glass fibers*. Publishing House of Moscow State University, Moscow, 2010. (in Russian)]
 16. Лапицкий В.А., Крицук А.А. *Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков*. Наукова думка, Киев, 1986. [Lapitsky V.A., Kricuk A.A. *Physical and mechanical properties of the epoxy polymers and fiberglasses*. Naukova Dumka, Kiev, 1986. (in Russian)]
 17. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин. *Известия АН СССР. Механика твердого тела*, 1973, № 4, с. 149–158. [Salganik R.L. Mechanics of bodies with a large number of cracks. *Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Mekhanika tverdogo tela = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Mechanics of Solids*, 1973, no. 4, pp. 149–158. (in Russian)]
 18. Трофимов А.Н., Плешков Л.В. Многослойные композиты с высокими удельными упругопрочностными характеристиками на основе полых стеклянных микросфер. В *Межд. научно-практ. конф. «Применение композиционных материалов в гражданском и военном авиационном строительстве», 21 августа 2009 г., Жуковский: «Союз производителей композитов», «Мир-Экспо»* в рамках IX Международного авиационно-космического салона МАКС-2009, с. 1–7. [Trofimov A.N., Pleshkov L.V. Multilayer composites with high specific elastic-strength characteristics based on hollow glass microspheres. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Primenenie kompozitsionnykh materialov v grazhdanskom i voennom aviastroenii", 21 avgusta 2009 g., Zhukovskiy = International Scientific and Practical Conference "Application of composite materials in civil and military aircraft construction", August 21, 2009. Zhukovsky: "Union of Composite manufacturers", "Mir-Expo" within the IX International Aviation and Space Salon MAKS-2009*, pp. 1–7. (in Russian)]