

Корнев Ю. В., Гилязова Р. Ф., Драч Е. А., Муромцев Д. Н., Майский А. В.,
Валиев Х. Х., Келбышева Е. С., Джага А. О.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНОНАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

Аннотация. Дисперснонаполненные полимерные композиты являются распространёнными конструкционными материалами, изделия из которых применяются во многих отраслях промышленности. Основными компонентами в составе данного класса композитов, которые определяют комплекс их физико-механических свойств, являются полимерная основа (полимерная/эластомерная матрица) и высокодисперсные (субмикро- и нано-) частицы упрочняющего наполнителя, распределённые в объёме полимерной матрицы [1]. В связи с этим, актуальными являются экспериментально-теоретические исследования, направленные на развитие методов количественной оценки параметров микроструктуры дисперснонаполненных эластомерных композитов, поиска взаимосвязи параметров микроструктуры и механических свойств данного класса материалов с целью направленного регулирования их физико-механических характеристик [2, 3]. В работе представлены результаты исследований эффектов упрочнения в дисперснонаполненных эластомерных композитах с применением в качестве наполнителей измельчённых частиц породы шунгит и частиц диоксида кремния, полученных из возобновляемого сырья. В отличие от известных эффектов упрочнения эластомерных композитов, полученных с применением химически синтезированных частиц наполнителя, в настоящей работе частицы получены по запатентованной технологии измельчения (до субмикро- и нано-размеров). Дается анализ эффектам упрочнения в эластомерных композитах с применением в качестве наполнителя измельчённых частиц в сравнении с химически синтезированными частицами углерода и диоксида кремния. Установлено, что определяющим фактором эффекта упрочнения в данных материалах является размер частиц дисперсного наполнителя. Дается анализ параметров микроструктуры образцов эластомерных композитов, изготовленных в соответствии с моделью Шкловского - де Жена [3], контролировался параметр θ . Установлено, что важной характеристикой микроструктуры образцов эластомерных композитов с одинаковым исходным размером частиц наполнителя является степень (качество) их диспергирования в эластомерной матрице. На основе проведённых исследований предложен метод количественной оценки качества диспергирования частиц наполнителя в объёме эластомерной/полимерной матрицы и предложен новый параметр A_k . Установлено, что параметр A_k коррелирует с рядом механических свойств эластомерных композитов (прочность, сопротивление истиранию [4], удельная работа деформации на разрушение образца, относительный

гистерезис и др.). Также приведены результаты исследований взаимосвязи параметров микроструктуры и механических свойств для дисперснонаполненных пластиков на основе полиэтилена (с частицами диоксида кремния) и эпоксидной смолы (с углеродными нанотрубками). Проведён анализ кривых ползучести, полученных в экспериментах по наноиндентированию для эластомерных композитов с различной микроструктурой. Для полученных в ходе эксперимента зависимостей были выбраны такие аппроксимирующие математические функции, параметры которых являются реальными вязкоупругими характеристиками материала. Была определена вязкостная характеристика (составляющая) материала, которая, связана с потерями энергии в образце при деформации. При анализе кривых ползучести применялась комбинированная модель из элементов Максвелла и Кельвина-Фойгта. Установлено, что ползучесть эластомерных композитов заметно зависит от дисперсности частиц наполнителя. Так, в случае добавления субмикрочастиц породы шунгит в состав композита существенно возрастает вязкостная составляющая η_2 (до 36 %), а добавка микрочастиц породы шунгит приводит к снижению значений упругой и вязкостной составляющей на 8 и 23% соответственно, по сравнению с эталонным образцом. Предложен метод оценки мгновенного и длительного модуля упругости эластомерных композитов по данным ползучести при наноиндентировании. Исследованы электрореологические свойства эластомерных композитов, наполненных микро- частицами полиимидов различного строения (два типа частиц). Установлены параметры микроструктуры (значения параметра A_k) данных композитов, при которых для исследованных образцов наблюдается максимальный рост (до десяти раз) значений действительной составляющей комплексного динамического модуля упругости при наведении внешнего электрического поля. При этом отмечается так же рост модуля потерь и некоторое снижение значений $\tan \delta$. Для указанных композитов установлено, что при снижении параметра A_k электрореологический эффект, как правило, возрастает. С применением предложенных методов и подходов разработаны эластомерные композиты с минимальными гистерезисными потерями, улучшенной износостойкостью и упруго-прочностными свойствами для возможного применения в шинной промышленности, а также, эластомерные композиты с улучшенными диссипативными свойствами для конструкций гасителей колебаний.

Ключевые слова: дисперснонаполненные эластомерные композиты, полимерные композиты, высокодисперсные частицы наполнители, сверхтонкое измельчение, эффекты упрочнения, структура композитов, параметры микроструктуры, электрореологические эластомеры, ползучесть эластомерных композитов, наноиндентирование, АСМ-микроскопия.

Корнев Юрий Витальевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; e-mail: yurikornev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5524-4289>; AuthorID: 559146

Гильязова Рената Фаритовна, младший научный сотрудник; e-mail: renata.gilyazova@gmail.com; AuthorID: 1302399

Драч Екатерина Анатольевна, младший научный сотрудник; e-mail: catherinedratch@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-1768-4021>; AuthorID: 1343784

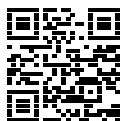
Муромцев Денис Николаевич, аспирант; e-mail: muromtsevdn@mail.ru

Майский Андрей Викторович, аспирант; e-mail: andrey.mayskiy@gmail.com

Валиев Хаммат Хафизович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; e-mail: hhvly@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7445-5177>; РИНЦ AuthorID: 160611

Келбышева Елена Сергеевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник; e-mail: kellena80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9611-6328>; РИНЦ AuthorID: 630257

Джага Артем Олегович, младший научный сотрудник; e-mail: art.dzhaga@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-0121-3259>; РИНЦ AuthorID: 1348767



для цитирования: Корнев Ю. В., Гилязова Р. Ф., Драч Е. А., Муромцев Д. Н., Майский А. В., Валиев Х. Х., Келбышева Е. С., Джага А. О. Экспериментально-теоретическое исследование влияния параметров микроструктуры на механические свойства дисперснонаполненных эластомерных и полимерных композитов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2026. № 2(68). С. 239–246. DOI: 10.37972/chgpu.2026.68.2.016. EDN: IPWSFH

Статья опубликована на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)*.

*Y. V. Kornev, R. F. Gilyazova, E. A. Dratch, D. N. Muromtsev, A. V. Maisky,
Kh. Kh. Valiev, E. S. Kelbysheva, A. O. Dzhaga*

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF DISPERSION-FILLED ELASTOMERIC AND POLYMER COMPOSITES

Institute of Applied Mechanics of the RAS, Moscow, Russia

Abstract. Particle-filled polymer composites are common structural materials applied in many industries. The main components of this class of composites, that determine their physical and mechanical properties, are the polymer base (polymer/elastomer matrix) and highly dispersed (submicro- and nano-) particles of reinforcing filler distributed throughout the polymer matrix [1]. Therefore, experimental and theoretical research aimed at developing methods for quantitatively assessing the microstructural parameters of particle-filled elastomer composites and identifying the relationship between microstructural parameters and mechanical properties of this class of materials for the purpose of targeted regulation of their physical and mechanical characteristics is relevant [2, 3]. This paper presents the results of studies of reinforcing effects in particle-filled elastomer composites applying milled shungite particles and silicon dioxide particles obtained from renewable raw materials as fillers. In contrast to the known strengthening effects of elastomeric composites obtained using chemically synthesized filler particles, in this study the particles were produced using a patented grinding technology (to submicron and nanoscale sizes). The strengthening effects in elastomeric composites using milled particles as filler are analyzed in comparison with chemically synthesized carbon and silicon dioxide particles. It was established that the primary factor in the strengthening effect in these materials is the particle size of the dispersed filler. An analysis of the microstructural parameters of elastomeric composite samples manufactured according to the Shklovsky-de Gennes model [3] is provided, with the θ parameter being controlled. It was established that an important characteristic of the microstructure of elastomeric composite samples with the same initial filler particle size is the degree (quality) of their dispersion in the elastomer matrix. Based on the conducted research, a method for quantitatively assessing the dispersion quality of filler particles within an elastomer/polymer matrix is proposed, along with a new parameter, A_k . It is established that A_k correlates with a number of mechanical properties of elastomer composites (strength, abrasion resistance [4], specific work of deformation at specimen failure, relative hysteresis, etc.). The results of studies examining the relationship between microstructure parameters and mechanical properties for dispersed-filled plastics based on polyethylene (with silicon dioxide particles) and epoxy resin (with carbon nanotubes) are also presented. Creep curves obtained in nanoindentation experiments for elastomer composites with different microstructures are analyzed. Approximating mathematical functions whose parameters represent the actual viscoelastic characteristics of the material were selected for the dependences obtained during the experiment. The viscosity characteristic (component) of the material, which

is associated with energy losses in the specimen during deformation, was determined. A combined model of Maxwell and Kelvin-Voigt elements was used to analyze the creep curves. It was found that the creep of elastomeric composites significantly depends on the dispersity of the filler particles. For example, adding shungite submicroparticles to the composite significantly increases the viscosity component η_2 (up to 36%), while the addition of shungite microparticles leads to a decrease in the elastic and viscous components by 8% and 23%, respectively, compared to the reference sample. A method for estimating the instantaneous and long-term elastic modulus of elastomeric composites based on nanoindentation creep data is proposed. The electrorheological properties of elastomeric composites filled with polyimide microparticles of different structures (two types of particles) were studied. Microstructural parameters (the A_k parameter values) of these composites were determined, at which the maximum increase (up to tenfold) in the real component of the complex dynamic modulus of elasticity was observed for the studied samples upon application of an external electric field. An increase in the loss modulus and a slight decrease in $\tan \delta$ values were also observed. For these composites, it was found that, as the A_k parameter decreased, the electrorheological effect generally increased. Applying proposed methods and approaches, elastomer composites with minimal hysteresis losses, improved wear resistance, and elastic-strength properties were developed for potential application in the tire industry, as well as elastomer composites with improved dissipative properties for vibration damper designs.

Keywords: Dispersed-filled elastomer composites, polymer composites, highly dispersed filler particles, ultrafine grinding, strengthening effects, composite structure, microstructure parameters, electrorheological elastomers, creep of elastomer composites, nanoindentation, AFM microscopy.

Yuri V. Kornev, Ph.D., senior researcher; e-mail: yurikornev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5524-4289>; AuthorID: 559146

Renata F. Gilyazova, junior researcher; e-mail: renata.gilyazova@gmail.com; AuthorID: 1302399

Ekaterina A. Dratch, junior researcher; e-mail: catherinedratch@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-1768-4021>; AuthorID: 1343784

Denis N. Muromtsev, graduate student; e-mail: muromtsevdn@mail.ru

Andrey V. Maisky, graduate student; e-mail: andrey.mayskiy@gmail.com

Khammat Kh. Valiev, Ph.D., senior researcher; e-mail: hhvly@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7445-5177>; AuthorID: 160611

Elena S. Kelbysheva, Ph.D., senior researcher; e-mail: kellena80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9611-6328>; AuthorID: 630257

Artem O. Dzhaga, junior researcher; e-mail: art.dzhaga@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-0121-3259>; AuthorID: 1348767



to cite this article: Kornev Y. V., Gilyazova R. F., Dratch E. A., Muromtsev D. N., Maisky A. V., Valiev Kh. Kh., Kelbysheva E. S., Dzhaga A. O. Experimental and theoretical study of the influence of microstructure parameters on the mechanical properties of dispersion-filled elastomeric and polymer composites // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I. Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2026. No 2(68). p. 239–246. DOI: 10.37972/chgpu.2026.68.2.016

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Ю. В. Корневу принадлежит разработка концепции, формулировка целей и задач исследования, разработка методов и подходов при проведении эксперимента и анализе полученных данных, организация работ, наблюдение за проведением исследования, проведение экспериментов, написание текста статьи; Р. Ф. Гилязовой принадлежит проведение экспериментов по оценке упруго-прочностных и гистерезисных свойств, износостойкости, ползучести при наноиндентировании эластомерных композитов с техническим углеродом, анализ литературных источников, сбор данных, апробация методик, проведение статистического анализа экспериментальных данных, построение графиков, диаграмм и иллюстраций; Е. А. Драч принадлежит получение изображений частиц полиимидов и структуры эластомерных композитов, наполненных полиимидами, с применением оптической микроскопии, проведение эксперимента по оценке ползучести при наноиндентировании эластомерных композитов с частицами полиимидов, проведение статистического анализа экспериментальных данных, построение графиков, диаграмм и иллюстраций; Д. Н. Муромцеву принадлежит изготовление образцов эластомерных композитов с частицами технического углерода, определение оптимальных технологических параметров изготовления образцов, работа на смесителе Haake Rheomix, работа с исследовательскими экспериментальными данными: сбор, обработка, валидация, а также проверка воспроизводимости результатов исследования; А. В. Майскому принадлежит разработка и применение программ, кода, вычислительных инструментов, применённых в ходе работы для анализа кривых ползучести (Python, Wolfram Mathematica и др.); Х. Х. Валиеву принадлежит получение изображений структуры образцов эластомерных композитов методом атомно-силовой микроскопии с нанометровым разрешением; Е. С. Келбышевой принадлежит синтез частиц полиимидов различного строения, характеристика частиц полиимидов; А. О. Джага принадлежит изготовление образцов эластомерных композитов с частицами полиимидов, электрореологические исследования эластомерных композитов на динамическом реометре Haake Rheostress RS 150 с наведённым внешним электрическим полем.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Грант РФФИ проект № 15-38-70040, НИОКТР № 124041900006-3, 124112800012-2, Грант РНФ 22-19-00678.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. Yuriy V. Kornev was responsible for concept development, formulation of research goals and objectives, development of methods and approaches for conducting the experiment and analyzing the obtained data, organization of work, study supervision, experimentation, and manuscript writing. Renata F. Gilyazova was responsible for experiments to evaluate the elastic-strength and hysteresis properties, wear resistance, and creep during nanoindentation of elastomeric composites with carbon black, literature review, data collection, and method validation, and statistical analysis of the experimental data, creation of graphs, diagrams, and illustrations. Ekaterina A. Drach was responsible for obtaining images of polyimide particles and the structure of elastomeric composites filled with polyimides using optical microscopy, experiments to evaluate creep during nanoindentation of elastomeric composites with polyimide particles, statistical analysis of the experimental data, and creation of graphs, diagrams, and illustrations. Denis N. Muromtsev was responsible for fabrication of elastomer composite samples with carbon black particles, determination of optimal process parameters for sample fabrication, use of a Haake Rheomix mixer, and experimental research data collection, processing, validation, and verification of the reproducibility of the results. Andrey V. Maisky was responsible for development and implementation of programs, code, and computational tools used in the study to analyze creep curves (Python, Wolfram Mathematica, etc.). Khammat Kh. Valiev was responsible for obtaining images of the structure of elastomer composite samples by atomic force microscopy with nanometer resolution. Elena S. Kelbysheva was responsible for synthesis of polyimide particles with various structures and characterization of polyimide particles. Artem O. Dzhaga was responsible for fabrication of elastomer composite samples with polyimide particles and electrorheological studies of elastomeric composites using a Haake Rheostress RS 150 dynamic rheometer with an induced external electric field.

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. Grant of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 15-38-70040, R&D No. 124041900006-3, 124112800012-2, Grant of the Russian Science Foundation 22-19-00678.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яновский Ю. Г. Наномеханика и прочность композиционных материалов. Москва: ИПРИМ РАН, 2008. 179 с.
2. Козлов Г. В., Яновский Ю. Г., Карнет Ю. Н. Физико-механические свойства наноструктурированных полимерных композитов в рамках фрактального и мультифрактального описаний. Москва: OneBook, 2013. 341 с.
3. Симонов-Емельянов И. Д. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов. Санкт-Петербург: ЦОП «Профессия», 2024. 280 с.
4. Корнев Ю. В., Гилязова Р. Ф., Валиев Х. Х. и др. Оценка влияния параметров микроструктуры на износостойкость эластомерных композитов // Трение и износ. 2026. Т. 47, № 2. С. 175–183. DOI: 10.32864/0202-4977-2026-47-2-175-183.

REFERENCES

1. Yanovsky Y. G. Nanomechanics and Strength of Composite Materials. Moscow: Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, 2008. 179 p. (in Russian).
2. Kozlov G. V., Yanovsky Y. G., Karnet Y. N. Physical and Mechanical Properties of Nanostructured Polymer Composites within Fractal and Multifractal Descriptions. Moscow: OneBook, 2013. 341 p. (in Russian).
3. Simonov-Emel'yanov I. D. Structure and Properties of Disperse-Filled Polymer Composite Materials. St. Petersburg: Professiya, 2024. 280 p. (in Russian).
4. Kornev Y. V., Gilyazova R. F., Valiev K. K., et al. Evaluation of the Effect of Microstructural Parameters on the Wear Resistance of Elastomeric Composites // Friction and Wear. 2026. Vol. 47, no. 2. P. 175–183. DOI: 10.32864/0202-4977-2026-47-2-175-183. (in Russian).