

УДК 539.3:620.22
DOI: 10.7868/S25000640260304

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОЭЛЕКТРОУПРУГИХ КОМПОЗИТОВ С ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ 0-0-3 И 1-1-3 СВЯЗНОСТИ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

© 2026 г. В.А. Чебаненко¹, А.Н. Соловьёв², А.В. Юдин¹

Аннотация. Стремительное развитие аддитивных технологий открывает новые горизонты для создания трехфазных магнитоэлектродупругих композитов со сложной оптимизированной пространственной архитектурой. В настоящем исследовании разработана, верифицирована и применена вычислительная методика трехмерной конечно-элементной гомогенизации для предсказания полного набора макроскопических свойств таких материалов. Объектом детального исследования выступили композиты, состоящие из пьезоэлектрика (BaTiO_3), пьезомагнетика (CoFe_2O_4) и связующей полимерной матрицы. В основе предложенного численного алгоритма лежит анализ представительного объемного элемента с гранецентрированной (связность 0-0-3) и стержневой (1-1-3) архитектурами без геометрического перекрытия фаз при использовании периодических граничных условий и процедуры осреднения. Из-за значительной разницы упругих модулей компонентов происходит формирование непрерывного каркаса из жестких пьезомагнитных частиц. Этот каркас блокирует передачу упругой деформации к более мягким изолированным включениям пьезоэлектрика, значительно снижая макроскопическую магнитоэлектрическую связь. Структурный переход к стержневой архитектуре 1-1-3, исключая полимер из цепи передачи продольной нагрузки, позволяет повысить магнитоэлектрический коэффициент композита на 1–2 порядка. Построенные нелинейные 3D-поверхности макроскопического отклика выявляют оптимальные топологические пики, существенно смещенные в область высоких суммарных концентраций активных фаз. Полученные данные демонстрируют важность учета 3D-микроструктуры при проектировании мультиферроиков и создают теоретические рекомендации для 3D-печати высокоэффективных электромагнитных преобразователей нового поколения.

Ключевые слова: магнитоэлектродупругий композит, трехфазный композит, конечно-элементная гомогенизация, эффективные константы, топология включений, магнитоэлектрический отклик, аддитивные технологии.

DETERMINATION OF EFFECTIVE PROPERTIES OF MAGNETOELECTROELASTIC COMPOSITES WITH POLYMER MATRIX OF 0-0-3 AND 1-1-3 CONNECTIVITY BASED ON FINITE ELEMENT ANALYSIS

V.A. Chebanenko¹, A.N. Soloviev², A.V. Yudin¹

Abstract. The rapid development of additive manufacturing opens new horizons for the creation of three-phase magnetoelectroelastic composites with complex, optimized spatial architectures. In this study, we develop, verify, and apply a computational method for three-dimensional finite element homogenization to

¹ 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: valera.chebanenko@yandex.ru

² Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова (Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russian Federation), Российская Федерация, 295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, 8

predict the full range of macroscopic properties of such materials. The subject of this detailed study were composites consisting of a piezoelectric (BaTiO_3), a piezomagnetic (CoFe_2O_4), and a binding polymer matrix. The proposed numerical algorithm is based on the analysis of a representative volume element with face-centered (0-0-3 connectivity) and rod (1-1-3) architectures without geometric phase overlap using periodic boundary conditions and an averaging procedure. It is established that, due to the significant difference in the elastic moduli of the components, a continuous framework of rigid piezomagnetic particles is formed. This framework blocks the transfer of elastic strain to the softer, isolated piezoelectric inclusions, significantly reducing macroscopic magnetoelectric coupling. It is shown that a structural transition to a 1-1-3 rod architecture, eliminating the polymer from the longitudinal load transmission chain, allows to increase the composite's magnetoelectric coefficient by one to two orders of magnitude. The constructed nonlinear 3D macroscopic response surfaces reveal optimal topological peaks, significantly shifted toward the region of high total concentrations of active phases. The obtained data demonstrate the importance of considering 3D microstructure when designing multiferroics and provide theoretical recommendations for the 3D printing of next-generation, highly efficient electromagnetic transducers.

Keywords: magnetoelectroelastic composite, three-phase composite, finite element homogenization, effective constants, inclusion topology, magnetoelectric response, additive manufacturing.

1. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. 2008. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*. 103(3): 031101. doi: 10.1063/1.2836410
2. Белянкова Т.И., Ворович Е.И., Калинин В.В. 2025. Особенности распространения SH-волн в биморфной пьезоэлектрической/пьезомагнитной пластине из функционально градиентных материалов. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2: 14–29. doi: 10.15593/perm.mech/2025.2.02
3. Soloviev A.N., Do B.T., Chebanenko V.A., Parinov I.A. 2022. Flexural vibrations of a composite piezoactive bimorph in an alternating magnetic field: applied theory and finite-element simulation. *Mechanics of Composite Materials*. 58(4): 471–482. doi: 10.1007/s11029-022-10043-0
4. Srinivas S., Li J.Y., Zhou Y.C., Soh A.K. 2006. The effective magneto-electro-elastic moduli of matrix-based multiferroic composites. *Journal of Applied Physics*. 99(4): 043905. doi: 10.1063/1.2173035
5. Kim J.Y. 2011. Micromechanical analysis of effective properties of magneto-electro-thermo-elastic multilayer composites. *International Journal of Engineering Science*. 49(9): 1001–1018. doi: 10.1016/j.ijengsci.2011.05.012
6. Kudimova A.B., Nadolin D.K., Nasedkin A.V., Oganessian P.A., Soloviev A.N. 2018. Finite element homogenization models of bulk mixed piezocomposites with granular elastic inclusions in ACELAN package. *Materials Physics and Mechanics*. 37(1): 25–33. doi: 10.18720/MPM.3712018_4
7. Nasedkin A.V., Nassar M.E. 2021. About anomalous properties of porous piezoceramic materials with metalized or rigid surfaces of pores. *Mechanics of Materials*. 162: 104040. doi: 10.1016/j.mechmat.2021.104040
8. Firooz S., Steinmann P., Javili A. 2021. Homogenization of composites with extended general interfaces: comprehensive review and unified modeling. *Applied Mechanics Reviews*. 73(4): 040802. doi: 10.1115/1.4051481
9. Odegard G.M. 2004. Constitutive modeling of piezoelectric polymer composites. *Acta Materialia*. 52(18): 5315–5330. doi: 10.1016/j.actamat.2004.07.037
10. Paul A.A., Nguyen Q.H., Shen W. 2024. 3D printed magnetostrictive polymer composites (MPCs) for wireless stress sensing. *Materials & Design*. 247: 113402. doi: 10.1016/j.matdes.2024.113402
11. Park J., Lee D.-G., Hur S., Baik J.M., Kim H.S., Song H.-C. 2023. A review on recent advances in piezoelectric ceramic 3D printing. *Actuators*. 12(4): 177. doi: 10.3390/act12040177
12. Haldkar R.K., Cherpakov A.V., Parinov I.A., Yakovlev V.E. 2022. Comprehensive numerical analysis of a porous piezoelectric ceramic for axial load energy harvesting. *Applied Sciences*. 12(19): 10047. doi: 10.3390/app121910047
13. Zhou D., Yang Y., Rao W.F. 2024. 3D printed magnetoelectric composites for personalized wearable multifunctional sensors. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 11(3): 1016–1024. doi: 10.1089/3dp.2022.0396
14. Xu K., Huang B., Zhang X., Ge S.S., Wei X. 2025. 3D printed flexible piezoelectric sensor with enhanced performance for gait recognition. *ACS Applied Electronic Materials*. 7(13): 6015–6026. doi: 10.1021/acsaelm.5c00653

15. Gong G., You Y., Shen H., Laghaei M., Wang Y., Li Y. 2025. 3D printing piezoelectric materials: Innovations, challenges, and future perspectives. *Materials Today Sustainability*. 32: 101257. doi: 10.1016/j.mtsust.2025.101257
16. Kapuria S., Kumari P. 2011. Three-dimensional isofield micromechanics model for effective electrothermoelastic properties of piezoelectric composites. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 6(1): 249–265. doi: 10.2140/jomms.2011.6.249
17. Nemat-Nasser S., Hori M. 1993. *Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials*. Amsterdam, Elsevier: 710 p.
18. Newnham R.E., Skinner D.P., Cross L.E. 1978. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Materials Research Bulletin*. 13(5): 525–536. doi: 10.1016/0025-5408(78)90161-7
19. Torquato S. 2002. *Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties*. New York, Springer: 701 p.
20. Michel J.C., Moulinec H., Suquet P. 1999. Effective properties of composite materials with periodic microstructure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 172(1–4): 109–143. doi: 10.1016/S0045-7825(98)00227-8
7. Nasedkin A.V., Nassar M.E. 2021. About anomalous properties of porous piezoceramic materials with metalized or rigid surfaces of pores. *Mechanics of Materials*. 162: 104040. doi: 10.1016/j.mechmat.2021.104040
8. Firooz S., Steinmann P., Javili A. 2021. Homogenization of composites with extended general interfaces: comprehensive review and unified modeling. *Applied Mechanics Reviews*. 73(4): 040802. doi: 10.1115/1.4051481
9. Odegard G.M. 2004. Constitutive modeling of piezoelectric polymer composites. *Acta Materialia*. 52(18): 5315–5330. doi: 10.1016/j.actamat.2004.07.037
10. Paul A.A., Nguyen Q.H., Shen W. 2024. 3D printed magnetostrictive polymer composites (MPCs) for wireless stress sensing. *Materials & Design*. 247: 113402. doi: 10.1016/j.matdes.2024.113402
11. Park J., Lee D.-G., Hur S., Baik J.M., Kim H.S., Song H.-C. 2023. A review on recent advances in piezoelectric ceramic 3D printing. *Actuators*. 12(4): 177. doi: 10.3390/act12040177
12. Haldkar R.K., Cherpakov A.V., Parinov I.A., Yakovlev V.E. 2022. Comprehensive numerical analysis of a porous piezoelectric ceramic for axial load energy harvesting. *Applied Sciences*. 12(19): 10047. doi: 10.3390/app121910047
13. Zhou D., Yang Y., Rao W.F. 2024. 3D printed magnetoelectric composites for personalized wearable multifunctional sensors. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 11(3): 1016–1024. doi: 10.1089/3dp.2022.0396
14. Xu K., Huang B., Zhang X., Ge S.S., Wei X. 2025. 3D printed flexible piezoelectric sensor with enhanced performance for gait recognition. *ACS Applied Electronic Materials*. 7(13): 6015–6026. doi: 10.1021/acsaelm.5c00653
15. Gong G., You Y., Shen H., Laghaei M., Wang Y., Li Y. 2025. 3D printing piezoelectric materials: Innovations, challenges, and future perspectives. *Materials Today Sustainability*. 32: 101257. doi: 10.1016/j.mtsust.2025.101257
16. Kapuria S., Kumari P. 2011. Three-dimensional isofield micromechanics model for effective electrothermoelastic properties of piezoelectric composites. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 6(1): 249–265. doi: 10.2140/jomms.2011.6.249
17. Nemat-Nasser S., Hori M. 1993. *Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials*. Amsterdam, Elsevier: 710 p.
18. Newnham R.E., Skinner D.P., Cross L.E. 1978. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Materials Research Bulletin*. 13(5): 525–536. doi: 10.1016/0025-5408(78)90161-7
19. Torquato S. 2002. *Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties*. New York, Springer: 701 p.
20. Michel J.C., Moulinec H., Suquet P. 1999. Effective properties of composite materials with periodic microstructure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 172(1–4): 109–143. doi: 10.1016/S0045-7825(98)00227-8

REFERENCES

1. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. 2008. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*. 103(3): 031101. doi: 10.1063/1.2836410
2. Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V. 2025. [Features of SH-wave propagation in a bimorphic piezoelectric/piezomagnetic plate made of functionally graded materials]. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2: 14–29. (In Russian). doi: 10.15593/perm.mech/2025.2.02
3. Soloviev A.N., Do B.T., Chebanenko V.A., Parinov I.A. 2022. Flexural vibrations of a composite piezoactive bimorph in an alternating magnetic field: applied theory and finite-element simulation. *Mechanics of Composite Materials*. 58(4): 471–482. doi: 10.1007/s11029-022-10043-0
4. Srinivas S., Li J.Y., Zhou Y.C., Soh A.K. 2006. The effective magnetoelectroelastic moduli of matrix-based multiferroic composites. *Journal of Applied Physics*. 99(4): 043905. doi: 10.1063/1.2173035
5. Kim J.Y. 2011. Micromechanical analysis of effective properties of magneto-electro-thermo-elastic multilayer composites. *International Journal of Engineering Science*. 49(9): 1001–1018. doi: 10.1016/j.ijengsci.2011.05.012
6. Kudimova A.B., Nadolin D.K., Nasedkin A.V., Oganesyan P.A., Soloviev A.N. 2018. Finite element homogenization models of bulk mixed piezocomposites with granular elastic inclusions in ACELAN package. *Materials Physics and Mechanics*. 37(1): 25–33. doi: 10.18720/MPM.3712018_4

Поступила 29.04.2026

Принята 04.08.2026