

УДК 539.3
DOI: 10.7868/S25000640250302

ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩИХ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЭПОКСИДНЫХ ГРУПП, АРМИРОВАННЫХ ХАОТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СТЕКЛЯННЫМИ ВОЛОКНАМИ И ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

© 2025 г. Академик В.И. Колесников¹, В.В. Бардушкин^{2,3},
И.В. Лавров^{2,3}, А.П. Сычев^{1,4}, А.А. Сычев¹, В.Б. Яковлев^{2,3}

Аннотация. Целью работы являлось построение модели и прогнозирование эффективных упругих характеристик (тензорных модулей упругости, модуля Юнга и коэффициента Пуассона) полимерных антифрикционных композитов. Исследованы трибокомпозиты, сформированные на основе эпоксидных смол с высоким содержанием эпоксигрупп (ЭПАФ, УП-610, ЭХД), наполненные хаотично расположенными короткими волокнами бесщелочного стекла и мелкодисперсными частицами политетрафторэтилена. Основой предложенного подхода к прогнозированию являлось обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей, применяемое при решении системы стохастических дифференциальных уравнений равновесия упругой среды. Эффективные упругие характеристики модельных трибоматериалов вычислялись с использованием метода самосогласования. Анализ значений компонент тензора эффективных упругих модулей в зависимости от состава, микроструктуры и объемного содержания наполнителей позволил установить, что изучаемые трибокомпозиты характеризуются эффективными упругими свойствами, близкими к изотропным. Это позволило провести численное оценивание значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона, отражающее влияние на них изменений объемных содержаний компонентов исследуемых полимерных антифрикционных композитов.

Численные расчеты для модельных трибокомпозитов позволили установить, что увеличение объемной доли частиц политетрафторэтилена при фиксированной концентрации волокон бесщелочного стекла приводит к незначительному снижению значений модуля Юнга, причем эта зависимость приблизительно линейна. Кроме того, возрастание концентрации волокон бесщелочного стекла при фиксированном объемном содержании частиц политетрафторэтилена приводит к существенному увеличению значений модуля Юнга по нелинейному закону. Численные расчеты для исследуемых трибоматериалов показали также, что увеличение объемной доли любой фракции наполнителя сопровождается снижением значений коэффициента Пуассона, причем эта зависимость приблизительно линейна.

Ключевые слова: полимерный композит, включение, матрица, эффективные модули упругости, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, моделирование.

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 Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation), Российская Федерация, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а, корп. 11

⁴ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (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

**EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS OF POLYMERIC COMPOSITES
BASED ON BINDERS WITH HIGH CONTENT OF EPOXY GROUPS,
REINFORCED BY CHAOTICALLY ORIENTED GLASS FIBERS
AND DISPERSED POLYTETRAFLUOROETHYLENE ADDITIVES**

**Academician RAS V.I. Kolesnikov¹, V.V. Bardushkin^{2,3}, I.V. Lavrov^{2,3},
A.P. Sychev^{1,4}, A.A. Sychev¹, V.B. Yakovlev^{2,3}**

Abstract. The aim of the work was to build a model and predict the effective elastic characteristics of polymer antifriction composites (tensor elastic moduli, Young's modulus and Poisson's ratio). Tribocomposites formed on the basis of epoxy binders with a high content of epoxy groups (EPAF, UP-610, EHD), filled with randomly located short fibers of E-glass and finely dispersed particles of polytetrafluoroethylene were studied. The basis of the proposed predicting method was the generalized singular approximation of random field's theory used for solving the system of stochastic differential equations of equilibrium of an elastic medium. The effective elastic characteristics of the model tribomaterials were calculated using the self-consistency method. The analysis of the values of the tensor components of effective elastic moduli depending on the composition, microstructure and volume content of fillers made it possible to establish that the studied tribocomposites are characterized by effective elastic properties close to isotropic. This made it possible to carry out a numerical evaluation of the values of Young's modulus and Poisson's ratio, reflecting the influence of changes in the volume contents of the components of the studied polymer antifriction composites.

Numerical calculations in model tribocomposites allowed to establish that an increase in the volume fraction of polytetrafluoroethylene particles at a fixed concentration of E-glass fibers leads to a slight decrease in the values of Young's modulus, and this relationship is approximately linear. In addition, an increase in the concentration of E-glass fibers at a fixed volume content of polytetrafluoroethylene particles leads to a significant increase in the values of Young's modulus according to a nonlinear law. Numerical calculations in the studied tribomaterials also showed that an increase in the volume fraction of any filler fraction is accompanied by a decrease in the values of Poisson's ratio, and this relationship is approximately linear.

Keywords: polymeric composite, inclusion, matrix, effective elastic moduli, Young's modulus, Poisson's ratio, simulation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичинадзе А.В., Матвеевский Р.М., Браун Э.Д. 1986. *Материалы в триботехнике и в нестационарных процессах*. М., Наука: 240 с.
2. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Baybaratskaya M.Yu., Mamaev O.A. 2004. *Полимерные композиционные материалы в триботехнике*. М., Недра: 262 с.
3. Михайлин Ю.А. 2013. *Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике*. СПб., Научные основы и технологии: 720 с.
4. Yildiz Zeyrek B., Aydogan B., Dilekcan E., Ozturk F. 2022. Review of thermoplastic composites in aerospace industry. *International Journal on Engineering Technologies and Informatics*. 3(1): 1–6. doi: 10.51626/ijeti.2022.03.00031
5. Кривогуз Ю.М., Коваль В.Н., Дубровский В.В. 2023. Полимерные композиты на основе термопластов, армированные длинными волокнами различной природы: получение, свойства, применение (обзор). *Полимерные материалы и технологии*. 9(3): 6–28. doi: 10.32864/polymmattech-2023-9-3-6-28
6. Колесников И.В. 2012. Упругие характеристики трехкомпонентных антифрикционных композитов с ориентированными неизометричными включениями. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 3(32): 150–157.
7. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Лапицкий А.В., Сычев А.П., Сычев А.А., Яковлев В.Б. 2011. Локальные физико-механические характеристики антифрикционных композитов для тяжело нагруженных узлов трения. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 10: 3–7.
8. Шилько С.В., Дробыш Т.В., Сазанков А.П. 2022. Особенности механических свойств при сжатии конструкционно-антифрикционных тканых композитов для высоконагруженных узлов трения. В кн.: *ПОЛИКОМТРИБ-2022: Тезисы докладов международной научно-технической конференции (Гомель, Беларусь, 28–30 июня 2022 г.)*. Гомель, ИММС НАН Беларуси: 110.
9. Лапицкий В.А., Крицук А.А. 1986. *Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков*. Киев, Наукова думка: 92 с.
10. Лапицкий А.В. 2010. Эпоксидные полимерные матрицы для высокопрочных и теплостойких композитов. *Клеи. Герметики. Технологии*. 2: 12–15.
11. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю. 2020. *Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе*. СПб., Профессия: 576 с.
12. Бардушкин В.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б., Лапицкий А.В. 2015. Прогнозирование эксплуатационных упругих свойств хаотически армированных полимерных композитов с антифрикционными дисперсными добавками. *Вестник машиностроения*. 10: 44–47.
13. Шермергрот Т.Д. 1977. *Теория упругости микронеоднородных сред*. М., Наука: 399 с.
14. Сычев А.П., Лавров И.В., Бардушкин В.В. 2022. *Физические и механические свойства неоднородных сред с вложенной микроструктурой (теория и моделирование)*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 320 с.
15. *Физические величины: справочник*. 1991. М., Энергоатомиздат: 1232 с.
16. Гутников С.И., Лазорьяк Б.И., Селезнев А.Н. 2010. *Стеклые волокна*. М., изд-во МГУ: 53 с.
17. Паньков А.А. 2008. *Методы самосогласования механики композитов*. Пермь, изд-во Пермского государственного технического университета: 253 с.

REFERENCES

1. Chichinadze A.V., Matveevskiy R.M., Braun E.D. 1986. *Materialy v tribotekhnike i v nestatsionarnykh protsessakh*. [Materials in tribotechnics and in non-stationary processes]. Moscow, Nauka: 240 p. (In Russian).
2. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Baybaratskaya M.Yu., Mamaev O.A. 2004. *Polimernye kompozitsionnye materialy v tribotekhnike*. [Polymeric composites in a tribotechnics]. Moscow, Nedra: 262 p. (In Russian).
3. Mikhaylin Yu.A. 2013. *Voloknistye polimernye kompozitsionnye materialy v tekhnike*. [Fibrous polymeric composite materials in engineering]. St Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii: 720 p. (In Russian).

4. Yildiz Zeyrek B., Aydogan B., Dilekcan E., Ozturk F. 2022. [Review of thermoplastic composites in aerospace industry]. *International Journal on Engineering Technologies and Informatics*. 3(1): 1–6. doi: 10.51626/ijeti.2022.03.00031
5. Krivoguz Yu.M., Koval V.N., Dubrovsky V.V. 2023. [Polymeric composites based on thermoplasts reinforced with long fibers of different nature: production, properties, application (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii*. 9(3): 6–28. (In Russian). doi: 10.32864/polymmattech-2023-9-3-6-28
6. Kolesnikov I.V. 2012. [Elastic characteristics of three-component antifriction composites with oriented non-isometric inclusions]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*. 3(32): 150–157. (In Russian).
7. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Lapitskiy A.V., Sychev A.P., Sychev A.A., Yakovlev V.B. 2011. [Local physical and mechanical characteristics of antifriction composites for hard-loaded friction knots]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmkh*. 10: 3–7. (In Russian).
8. Shil'ko S.V., Drobysh T.V., Sazankov A.P. 2022. [Features of mechanical properties during compression of structural antifriction woven composites for highly loaded friction units]. In: *POLIKOMTRIB-2022: Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [POLYCOMTRIB-2022: Abstracts of the international scientific and technical conference (Gomel, Belarus, 28–30 June 2022)]. Gomel, Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems named after V.A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus: 110. (In Russian).
9. Lapitskiy V.A., Kritsuk A.A. 1986. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva epoksidnykh polimerov i stekloplastikov*. [Physical and mechanical properties of the epoxy polymers and fiberglasses]. Kiev, Naukova dumka: 92 p. (In Russian).
10. Lapitskiy A.V. 2010. [Epoxy polymer matrices for high-strength and heat-resistant composites]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2: 12–15. (In Russian).
11. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Kutergina I.Yu. 2020. *Epoksidnye smoly, otverditeli, modifikatory i svyazuyushchie na ikh osnove*. [Epoxy resins, hardeners, modifiers and binders based on them]. St Petersburg, Professiya: 576 p. (In Russian).
12. Bardushkin V.V., Sychev A.P., Yakovlev V.B., Lapitskiy A.V. 2015. [Predicting of the operational elastic properties of chaotically reinforced polymeric composites with antifriction dispersed additives]. *Vestnik mashinostroeniya*. 10: 44–47. (In Russian).
13. Shermergor T.D. 1977. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred*. [Micromechanics of inhomogeneous medium]. Moscow, Nauka: 399 p. (In Russian).
14. Sychev A.P., Lavrov I.V., Bardushkin V.V. 2022. *Fizicheskie i mekhanicheskie svoystva neodnorodnykh sred s vlozhennoy mikrostrukturoy (teoriya i modelirovanie)*. [Physical and mechanical properties of inhomogeneous media with embedded microstructure (theory and modeling)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 320 p. (In Russian).
15. *Fizicheskie velichiny: spravochnik*. [Physical quantities: reference book]. 1991. Moscow, Energoatomizdat: 1232 p. (In Russian).
16. Gutnikov S.I., Lazoryak B.I., Seleznev A.N. 2010. *Steklyannye volokna*. [Glass fibers]. Moscow, Moscow State University: 53 p. (In Russian).
17. Pan'kov A.A. 2008. *Metody samosoglasovaniya mekhaniki kompozitov*. [Methods of self-consistency mechanics of composites]. Perm, Perm State Technical University: 253 p. (In Russian).

Поступила 31.03.2025

Принята 16.06.2025