

УДК 539.55
DOI: 10.7868/S25000640260102

СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

© 2026 г. О.А. Беляк^{1,2}, академик В.И. Колесников²,
чл.-корр. РАН И.В. Колесников^{1,2}, Е.Д. Аникина¹,
К.Н. Политыко¹, М.М. Четверик²

Аннотация. Представлены исследования механических и трибологических свойств композиционных материалов с матрицей из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, модифицированной микронными частицами оксида алюминия различной концентрации – массовая часть 1, 3 и 5 %. Влияние модификатора на механические и трибологические свойства полимерных композитов было установлено в рамках лабораторных экспериментальных исследований. Вязкоупругие свойства полимерных композитов были идентифицированы в рамках теоретического подхода и модели стандартного вязкоупругого тела. Входной информацией при этом служили диаграммы индентирования, полученные при различных режимах нагружения, – скорость нагружения/разгрузки, время выдержки индентора при постоянной нагрузке сферическим индентором в шести различных точках на поверхности образца. Трибологические характеристики полимерных композиционных материалов – массовый износ, коэффициент трения – были исследованы по схеме «ролик – колодка» в режиме трения скольжения. Была исследована морфология контактной поверхности образцов. Определение оптимальной концентрации модификатора в базовой матрице композита осуществлено на основе анализа результатов лабораторных экспериментов по определению трибомеханических свойств композитов. Определение оптимальных нагрузочно-скоростных параметров эксплуатации разработанных материалов выполнено на основе построенной матрицы плана эксперимента для девяти режимных подходов, которые были рандомизированы и повторены трижды. Увеличение процентного содержания наполнителя в базовой матрице хотя и приводило к росту прочностных свойств композита, однако массовый износ и коэффициент трения при этом были больше по сравнению с базовой матрицей. На основе комплексного анализа результатов лабораторных экспериментов композиционный материал с содержанием 1 % массовой части оксида алюминия продемонстрировал минимальный массовый износ и стабильный коэффициент трения.

Ключевые слова: эпоксидная смола, матрица, оксид алюминия, износостойкость, физико-механические свойства, индентирование.

STRUCTURE, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF A DISPERSION-FILLED EPOXY RESIN

O.A. Belyak^{1,2}, Academician RAS V.I. Kolesnikov²,
Corresponding Member RAS I.V. Kolesnikov^{1,2}, E.D. Anikina¹,
K.N. Polityko¹, M.M. Chetverik²

Abstract. The present paper expounds upon the mechanical and tribological properties of composite materials with an ED-20 epoxy-dianic resin matrix modified with micron-sized aluminum oxide particles at varying concentrations of 1%, 3%, and 5% by weight. The effect of the modifier on the mechanical and tribological properties of polymer composites was determined in laboratory experimental studies. The viscoelastic

¹ Федеральное исследовательское учреждение 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: belyak@ssc-ras.ru

² 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

properties of polymer composites were identified through a theoretical approach and a standard viscoelastic body model. The input information was derived from indentation diagrams obtained under various loading conditions, including loading/unloading speed, indenter dwell time under constant load with a spherical indenter at six different points on the sample surface. The tribological characteristics of polymer composite materials, specifically mass wear and friction coefficient, were examined through a roller-block test in sliding friction mode. The morphology of the contact surface of the samples was studied. The determination of the optimal concentration of the modifier in the base matrix of the composite was made possible by the analysis of the results of laboratory experiments that were conducted to determine the tribomechanical properties of composites. The optimal load-speed parameters for the developed materials were determined based on a matrix of experimental designs for nine operating modes, which were randomized and repeated three times. It was demonstrated that while an augmentation in the percentage of filler in the base matrix resulted in an enhancement of the strength properties of the composite, the mass wear and friction coefficient were higher in comparison to the base matrix. A thorough evaluation of the outcomes from a series of laboratory experiments revealed that the composite material with a composition of aluminum oxide at 1% by weight exhibited negligible mass loss and a consistent friction coefficient.

Keywords: epoxy resin, matrix, aluminum oxide, wear resistance, mechanical properties, indentation.

1. Alhazmi W.H., Jazaa Y., Mousa S., Abd-Elhady A.A., Sallam H.E.M. 2021. Tribological and mechanical properties of epoxy reinforced by hybrid nanoparticles. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 18(3). doi: 10.1590/1679-78256384
2. Cui J., Tian Y., Li R., Zhang J., Zheng S., Guo F., Che Q. 2025. Nano- Al_2O_3 obtained the best tribological properties than similar hardness nanoparticles filled into epoxy resin. *Colloid and Polymer Science*. 303(5): 735–745. doi: 10.1007/s00396-025-05383-x
3. Albahkali T., Fouly A., Alnaser I.A., Elsheniti M.B., Rezk A., Abdo H.S. 2023. Investigation of the mechanical and tribological behavior of epoxy-based hybrid composite. *Polymers*. 15(19): 3880. doi: 10.3390/polym15193880
4. Fouly A., Alkalla M.G. 2020. Effect of low nanosized alumina loading fraction on the physicomechanical and tribological behavior of epoxy. *Tribology International*. 152: 106550. doi: 10.1016/j.triboint.2020.106550
5. Ren Z., Yang Y., Lin Y., Guo Z. 2019. Tribological properties of molybdenum disulfide and helical carbon nanotube modified epoxy resin. *Materials*. 12(6): 903. doi: 10.3390/ma12060903
6. Xu Z., Shen X., Wang T., Yang Y., Yi J., Cao M., Shen J., Xiao Y., Guan J., Jiang X., Tang B., Li H. 2021. Investigation on tribological and thermo-mechanical properties of Ti_3C_2 nanosheets/epoxy nanocomposites. *ACS Omega*. 6(43): 29184–29191. doi: 10.1021/acsomega.1c04620
7. Baghdadi Y.N., Youssef L., Bouhadir K., Harb M., Mustapha S., Patra D., Tehrani-Bagha A.R. 2020. The effects of modified zinc oxide nanoparticles on the mechanical/thermal properties of epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*. 137(43): 49330. doi: 10.1002/app.49330
8. Потапов А.И., Гоголинский К.В., Сясько В.А., Уманский А.С., Кондратьев А.В. 2016. Методические и метрологические аспекты измерения механических свойств материалов методом инструментального индентирования. *Контроль. Диагностика*. 8: 16–21. doi: 10.14489/td.2016.08.pp.016-021
9. Oliver W.C., Pharr G.M. 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 7(6): 1564–1583. doi: 10.1557/JMR.1992.1564
10. Головин Ю.И. 2008. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор). *Физика твердого тела*. 50(12): 2113–2142.
11. Беляк О.А., Суворова Т.В. 2018. Влияние микроструктуры основания на силы трения при движении плоского штампа. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 15(3): 25–31. doi: 10.31429/vestnik-15-3-25-31
12. Беляк О.А., Суворова Т.В. 2021. Колебания штампа на поверхности гетерогенного слоя при учете трения в области контакта. *Прикладная математика и механика*. 85(3): 321–331. doi: 10.31857/S0032823521030048
13. Беляк О.А., Суворова Т.В. 2021. Прогнозирование механических свойств антифрикционных композитных материалов. *Механика композитных материалов*. 57(5): 917–932. doi: 10.22364/mkm.57.5.08
14. Степанов Ф.И., Торская Е.В. 2016. Исследование напряженного состояния при скольжении штампа по вязкоупругому полупространству. *Трение и износ*. 37(2): 133–138.
15. Wayne Chen W., Jane Wang Q., Huan Z., Luo X. 2011. Semi-analytical viscoelastic contact modeling of polymer-based materials. *Journal of Tribology*. 133(4): 041404. doi: 10.1115/1.4004928
16. Горячева И.Г., Степанов Ф.И., Торская Е.В. 2015. Скольжение гладкого индентора при наличии трения по вязкоупругому полупространству. *Прикладная математика и механика*. 79(6): 853–863.
17. Belyak O.A., Suvorova T.V., Manturov D.S., Ananko A.M. 2025. Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives. *Mechanics of Composite Materials*. 61(2): 257–268. doi: 10.1007/s11029-025-10274-x

REFERENCES

1. Alhazmi W.H., Jazaa Y., Mousa S., Abd-Elhady A.A., Sallam H.E.M. 2021. Tribological and mechanical properties of epoxy reinforced by hybrid nanoparticles. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 18(3). doi: 10.1590/1679-78256384
2. Cui J., Tian Y., Li R., Zhang J., Zheng S., Guo F., Che Q. 2025. Nano- Al_2O_3 obtained the best tribological properties than similar hardness nanoparticles filled into epoxy resin. *Colloid and Polymer Science*. 303(5): 735–745. doi: 10.1007/s00396-025-05383-x
3. Albahkali T., Fouly A., Alnaser I.A., Elsheniti M.B., Rezk A., Abdo H.S. 2023. Investigation of the mechanical and tribological behavior of epoxy-based hybrid composite. *Polymers*. 15(19): 3880. doi: 10.3390/polym15193880
4. Fouly A., Alkalla M.G. 2020. Effect of low nanosized alumina loading fraction on the physicomechanical and tribological behavior of epoxy. *Tribology International*. 152: 106550. doi: 10.1016/j.triboint.2020.106550
5. Ren Z., Yang Y., Lin Y., Guo Z. 2019. Tribological properties of molybdenum disulfide and helical carbon nanotube modified epoxy resin. *Materials*. 12(6): 903. doi: 10.3390/ma12060903

6. Xu Z., Shen X., Wang T., Yang Y., Yi J., Cao M., Shen J., Xiao Y., Guan J., Jiang X., Tang B., Li H. 2021. Investigation on tribological and thermo-mechanical properties of Ti_3C_2 nanosheets/epoxy nanocomposites. *ACS Omega*. 6(43): 29184–29191. doi: 10.1021/acsomega.1c04620
7. Baghdadi Y.N., Youssef L., Bouhadir K., Harb M., Mustapha S., Patra D., Tehrani-Bagha A.R. 2020. The effects of modified zinc oxide nanoparticles on the mechanical/thermal properties of epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*. 137(43): 49330. doi: 10.1002/app.49330
8. Potapov A.I., Gogolinskiy K.V., Syasko V.A., Umanskiy A.S., Kondratiev A.V. 2016. [Methodological and metrological aspects of materials mechanical properties measurements by instrumented indentation]. *Kontrol'. Diagnostika*. 8: 16–21. (In Russian). doi: 10.14489/td.2016.08.pp.016-021
9. Oliver W.C., Pharr G.M. 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 7(6): 1564–1583. doi: 10.1557/JMR.1992.1564
10. Golovin Yu.I. 2008. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers, and films: a review. *Physics of the Solid State*. 50(12): 2205–2236. doi: 10.1134/S1063783408120019
11. Belyak O.A., Suvorova T.V. 2018. [Influence of the foundation microstructure on frictional forces during the motion of a flat punch]. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 15(3): 25–31. (In Russian). doi: 10.31429/vestnik-15-3-25-31
12. Belyak O.A., Suvorova T.V. 2021. [Vibrations of a punch on the surface of a heterogeneous layer with account of friction in the contact area]. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 85(3): 321–331. (In Russian). doi: 10.31857/S0032823521030048
13. Belyak O.A., Suvorova T.V. 2021. [Predicting of the mechanical properties of antifriction composite materials]. *Mechanics of Composite Materials*. 57(4): 647–656. (In Russian). doi: 10.1007/s11029-021-09986-7
14. Stepanov F.I., Torskaya E.V. 2016. Study of stress state of viscoelastic half-space in sliding contact with smooth indenter. *Journal of Friction and Wear*. 37(2): 101–106. doi: 10.3103/S1068366616020173
15. Wayne Chen W., Jane Wang Q., Huan Z., Luo X. 2011. Semi-analytical viscoelastic contact modeling of polymer-based materials. *Journal of Tribology*. 133(4): 041404. doi: 10.1115/1.4004928
16. Goryacheva I.G., Stepanov F.I., Torskaya E.V. 2015. Sliding of a smooth indenter over a viscoelastic half-space when there is friction. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 79(6): 596–603. doi: 10.1016/j.jappmathmech.2016.04.006
17. Belyak O.A., Suvorova T.V., Manturov D.S., Ananko A.M. 2025. Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives. *Mechanics of Composite Materials*. 61(2): 257–268. doi: 10.1007/s11029-025-10274-x

Поступила 17.10.2025

Принята 25.12.2025