

«Механика»

Научная статья

УДК 539.37:620.17

DOI: 10.17072/1993-0550-2023-4-52-59

Исследование механического поведения эластомерных нанокомпозитов в условиях двухосного нагружения

Олег Константинович Гаришин¹, Владимир Васильевич Шадрин²

^{1,2}Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

¹gar@icmm.ru

²shadrin@icmm.ru

Аннотация. Проведены двухосные циклические испытания эластомерных композитов, наполненных зернистыми наночастицами (технический углерод и детонационные наноалмазы), нано-пластинками (малослойный графен) и нановолокнами (многостенные углеродные нанотрубки). Эксперименты проводились на уникальном четырехвекторном испытательном стенде Zwick/Roell с использованием специальных крестообразных образцов веерного типа. Исследования показали, что наибольшее влияние на изменение механических свойств материала в процессе циклического деформирования по взаимно перпендикулярным направлениям оказывают нановолокна (углеродные нанотрубки). Именно они, благодаря своей длине и гибкости, наиболее эффективно участвуют в перестройке микроструктуры, формируя тем самым макроскопическое поведение материала.

Ключевые слова: эластомерные нанокомпозиты; детонационные наноалмазы, малослойный графен, углеродные нанотрубки; двухосные механические испытания; циклические деформации; упругость; вязкоупругость

Для цитирования: Гаришин О. К., Шадрин В. В. Исследование механического поведения эластомерных нанокомпозитов в условиях двухосного нагружения // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2023. Вып. 4(63). С. 52–59. DOI: 10.17072/1993-0550-2023-4-52-59.

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственного задания ПФИЦ УрО РАН, регистрационный номер: АААА-А20-120022590044-7 (2020).

Статья поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 05.09.2023; принята к публикации 28.11.2023.

«Mechanics»

Research article

Studies of Elastomeric Nanocomposites Mechanical Behavior Under Biaxial Loading

Oleg K. Garishin¹, Vladimir V. Shadrin²

^{1,2}Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

¹gar@icmm.ru

²shadrin@icmm.ru



Эта работа © 2023 Гаришин О.К., Шадрин В.В. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Abstract. Biaxial cyclic tests of elastomeric composites filled with granular nanoparticles (carbon black and detonation nanodiamonds), nanoplates (few-layer nanographene) and nanofibers (multi-walled carbon nanotubes) have been carried out. The experiments were carried out on Zwick/Roell's unique four-vector test stand using special fan-type cruciform specimens. Studies have shown that carbon nanotubes have the greatest influence on the change in the mechanical properties of a material during cyclic deformation in mutually perpendicular directions. It is they, due to their length and flexibility, that most effectively participate in the restructuring of the microstructure, thereby forming the macroscopic behavior of the material.

Keywords: *elastomeric nanocomposites; detonation nanodiamonds; few-layer nanographene; carbon nanotubes; biaxial mechanical tests; cyclic deformations; elasticity; viscoelasticity*

For citation: *Garishin O. K., Shadrin V. V. Studies of Elastomeric Nanocomposites Mechanical Behavior Under Biaxial Loading. Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2023;4(63):52-59. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2023-4-52-59.*

Acknowledgments: the work was supported by the PFIC Ural RAS (State Assignment, registration number AAAA-A20-120022590044-7, 2020).

The article was submitted 01.08.2023; approved after reviewing 05.09.2023; accepted for publication 28.11.2023.

Введение

Наполненные эластомеры представляют собой иерархические структурно неоднородные системы со сложным механическим поведением. Они способны деформироваться без разрушения на десятки и даже сотни процентов, демонстрируя при этом хорошо выраженные нелинейно упругие и вязкоупругие свойства. Для них также характерны различные механические эффекты, связанные с перестройкой внутренней структуры материала при его деформировании – накопление внутренней поврежденности, возникновение наведенной механической анизотропии вследствие переориентации полимерных макромолекул и изменения взаимного расположения частиц наполнителя, эффект Маллинза и т.д. Поэтому для изучения механического поведения таких материалов требуются нетривиальные механические эксперименты, которые позволяют выявить все эти особенности. Это сложные циклические траектории нагружения с различной амплитудой по напряжениям и деформациям, остановками на релаксацию и т.д.

Кроме того, из практики хорошо известно, что при эксплуатации в конструкции такие материалы зачастую ведут себя далеко не так, как это наблюдалось при стандартных обычных испытаниях образцов. Использование двухосной машины позволяет существенно приблизиться к решению этой проблемы, задавая сложные траектории нагружения по разным осям, то есть появляется возможность испытывать образцы в условиях, более близких к реальности.

В работе представлена новая экспериментальная методика исследования механических свойств наполненных эластомеров в случае сложного двухосного нагружения. В ее основе лежит циклическое нагружение образцов по двум осям (последовательно или одновременно). При этом на каждом цикле задается своя индивидуальная амплитуда по деформациям и делаются временные остановки на релаксацию при смене направления движения захватов. Методика позволяет за одно испытание получить комплексные данные об упругих, вязких и пластических свойствах полимера, что существенно снижает трудоемкость исследований. Данный подход хорошо зарекомендовал себя для одноосных испытаний [1, 2], поэтому его обобщение на двухосный случай вполне оправдано и представляет серьезный научный интерес.

1. Описание установки для двухосных механических испытаний

Следует отметить, что количество публикаций по двухосным механическим испытаниям очень мало. Дело в том, что в мире существует всего несколько таких установок, причем принадлежат они коммерческим фирмам, которые не стремятся к опубликованию полученных на них результатов. Что касается России, то в Казанском научном центре РАН также имеется установка для двухосных механических испытаний, но она предназначена для исследования металлов [3, 4]. Она способна создавать очень большие усилия на захватах, но сам их ход движения недостаточен для исследования "мягких" конечно деформируемых полимеров.

В Пермском государственном национальном исследовательском университете имеется единственный в России четырехвекторный испытательный стенд Zwick/Roell, изготовленный по специальному заказу в ФРГ (рис. 1). Главная особенность этой уникальной установки в том, что на ней можно проводить механические испытания по двум взаимно перпендикулярным направлениям одновременно, причем независимо по каждой из осей. Стенд обладает широкими возможностями по программированию сложных траекторий нагружения: монотонное и циклическое растяжение – сжатие, изменение скорости деформирования на любом этапе приложения нагрузки, остановки на релаксацию в любой момент цикла и т.д.

Zwick/Roell имеет две взаимно перпендикулярные траверсы, на которых размещено по 2 независимо программируемых захвата с максимальным ходом 400 мм и скоростью перемещения от 0.001 до 7500 мм/мин (то есть полный ход равен 800 мм, а максимальная скорость деформирования 7500 мм/мин). Наибольшее усилие на захвате составляет 2500 Н. То есть, эта машина практически идеально подходит для испытания относительно "мягких" эластомерных материалов, способных деформироваться на десятки и сотни процентов.

В комплект оборудования стенда входит также видеоэкстензометр videoXtens. С его помощью можно бесконтактным образом измерять деформации непосредственно в рабочей части образца по перемещениям заранее нанесенных меток. Это позволяет значительно повысить точность измерений и исключить влияние искажающих факторов, связанных с формой образца и его закреплением в захватах.

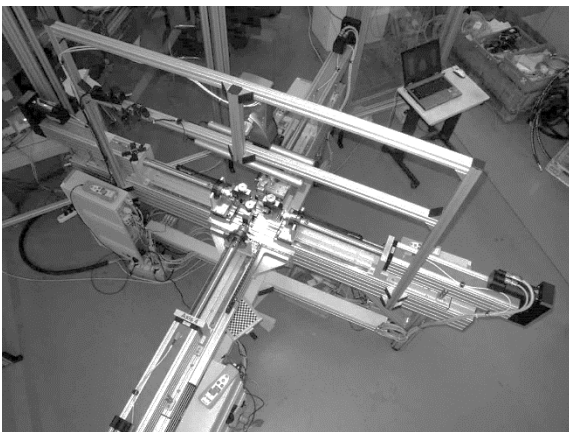


Рис. 1. Четырехвекторный испытательный стенд Zwick/Roell (общий вид)

Для двухосных экспериментов использовались специальные крестообразные образцы веерного типа (рис. 2), форма и размеры которых были определены на основе проведенных в ИМСС УрО РАН теоретических расчетов [3].

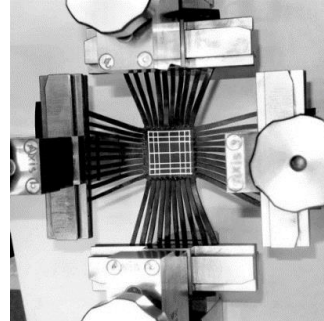


Рис. 2. Крестообразный образец для двухосных испытаний

Они оптимальны с точки зрения получения однородных полей деформаций и напряжений на рабочей части образца и минимизации размеров тяг (нерабочей части). Рабочая зона имела форму квадрата со стороной 35 мм. С каждой стороны зоны имелось по 10 стержнеобразных тяг из того же материала что и образец (длина тяги 45 мм, ширина 2 мм).

2. Материалы для испытаний

Основным объектом исследований были эластомерные нанокомпозиты на основе бутадиен-стирольного каучука (БСК) СКМС-30АРКМ-15 (матрица) и различных нанонаполнителей: Это технический углерод (ТУ), детонационные наноалмазы (ДНА), малослойный графен (МСГ), а также многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ). Материалы для испытаний готовились в НИИ синтетического каучука (Санкт-Петербург).

СКМС-30АРКМ-15 это хорошо известный эластомер, который производится в промышленных масштабах. Его, например, широко используют в автомобильных шинах и различных резиновых амортизаторах (т.е. в достаточно сложных и тяжелых эксплуатационных условиях).

В качестве 3D наполнителя брали промышленный технический углерод марки N-330 с размером частиц 28-36 нм и удельной поверхностью 82 м²/г. Это один из наиболее распространенных на сегодня нанонаполнителей. Введение ТУ в эластомер позволяет существенно улучшить его механические характеристики (особенно прочность и деформатив-

ность) [6, 7]. Сегодня ТУ чаще всего используют в комплексе совместно с другими наполнителями [8–10].

Вторым 3D наполнителем были детонационные наноалмазы. ДНА сочетают в себе наноразмерность (4–6 нм), химическую стойкость ядра и химическую активность периферической оболочки. Эти наполнители в настоящее время достаточно широко используются при производстве наполненных эластомеров [5, 11].

2D наполнителем служил малослойный графен (МСГ), который получали по разработанной авторами из НИИСК оригинальной методике [12]. Она базируется на СВС синтезе графеновых наноструктур из гидролизного лигнина — природного биополимера, являющегося отходом деревообрабатывающей промышленности. Характерный размер частиц малослойного графена составлял порядка 100–300 нм, удельная поверхность — 499 м²/г. По своему виду они представляют собой агломераты из хаотично соединенных нанопластинок.

В качестве 1D наполнителя использовали многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) (изготовитель Институт Катализа СО РАН, Новосибирск). Характерные размеры нанотрубок по данным производителя: диаметр равнялся примерно 10–12 нм, средняя длина — от 30 до 40 мкм, а удельная поверхность — 260±15 м²/г. Число вложенных слоев (стенок) варьировалось от 5 до 15.

Кроме того, в качестве 1D также использовались их модифицированные с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза варианты (СВС МУНТ). СВС обработка позволила существенно улучшить их дисперсность и убрать нежелательные неорганические примеси [13].

3. Эксперимент и дискуссия

Все образцы испытывали по одной и той же программе: 1-й и 2-й циклы — деформирование по оси X; 3-й и 4-й — по оси Y; 5-й и 6-й — повторное нагружение по оси X. На каждом цикле производились следующие действия:

- 1) растяжение до деформации $\varepsilon=50\%$ и выдержка 10 мин;
- 2) полная разгрузка образца и снова выдержка на 10 мин.

Скорость деформирования на обоих этапах была постоянной и равнялась 25 %/мин.

Результаты испытаний представлены на рис. 3–8. По оси ординат отложено условное напряжение σ^0 (сила, отнесенная к начальной

площади сечения рабочей части образца), по оси абсцисс — деформация ε . Сплошные линии соответствуют первым двум циклам нагружения (деформирование по оси X), штриховые — 3 и 4 циклам (деформирование по Y), пунктирные — 5 и 6 циклы (повторное деформирование по X).

Следует отметить, что во всех экспериментах первые циклы нагружения по каждой оси (1, 3 и 5) всегда лежали выше или совпадали со вторыми (2, 4 и 6 соответственно).

На рис. 3 представлены результаты циклических двухосных испытаний для ненаполненного БСК. Все деформационные кривые как при нагружении "вдоль" по оси X, так и "поперек" по оси Y практически совпали. Гистерезисные потери и остаточные деформации выражены слабо. То есть, в чистом виде этот материал можно считать упругим и изотропным.

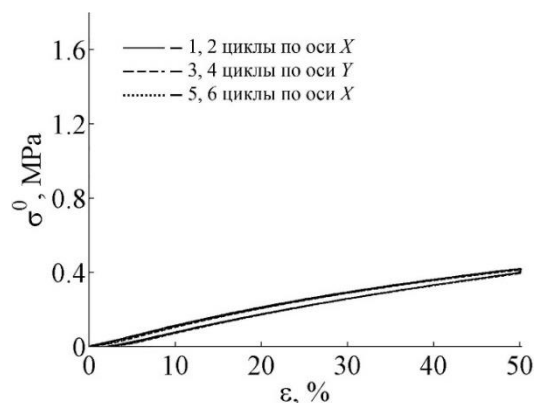


Рис. 3. Двухосные циклические испытания ненаполненного БСК

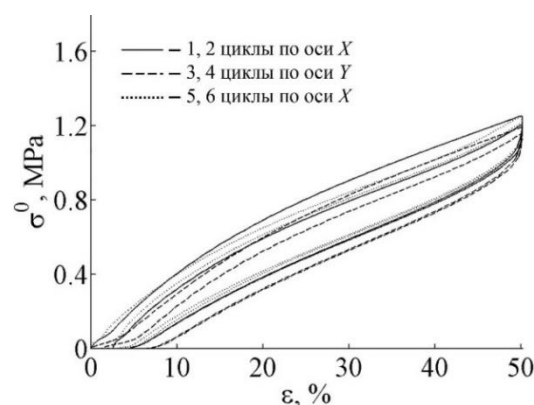


Рис. 4. Двухосные циклические испытания БСК наполненного 50 м.ч. ТУ

Иная картина наблюдается, если добавить в него 3D наполнитель в виде технического углерода. На рис. 4 хорошо видно, что при вводе в БСК 50 м.ч. ТУ происходит суще-

ственное увеличение жесткости системы (максимальное напряжение увеличивается в ~ 3.5 раза) и гистерезисных потерь (материал становится вязкоупругим). Появилась незначительная наведенная анизотропия механических свойств (т.е. изменение свойств изначально изотропного материала при его деформировании в разных направлениях). Циклы по осям X и Y не сильно различаются.

На рис. 5–8 показаны результаты циклических испытаний эластомерных композитов с двойным наполнителем – к 43 м.ч. технического углерода добавляли по 7 м.ч. ДНА, МСГ, МУНТ и СВС МУНТ. То есть все композитные системы имели одинаковую массовую концентрацию дисперсной фазы. Это было сделано для удобства сравнения результатов экспериментов и позволило вычленить влияние типа наполнителя (а не его количества).

Замена 7 м.ч. ТУ на 7 м.ч. детонационных наноалмазов (тоже 3D наполнитель) вызвала повышение общей жесткости композитной системы примерно на 10–15 % (рис. 5). Вязкие свойства (гистерезис) изменились незначительно. Но наведенная механическая анизотропия оказалась более выраженной – 5-й и 6-й циклы (повторно по оси X) лежали ниже. Предельные напряжения при $\epsilon=50\%$ снизились на $\approx 15\%$.

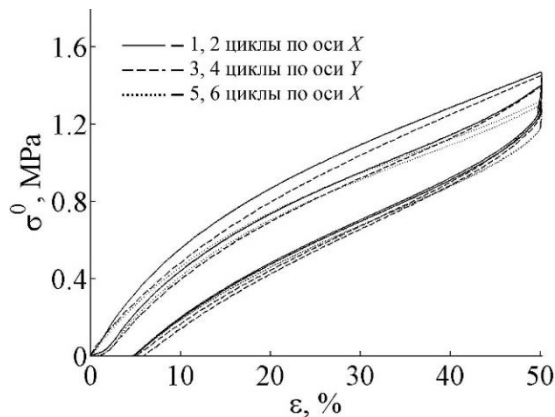


Рис. 5. Двухосные циклические испытания БСК наполненного 43 м.ч. ТУ и 7 м.ч. ДНА

Изменения в механическом поведении материала при добавлении 2D наполнителя в виде частиц малослойного графена вместо ДНА оказались практически незаметными (рис. 6). То есть, влияние 3D и 2D частиц примерно одного порядка.

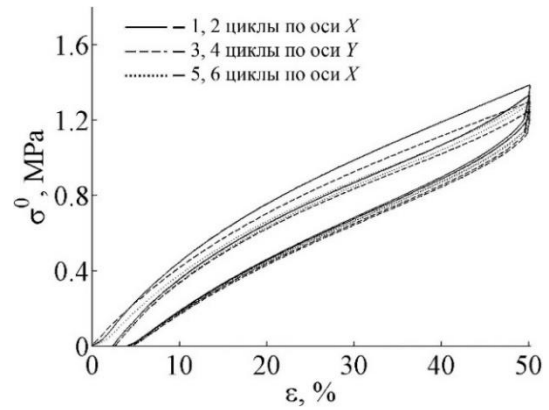


Рис. 6. Двухосные циклические испытания БСК наполненного 43 м.ч. ТУ и 7 м.ч. МСГ

Иная картина складывается при вводе в эластомер углеродных нанотрубок. На рис. 7 представлены результаты испытаний для композитов, содержащих ТУ и немодифицированные МУНТ. Хорошо видно, что если жесткость материала оказалась сопоставимой с композитами, содержащими ДНА и МСГ (см. рис. 5–6), то вязкие свойства стали значительно более выраженными (площадь гистерезиса выросла примерно в 1.5–2 раза). Наведенная механическая анизотропия также выросла.

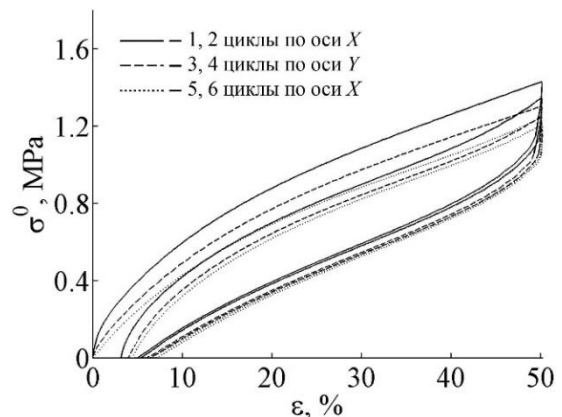


Рис. 7. Двухосные циклические испытания БСК наполненного 43 м.ч. ТУ и 7 м.ч. МУНТ

Наибольший эффект наблюдался при вводе в эластомерный композит модифицированных нанотрубок – СВС МУНТ (рис. 8), по сравнению с вариантом наполнения для 50 м.ч. ТУ (рис. 4).

В этом случае максимальные напряжения возросли почти в полтора раза по сравнению с вариантом для 50 м.ч. ТУ (рис. 4). Вязкие потери выросли более чем в два раза.

Наведенная анизотропия в данном материале оказалась максимальной по сравнению с 2D и 3D наполнителями.

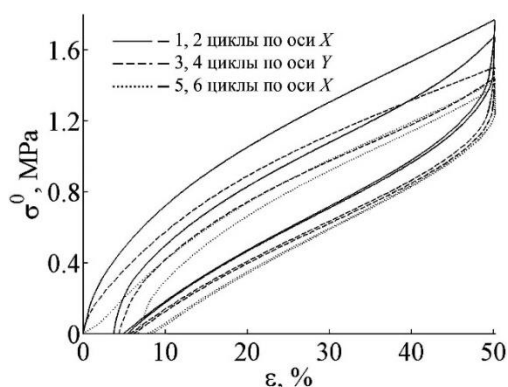


Рис. 8. Двухосные испытания БСК наполненного 43 м.ч. ТУ и 7 м.ч. СВС МВНТ

По мнению авторов, это связано с тем, что длинные и гибкие нановолокна намного эффективнее влияют на ориентационные процессы в микроструктуре наполненного эластомера при его деформировании по сравнению 2D и 3D наполнителями. Как показывает сравнение графиков на рис. 7 и 8, чем выше дисперсность и гибкость этих волокон, тем данные механические эффекты выражены сильнее.

Заключение

Двухосные циклические испытания эластомерных композитов, наполненных зернистыми, пластинчатыми и волокнистыми наночастицами показали, что наибольшее влияние на изменение механических свойств материала в процессе циклического деформирования по взаимно перпендикулярным направлениям оказывают нановолокна (углеродные нанотрубки). Именно они, благодаря своей длине и гибкости, наиболее эффективно участвуют в перестройке микроструктуры, формируя тем самым макроскопическое поведение материала.

Список источников

1. Garishin O.K., Shadrin V.V., Svistkov A.L., Sokolov A.K., Stockelhuber W.K. Visco-elastic-plastic properties of natural rubber filled with carbon black and layered clay nanoparticles. Experiment and simulation // Polymer Testing. 2017. Vol. 63. P. 133–140. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.002>.

2. Shadrin V.V., Svistkov A.L., Mokhireva K.A., Garishin O.K. Peculiarities of using dumbbell specimens made of elastomeric materials subject to finite deformation in complex loading tests // J. Letters on Materials, 2023 Vol. 13, № 1. P. 56–61. URL: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2023-1-56-61>.
3. Shlyannikov V. N., Zakharov A. P. Multiaxial crack growthrate under variable T-stresses // Engineering Fracture Mechanics. 2014. Vol. 123. P. 86–89.
4. Shlyannikov V. N., Tumanov A. V., Zakharov A. P., Gerasimenko A. A. Surface crack growth subjected to bendings and biaxial tension-compression // Frattura ed Integra Strutturale. 2016. Vol. 35. P. 257–267.
5. Mokhireva K. A., Svistkov A. L., Solod'ko V. N., Komar L. A., Stockelhuber K. W. Experimental analysis of the effect of carbon nanoparticles with different geometry on the appearance of anisotropy of mechanical properties in elastomeric composites // Polymer Testing. 2017. Vol. 59. P. 46–54. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.10188>.
6. Kraus G. Reinforcement of elastomers by carbon black // Rubber Chemistry and Technology. 1978. Vol. 51, № 1. P. 297–321.
7. Jovanovich V., Smaržija-Jovanovich S., Budinski-Simendich J., Markovich G., Marinović-Cincovich M. Composites based on carbon black reinforced NBR/EPDM rubber blends // Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 45(1). P. 333–340. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.020>.
8. Gao J., He Y., Gong X., Xu J. The role of carbon nanotubes in promoting the properties of carbon black-filled natural rubber/butadiene rubber composites // Results in Physics. 2017. Vol. 7. P. 4352–4358. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2017.09.044>.
9. Garishin O. K., Shadrin V. V., Svistkov A. L., Sokolov A. K., Stockelhuber W. K. Visco-elastic-plastic properties of natural rubber filled with carbon black and layered clay nanoparticles Experiment and simulation // Polymer Testing. 2017. Vol. 63. P. 133–140. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.002>.
10. Negri R. B. P., da Silva A. H. M. F.T., de Sousa A. M. F., da Silva A. L. N., da Rocha E. B. D. Improved mechanical and rheological behavior of nitrile rubber reinforced with multi-walled carbon nanotubes and carbon black dual-

- filler system // *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 26. P. 101884(110). URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101884>.
11. Karami P., Khasraghi S., Hashemi M., Rabiei S., Shojaei A. Polymer/nanodiamond composites – a comprehensive review from synthesis and fabrication to properties and applications // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2019. Vol. 269. P. 122–151. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2019.04.006>.
 12. Voznyakovskii A. P., Neverovskaya A. Yu., Otvalko Ja. A., Gorelova E. V., Zabelina A. N., Lebedev S. V. Facile synthesis of 2D carbon structures as a filler for polymer composites // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2018. Vol. 9, № 1. P. 125–128. URL: <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2018-9-1-125-128>.
 13. Возняковский А. П., Неверовская А. Ю., Меленевская Е. Ю., Чубарова Е. В., Кутин А. А., Суханова Т. Е. Особенности распределения одностенных углеродных нанотрубок в матрице полистирола // *Нанотехнологии: наука и производство*. 2018. № 4. P. 64–72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37256288>.
- ### References
1. Garishin O.K., Shadrin V.V., Svistkov A.L., Sokolov A.K., Stockelhuber W.K. Visco-elastic-plastic properties of natural rubber filled with carbon black and layered clay nanoparticles. Experiment and simulation. *Polymer Testing*. 2017;63:133-140. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.002>.
 2. Shadrin V.V., Svistkov A.L., Mokhireva K.A., Garishin O.K. Peculiarities of using dumbbell specimens made of elastomeric materials subject to finite deformation in complex loading tests. *J. Letters on Materials*. 2023; 13(1):56–61. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2023-1-56-61>.
 3. Shlyannikov V. N., Zakharov A. P. Multiaxial crack growth rate under variable T-stresses. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014;123:86–89.
 4. Shlyannikov V. N., Tumanov A. V., Zakharov A. P., Gerasimenko A. A. Surface crack growth subjected to bendings and biaxial tension-compression. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016;35:257–267.
 5. Mokhireva K. A., Svistkov A. L., Solod'ko V. N., Komar L. A., Stockelhuber K. W. Experimental analysis of the effect of carbon nanoparticles with different geometry on the appearance of anisotropy of mechanical properties in elastomeric composites. *Polymer Testing*. 2017;59:46–54. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101888>.
 6. Kraus G. Reinforcement of elastomers by carbon black. *Rubber Chemistry and Technology*. 1978;51(1):297–321.
 7. Jovanovich V., Smaržija-Jovanovich S., Budinski-Simendich J., Markovich G., Marinović-Cincovich M. Composites based on carbon black reinforced NBR/EPDM rubber blends. *Composites Part B: Engineering*. 2013;45(1):333–340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.020>.
 8. Gao J., He Y., Gong X., Xu J. The role of carbon nanotubes in promoting the properties of carbon black-filled natural rubber/butadiene rubber composites. *Results in Physics*. 2017;7:4352–4358. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2017.09.044>.
 9. Garishin O. K., Shadrin V. V., Svistkov A. L., Sokolov A. K., Stockelhuber W. K. Visco-elastic-plastic properties of natural rubber filled with carbon black and layered clay nanoparticles Experiment and simulation. *Polymer Testing*. 2017;63:133–140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.002>.
 10. Negri R. B. P., da Silva A. H. M. F.T., de Sousa A. M. F., da Silva A. L. N., da Rocha E. B. D. Improved mechanical and rheological behavior of nitrile rubber reinforced with multi-walled carbon nanotubes and carbon black dual-filler system. *Materials Today Communications*. 2021;(26):101884(110). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101884>.
 11. Karami P., Khasraghi S., Hashemi M., Rabiei S., Shojaei A. Polymer/nanodiamond composites – a comprehensive review from synthesis and fabrication to properties and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2019;(269):122–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2019.04.006>.
 12. Voznyakovskii A. P., Neverovskaya A. Yu., Otvalko Ja. A., Gorelova E. V., Zabelina A. N., Lebedev S. V. Facile synthesis of 2D carbon structures as a filler for polymer composites. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2018;9(1):125–128. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2018-9-1-125-128>.
 13. Voznyakovskij A.P., Neverovskaya A. YU., Melenevskaya E.YU., Chubarova E.V., Kutin A.A., Suhanova T.E. Osobennosti raspredeleniya odnostennyh uglerodnyh nanotrubok v matrice polistirola. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo*. 2018;(4):64–72. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37256288> (In Russ.).

Информация об авторах:

О. К. Гаришин – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН (614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1), AuthorID 5880;

В. В. Шадрин – ведущий инженер, Институт механики сплошных сред УрО РАН (614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1); инженер, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15), AuthorID 10927.

Information about the authors:

O. K. Garishin – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS (1, Ac. Koroleva St., Perm, Russia, 614013), AuthorID 5880;

V. V. Shadrin – Leading Engineer, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS (1, Ac. Koroleva St., Perm, Russia, 614013); Engineer, Perm State University (15, Bukireva St., Perm, Russia, 614068), AuthorID: 10927.