

УДК 53.081; 620.17
PACS 81.05.Lg

Динамо-механический анализ резин с минеральными наполнителями в сравнении с наполнителями, широко распространенными в шинной промышленности

О.К. Гаришин[†], А.Ю. Беляев[‡]

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

[†] gar@icmm.ru

[‡] belyaev@icmm.ru

Работа посвящена исследованию нанокompозитов на основе синтетического (бутадиен-стирольного) каучука с различными, ранее не используемыми, наполнителями. Исследуется вопрос применения композитов с альтернативными наполнителями. Представлены результаты экспериментальных исследований термо-вязко-упругих свойств эластомерных композитов на основе бутадиен-стирольного каучука и различных минеральных микро- и нанонаполнителей, а также продуктов пиролиза органических отходов пищевого производства. Все образцы были испытаны на динамо-механическом анализаторе (ДМА). Рассматриваемые в работе наполненные эластомеры применяются в основном в шинной промышленности для улучшения эксплуатационных свойств шин. Для каждого из композитов построены температурные и частотные зависимости динамического модуля и модуля потерь. Частотные характеристики соответствовали реальному диапазону скоростей вращения автомобильного колеса, а температура варьировалась от -50 до $+100^\circ\text{C}$. Проведен сравнительный анализ полученных результатов. В работе не исследовался вопрос о структурных механизмах работы наполнителя. Предполагается, что принципы работы исследуемых наполнителей на уровне структуры схожи с описанными во множестве работ для классических наполнителей. По результатам испытаний сделан вывод об условиях эксплуатации, предпочтительных для рассмотренных материалов.

Ключевые слова: наполненные резины; шины; минеральные микро- и нанонаполнители; прочность; термо-вязко-упругость; динамо-механический анализ

Поступила в редакцию 05.10.2021; после рецензии 01.11.2021; принята к опубликованию 09.11.2021

Dynamo-mechanical analysis of rubbers with mineral fillers in comparison with fillers widely used in the tire industry

O. K. Garishin[†], A. Yu. Belyaev[‡]

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

[†] gar@icmm.ru

[‡] belyaev@icmm.ru

The work is devoted to the study of nanocomposites based on synthetic (styrene-butadiene) rubber with different fillers not previously used. The issue of using composites with alternative fillers is being investigated. The results of experimental testing and analysis of thermo-visco-elastic behavior of styrene-butadiene rubbers filled by various mineral particles of micro and nanosize, as well as pyrolysis products of organic food waste, are presented. The filled elastomers discussed in this work are mainly used in the tire industry to improve the performance of tires. All samples were tested on a dynamo-mechanical analyzer (DMA). Temperature and frequency dependences of the dynamic modulus and loss modulus are plotted for each of the composites. The frequency characteristics corresponded to the real range of rotation speeds of the car wheel, and the temperature varied from -50 to $+50^{\circ}\text{C}$. A comparative analysis of the results obtained was carried out. The structural mechanisms of the filler are not investigated. It is assumed that the principles of operation of the investigated fillers at the structural level are similar to those described in many works for classical fillers. Based on the test results a conclusion about the preferable operating conditions for the considered materials was made.

Keywords: filled rubbers; mineral micro and nanofillers; material strength; thermo-viscoelasticity; dynamo-mechanical analysis

Received 05.10.2021; revised 01.11.2021; accepted 09.11.2021

doi: 10.17072/1994-3598-2021-4-05-13

1. Введение

В настоящее время эластомеры и композиты на их основе широко используются в самых разнообразных отраслях промышленности, успешно конкурируя с традиционными материалами. Это огромное множество самых разнообразных по физико-механическим и химическим свойствам материалов [1]. Соответственно для их изучения требуется столь же разнообразные методы и подходы.

В данной работе рассматривается только один, но очень важный для шинной промышленности класс – это резины с активными (или как их еще называют упрочняющими) микро и нано наполнителями. По своей структуре эти композиты представляют собой сложные гетерогенные системы, состоящие из смеси жестких и прочных частиц (наполнитель), случайным образом распределенных в низко модульной высокоэластичной матрице (связующее). Подобные материалы характеризуются сложным механическим поведением (конечные деформации, нелинейная упругость, вязкоупругость) и требуют своих специфических методов исследования их свойств.

Традиционно наиболее распространенными наполнителями резин на основе натуральных и искусственных каучуков являются технический углерод (черная сажа) [2–6] и белая сажа (гидратированный диоксид кремния $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) [6–10]. В настоящее время актуальной проблемой является поиск новых нетрадиционных типов наполнителей для дальнейшего улучшения свойств каучуков. Несмотря на широкую популярность, существуют актуальные работы по классическим наполнителям, в которых изучаются ранее не исследованные аспекты поведения наполненных композитов [11]. К со-

временным материалам предъявляются повышенные экологические требования. К тому же реальное производство всегда стремится снизить себестоимость продукции.

В связи с этим в последние годы появился ряд исследований по переработке и применению изношенных шин [12]. Часть исследований направлена на использование альтернативных каучуков и наполнителей. Регулярно появляются статьи по применению новых добавок для классических наполнителей [13–14], а также работы, в которых предлагаются новые ранее не использованные наполнители [15]. Отдельно можно выделить натуральные наполнители, отвечающие экологическим требованиям (так называемые экологически чистые материалы) [16–18].

Одно из перспективных направлений – использование различных минеральных наполнителей [19–25], в частности глины (монтмориллонита [26], палигорскита [27], шунгита [28, 31–33] и др.). Эти минералы не обладают достаточной прочностью на макроуровне (из-за их осадочного происхождения), однако после измельчения из них получают прочные и твердые микро- и наночастицы различной формы, которые вполне пригодны для использования в качестве наполнителей. Например, дисперсный монтмориллонит дает ультратонкие чешуйки, палигорскит – игольчатые, шунгит – глобулярные частицы. Кроме того, такие наполнители дешевле, чем более традиционный технический углерод или кремнезем. С учетом вышеперечисленных требований к новым материалам минеральные наполнители природного происхождения выглядят достаточно перспективно. Свойства полимерных композитов с монтмориллонитовым наполнителем обсуждаются в работе [34]. Исследования эпоксидных смол с шунгитовым

наполнителем представлены в работе [35]. Результаты испытаний этих материалов на одноосное растяжение можно увидеть в статье [36].

В данной статье рассматриваются каучуки для шинной промышленности с различными наполнителями, которые в силу экологичности и невысокой стоимости выглядят весьма многообещающими. В качестве метода исследования был выбран динамомеханический анализ. Этот метод позволяет оценивать механические свойства материала при различных температурах, что особенно важно для каучуков, используемых в шинной промышленности. В целом этот метод широко используется при изучении полимеров [11, 34].

2. Материалы и методы

Основными объектами исследований были эластомерные композиты на основе синтетического бутадиен-стирольного каучука (SBR) SBR-1500 и следующих микро- и нанонаполнителей: кремнезема (белая сажа) (WS), диатомитового сорбента (DS), микрошунгита (MS), наношунгита (NS), аморфного микрокремнезема (AMS) и продуктов пиролиза рисовой шелухи (RHW и RHB).

Диатомитовый сорбент – это высокопористый инертный материал, получаемый из природного минерала диатомита в результате механического дробления и термической обработки. Он хорошо зарекомендовал себя на производстве и используется давно. Подробные особенности использования шунгитовых наполнителей различной концентрации можно найти в [36]. В этой работе исследуется влияние степени наполнения на механические свойства каучуков. Также были изготовлены и испытаны композиты с новыми (еще не применяемыми в производстве резины) наполнителями: это аморфный микрокремнезем (AMS) и продукты пиролиза рисовой шелухи RHW (белый) и RHB (черный).

Основное преимущество AMS – доступность и невысокая стоимость производства (побочный продукт при производстве асбеста). Характерный размер частиц составлял около 5 мкм.

Также были изготовлены и испытаны SBR-композиты с новыми минеральными наполнителями RHW и RHB (еще не нашедшие применения в резиновой промышленности). Эти наполнители получают при пиролизе рисовой шелухи, средний размер частиц порядка 25–30 мкм. RHW содержит примерно 95–98% аморфного диоксида кремния и 2–5% углерода в графитообразном состоянии, RHB соответственно 35% аморфного SiO_2 и 65% графита. По своей структуре они близки к существующим БС, но получают из природного сырья с параллельной утилизацией отходов и выработкой тепловой энергии. Поэтому их производство обходится значительно дешевле.

Технология изготовления материалов разработана в Институте прикладной механики РАН (Москва) [24, 28, 36].

3. Эксперимент и обсуждение результатов

Эксперименты проводились на динамомеханическом анализаторе DMA/STDA861e (METTLER TOLEDO STARE). Этот прибор позволяет получать информацию об изменении вязкоупругих характеристик материала под действием динамической нагрузки, задаваемой по гармоническому закону (линейная модель вязкоупругости) в температурном диапазоне от -150 до $+500^\circ\text{C}$. Для испытаний использовались прямоугольные образцы: база (рабочая часть) 10 мм, ширина 3 мм, толщина 2 мм. Схема нагружения одноточечная: циклическое одноосное растяжение – сжатие предварительно растянутого образца с применением динамической нагрузки по гармоническому закону.

Диапазон задаваемых частот f варьировался от 1 до 20 Гц, что соответствует скорости качения стандартного автомобильного колеса с посадочным диаметром в 15 дюймов в диапазоне примерно от 6 до 136 км/ч соответственно. Амплитуду по деформациям ε_0 во всех случаях задавали равной 3%. По результатам экспериментов строились зависимости динамического модуля E' и модуля потерь E'' от f (при 20°C), а также их температурные зависимости (от -50 до $+100^\circ\text{C}$) при постоянной частоте 13 Гц (скорость качения колеса равна 90 км/ч). Соответствующие графики приведены ниже.

3.1. Частотные испытания

На рис. 1 показаны частотные зависимости комплексных модулей E' и E'' для образцов из SBR-1500, наполненных частицами микро- и наношунгита, белой сажи, диатомитового сорбента. На рис. 2 представлены аналогичные кривые, но для наполнителей из AMS, RHW и RHB.

Анализ полученных результатов показал, что для всех исследованных композитов ввод наполнителя способствовал увеличению обоих комплексных модулей. Наиболее сильно этот эффект проявлялся для диатомитового сорбента, наименее – для микрошунгита. Так, для частоты $f = 20$ Гц значения E' (по сравнению с чистым SBR-1500) возрастали для MS примерно вдвое, а для DS – более чем в 6 раз. Увеличение E'' для MS составило 2.5 раза, а для DS – 11 раз. Для остальных наполнителей (включая и новые AMS, RHW и RHB) повышение жесткости было примерно одного порядка.

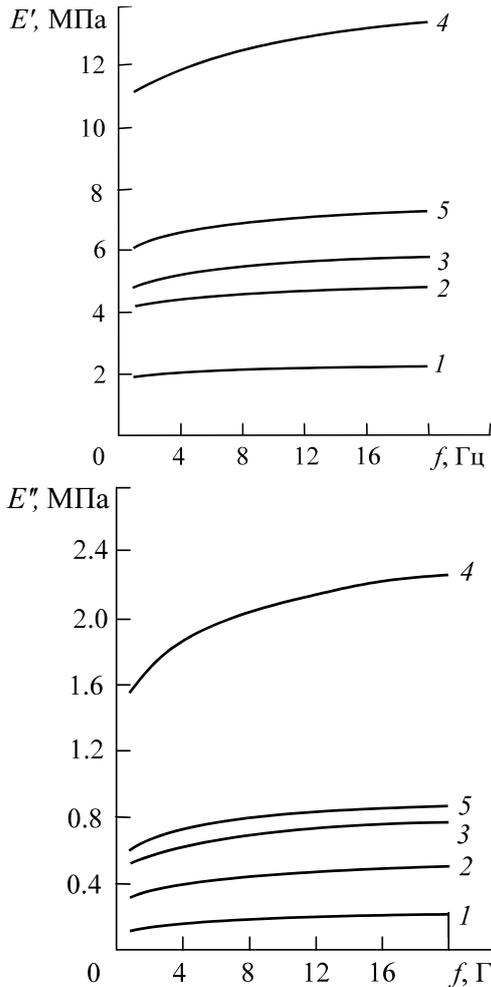


Рис. 1. Частотные зависимости комплексных модулей E' и E'' для SBR-1500 (1), наполненного MS (2), NS (3), WS (4), DS (5) (концентрация 65 phr)

Также было установлено, что с ростом f происходит незначительное увеличение E' и E'' (в данном диапазоне частот и при плюсовых температурах). Оно не превышало 10–15%. Исключение составил только наполнитель из диатомитового сорбента, ввод которого в эластомер вызывал прирост E' на 20%, а E'' – на 40%. Для чистого SBR-1500 как E' , так и E'' сохраняли практически постоянные значения. Таким образом, можно считать, что данные системы обладают достаточно стабильными вязкоупругими характеристиками при данных скоростях качения автомобильного колеса.

3.2. Температурные испытания

На рис. 3 и 4 представлены результаты температурных испытаний эластомерных композитов на основе SBR-1500. На рис. 3 показаны зависимости E' и E'' для материалов, наполненных частицами микрошунгита, наношунгита, белой сажи и диатомитового сорбента. На рис. 4 даны аналогичные

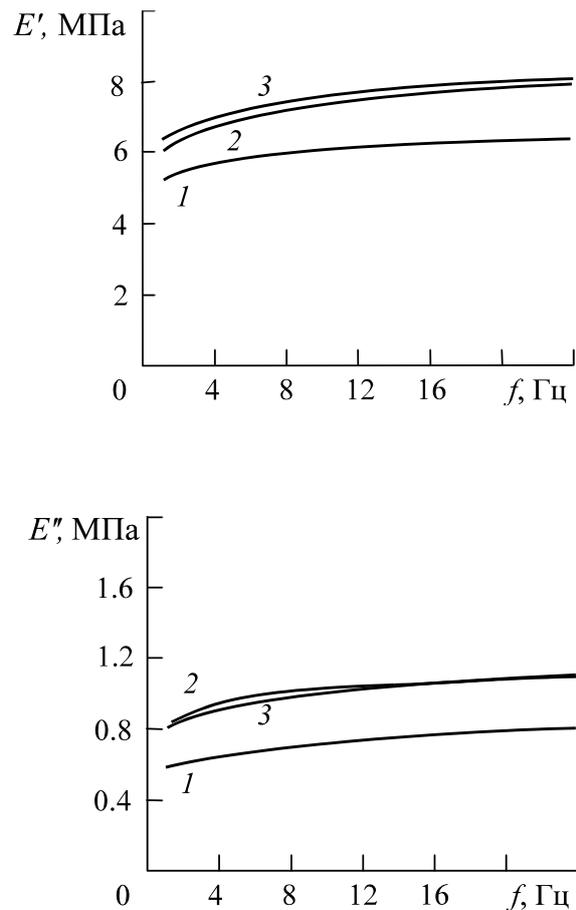


Рис. 2. Частотные зависимости комплексных модулей E' и E'' для SBR-1500 (1), наполненного AMS (2), RHW (3) и RHB (4) (концентрация 65 phr)

кривые, но для наполнителей из AMS, RHW и RHB.

При температурах выше -20°C все исследуемые композитные системы (в том числе и чистый эластомер) сохраняли стабильность своих механических характеристик. При более низких температурах происходило резкое увеличение как динамического модуля, так и модуля потерь, причем для наполненных резин значения возрастали на несколько порядков, тогда как чистый эластомер изменял свои свойства значительно слабее. Анализ температурной зависимости тангенса потерь ($\tan \delta = E''/E'$) показал, что температура стеклования композитов с наполнителями из MS, NS, WS, DS и RHB находится в диапазоне от -25 до -30°C , а для наполнителей из AMS и RHW она сдвигается до -35°C . Следует отметить, что композиты, наполненные частицами RHB, оказались менее стойкими к низким температурам. Рост значений E' и E'' для них начинался уже при -10°C , хотя температура стеклования оказалась около -30°C .

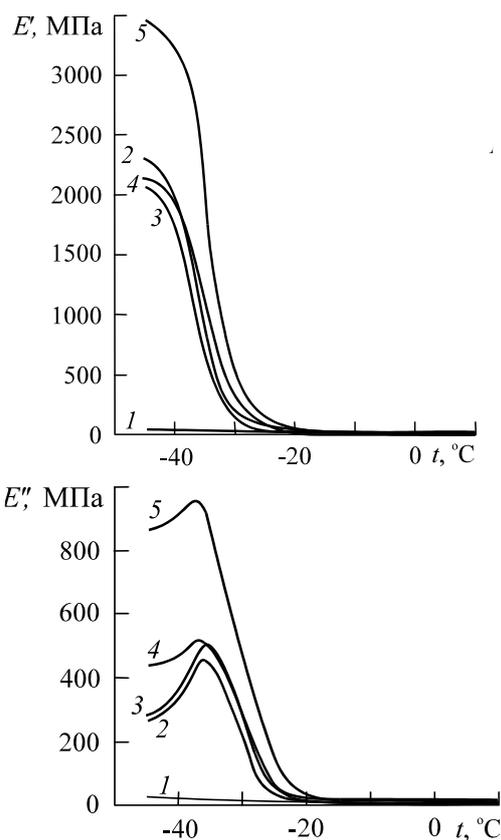


Рис. 3. Температурные зависимости комплексных модулей E' и E'' для SBR-1500 (1), наполненного MS (2), NS (3), WS (4), DS(5) (концентрация 65 phr)

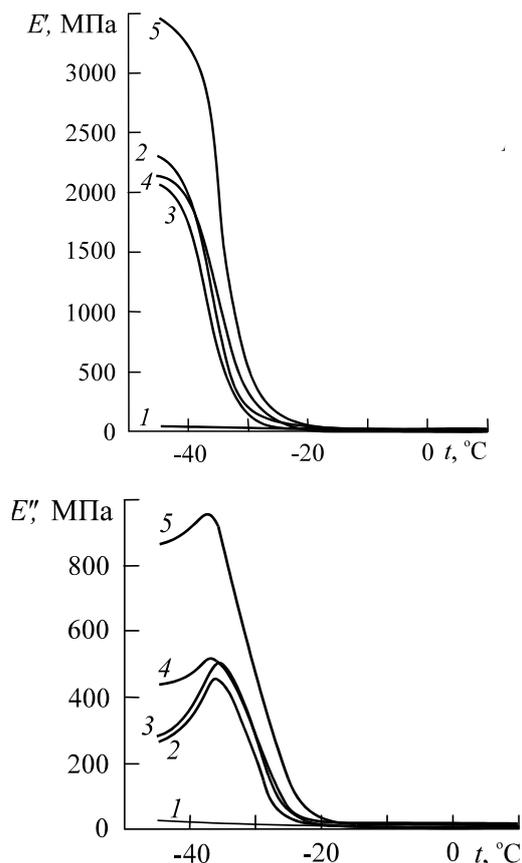


Рис. 4. Температурные зависимости комплексных модулей E' и E'' для SBR-1500 (1), наполненного AMS (2), RHW (3) и RHB (4) (концентрация 65 phr)

Следовательно, использование шин только с такими наполнителями в условиях столь низких температур нежелательно – нужны дополнительные стабилизирующие добавки в рецептуру.

4. Заключение

Экспериментальные исследования на ДМА композитов на основе бутадиен-стирольного каучука и минеральных микро- и нанонаполнителей показали, что эти материалы демонстрируют стабильные вязкоупругие свойства при температурах выше -25°C , т.е. они вполне пригодны для эксплуатации в районах с умеренным климатом.

Добавление в шинные резины дисперсных минеральных наполнителей из микро- и нанощунгита, белой сажи, диатомитового сорбента, а также продуктов утилизации отходов промышленного производства (аморфного кремнезема, продуктов пиролиза рисовой шелухи) улучшает их прочность и деформативность, причем от наночастиц этот эффект обычно усиливается.

5. Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность Ю.В. Корневу (Институт прикладной механики РАН) за помощь в изготовлении образцов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, НИР № АААА-А20-120022590044-7.

Список литературы

1. *Caldona E. B., De Leon A. C. C., Pajarito B. B., Advincula R. C.* A review on rubber-enhanced polymeric materials // *Polym Rev.* 2016. Vol. 57 (2). P. 311–338. DOI: 10.1080/15583724.2016.1247102
2. *Kraus G.* Reinforcement of elastomers by carbon black // *Rubber Chem Technol.* 1978. Vol. 51 (1). P. 297–321.
3. *Kim J. H., Jeong H. Y.* A study on the material properties and fatigue life of natural rubber with different carbon blacks // *Int. J. Fatigue.* 2005. Vol. 27. P. 263–272. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2004.07.002

4. Koga T., Takenaka M., Aizawa K., Nakamura M., Hashimoto T. Structure factors of dispersible units of carbon black filler in rubbers // *Langmuir*. 2005. Vol. 21. P. 11409–11413. DOI:10.1021/la051352s
5. Jovanovich V., Smarzija-Jovanovich S., Budinski-Simendich J., Markovich G., Marinović-Cincovich M. Composites based on carbon black reinforced NBR/EPDM rubber blends // *Compos Part B-Eng*. 2013. Vol. 45 (1). P. 333–340.
6. Ulfah I. M., Fidyarningsih M., Rahayu S., Fitriani D. A., Saputra D. A., Winarto D. A., Wisojodharmo L. A. Influence of carbon black and silica filler on the rheological and mechanical properties of natural rubber compound // *Procedia Chem*. 2015. Vol. 16. P. 258–264. DOI: 10.1016/j.proche.2015.12.053
7. Fetterman M. Q. The unique properties of precipitated silica in the design of high performance rubber // *Elastomerics*. 1984. Vol. 116 (9). P. 18–31.
8. Camenzind A., Schweizer T., Sztucki M., Pratsinis S. E. Structure and strength of silica-PDMS nanocomposites // *Polymer*. 2010. Vol. 51. P. 1796–1804. DOI: 10.1016/j.polymer.2010.02.030
9. Tadiello L., D'Arienzo M., Di Credico B., Hanel T., Matejka L., Mauri M., Scotti R. The filler-rubber interface in styrene butadiene nanocomposites with anisotropic silica particles: morphology and dynamic properties // *Soft Matter*. 2015. Vol. 11 (20). P. 4022–4033. DOI: 10.1039/c5sm00536a
10. Jong L. Improved mechanical properties of silica reinforced rubber with natural polymer // *Polym Test*. 2019. Vol. 79. 106009. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106009
11. Zhang Y., Wang B., Zhang L., Zhou H., Dynamic stress-stiffening of carbon black-filled vulcanizates // *Polym Eng Sci*. 2019. Vol. 59. P. 1743–1752. DOI: 10.1002/pen.25174
12. Verma A., Budiyal L., Sanjay M., Siengchin S. Processing and characterization analysis of pyrolyzed oil rubber (from waste tires)-epoxy polymer blend composite for lightweight structures and coatings applications // *Polym Eng Sci*. 2019. Vol. 59. P. 2041–2051. DOI: 10.1002/pen.25204
13. Lee C. K., Seo J. G., Kim H. J., Song S. H., Novel green composites from styrene butadiene rubber and palm oil derivatives for high performance tires // *J. Appl. Polym. Sci*, 2019. Vol. 136, 47672. DOI: 10.1002/app.47672
14. Shiva M., Akhtari S. S., Shayesteh M. Effect of mineral fillers on physico-mechanical properties and heat conductivity of carbon black-filled SBR/butadiene rubber composite // *Iran Polym J*. 2020. Vol. 29, P. 957–974. DOI: 10.1007/s13726-020-00854-0
15. D. M. Paleri, A. Rodriguez-Uribe, M. Misra, A. K. Mohantye Preparation and haracterization of eco-friendly hybrid biocomposites from natural rubber, biocarbon, and carbon black // *XPRESS Polymer Letters*. 2021. Vol. 15. No.3. P. 236–249 DOI: 10.3144/expresspolymlett.2021.21
16. Ho Song S. Characterization of eco-friendly processing aids for styrene butadiene rubber composites with silica // *Journal of Composite Materials*. 2020. Vol. 54(23). P. 3405-3413. DOI: 10.1177/0021998320916230
17. Roy K., Debnath S. C., Raengthon N., Potiyaraj P. Understanding the reinforcing efficiency of waste eggshell-derived nano calcium carbonate in natural rubber composites with maleated natural rubber as compatibilizer // *Polym Eng Sci*. 2019. Vol. 59. P. 1428–1436. DOI: 10.1002/pen.25127
18. Yan H., Li H., Li W., Fan X., Zhang L., Zhu M. Probing the damping property of three-dimensional graphene aerogels in carboxylated nitrile butadiene rubber/polyurethane blend // *Polym Eng Sci*. 2020. Vol. 60. P. 61–70. DOI: 10.1002/pen.25259
19. Das A., Wang D.-Y., Stöckelhuber K. W., Jurk R., Fritzsche J., Klüppel M., Heinrich G. Rubber-clay nanocomposites: some recent facts // *Adv Polym Sci*. 2011. Vol. 239. P. 85–166. DOI: 10.1007/12_2010_96 2011a.
20. Usha Devi K. S., Maria H. J., Thomas S., Ponnamma D., Causin V. Enhanced morphology and mechanical characteristics of clay/styrene butadiene rubber nanocomposites // *Appl Clay Sci*. 2015. Vol. 114. P. 568–576.
21. Teshabaeva E. U., Vapaev M. D., Ibadullaev A. Modification of mineral fillers and their effect on the properties of rubbers // *Austrian J Techn Nat Sci*. 2016. Vol. 3–4. P. 125–128.
22. Zhong B., Jia Z., Luo Y., Jia D., Liu F. Understanding the effect of filler shape induced immobilized rubber on the interfacial and mechanical strength of rubber composites // *Polym Test*. 2017. Vol. 58. P. 31–39. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.12.010
23. 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 // *Polym Test*. 2017. Vol. 63. P. 133–140.
24. Garishin O. K., Shadrin V. V., Kornev Yu. V. Mechanical studies of rubber micro- and nanocomposites promising for the tire industry. Uniaxial and biaxial tests // *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42. P. 445-454. DOI: 10.18720/MPM.4242019_9
25. Bakhtiari A., Ghasemi F. A., Naderi G., Nakhai M. R. An approach to the optimization of mechanical properties of polypropylene/nitrile butadiene rubber/halloysite nanotube/polypropylene-g-maleic anhydride nanocomposites using response surface methodology // *Polym Composite*. 2020. Vol. 41(6). P. 2330–2343. DOI: 10.1002/pc.25541

26. Garishin O. K., Svistkov A. L., Gerasin V. A., Guseva M. A. Simulation of the elastic-plastic behavior of polyolefin-based nanocomposites with a different structure of layered filler // *Polym Sci Ser A+*. 2009. Vol. 51 (4). P. 407–415.
27. Tang Q., Wang F., Liu X., Tang M., Zeng Z., Liang Z., Guan X., Wang J., Mu X. Surface modified palygorskite nanofibers and their applications as reinforcement phase in cis-polybutadiene rubber nanocomposites // *Appl Clay Sci* 2016. Vol. 132–133. P. 175–181.
28. Kornev Yu. V., Yanovskiy Yu. G., Boiko O. V., Semenov N. A., Chirkunova C. V. Investigating the influence of the degree of dispersion of mineral shungite on the properties of elastomeric materials based on butadiene-styrene rubber // *Int Polym Sci Techn.* 2013. Vol. 40(3). P. 17–22.
29. Fengge G. Clay/polymer composites: the story // *Mater Today*. 2004. Vol. 11. P. 50–55.
30. Theng B. K. G. Some Practical Applications of the Clay-Polymer Interaction // *Dev Clay Sci*. 2012. Vol. 4. P. 153–199, 201–241.
31. Buseck P. R. Geological fullerenes: review and analysis // *Earth Planet Sc Lett.* 2002. Vol. 203. P. 781–792.
32. Kwiecinska B., Pusz S., Krzesinska M., Pilawa B. Physical properties of shungite // *Int J Coal Geol* 2007. Vol. 71(4). P. 455–461.
33. Sheka E. F., Rozhkova N. N. Shungite as the natural pantry of nanoscale reduced graphene oxide // *Int J Smart Nano Mat.* 2014. Vol. 5 (1). P. 1–16.
34. Fathurrohman M. I., Rugmai S., Hayemasae N., Sahakaro K. Dispersion and properties of natural rubber-montmorillonite nanocomposites fabricated by novel in situ organomodified and latex compounding method // *Polym Eng Sci*. 2019. Vol. 59. P. 1830–1839. DOI: 10.1002/pen.25183
35. Kupchishin A. I., Nauryzbaev M. K., Kupchishin A. A., Komarov F. F., Remnev G. E., Voronova N. A., Kaykanov M. Development of technology and investigation of structure and properties of composites on the basis of shungit and polymer resins // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 81, 012004.
36. Garishin O. K., Shadrin V. V., Belyaev A. Yu., Kornev Yu. V. Micro and nanoshungites- perspective mineral fillers for rubber composites used in the tires // *Materials Physics and Mechanics*. 2018. Vol. 40. P. 56–62. DOI: 10.18720/MPM.4012018_7
2. Kraus G. Reinforcement of elastomers by carbon black. *Rubber Chem Technol.* 1978. vol.51(1). pp.297-321.
3. Kim J H, Jeong H Y. A study on the material properties and fatigue life of natural rubber with different carbon blacks. *Int J Fatigue.* 2005. vol.27. pp. 263-272. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2004.07.002
4. Koga T., Takenaka M., Aizawa K., Nakamura M., Hashimoto T. Structure factors of dispersible units of carbon black filler in rubbers. *Langmuir*, 2005, vol. 21, pp. 11409–11413. DOI: 10.1021/la051352s
5. Jovanovich V., Smarzija-Jovanovich S., Budinski-Simendich J., Markovich G., Marinović-Cincovich M. Composites based on carbon black reinforced NBR/EPDM rubber blends. *Compos. Part B-Eng*, 2013, vol. 45 (1), pp.333–340.
6. Ulfah I. M., Fidyarningsih M., Rahayu S., Fitriani D. A., Saputra D. A., Winarto D. A., Wisojodharmo L. A. Influence of carbon black and silica filler on the rheological and mechanical properties of natural rubber compound. *Procedia Chem.*, 2015, vol. 16, pp. 258–264. DOI: 10.1016/j.proche.2015.12.053
7. Fetterman M. Q. The unique properties of precipitated silica in the design of high performance rubber. *Elastomerics*, 1984, vol. 116 (9), pp. 18–31.
8. Camenzind A., Schweizer T., Sztucki M., Pratsinis S. E. Structure and strength of silica-PDMS nanocomposites. *Polymer*, 2010, vol. 51, pp. 1796–1804. DOI: 10.1016/j.polymer.2010.02.030
9. Tadiello L., D'Arienzo M., Di Credico B., Hanel T., Matejka L., Mauri M., Scotti R. The filler-rubber interface in styrene butadiene nanocomposites with anisotropic silica particles: morphology and dynamic properties. *Soft Matter*, 2015, vol. 11 (20), pp. 4022–4033. DOI: 10.1039/c5sm00536a
10. Jong L. Improved mechanical properties of silica reinforced rubber with natural polymer. *Polym Test.*, 2019, vol. 79, 106009. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106009
11. Zhang Y., Wang B., Zhang L., Zhou H., Dynamic stress-stiffening of carbon black-filled vulcanizates. *Polym Eng Sci.*, 2019, vol. 59, pp. 1743–1752. DOI: 10.1002/pen.25174
12. Verma A., Budiya L., Sanjay M., Siengchin S. Processing and characterization analysis of pyrolyzed oil rubber (from waste tires)-epoxy polymer blend composite for lightweight structures and coatings applications. *Polym Eng Sci.*, 2019, vol. 59, pp. 2041–2051. DOI: 10.1002/pen.25204
13. Lee C. K., Seo J. G., Kim H. J., Song S. H., Novel green composites from styrene butadiene rubber and palm oil derivatives for high performance tires. *J Appl Polym Sci.*, 2019, vol. 136, 47672. DOI: https://doi.org/10.1002/app.47672

References

14. Shiva M., Akhtari S. S., Shayesteh M. Effect of mineral fillers on physico-mechanical properties and heat conductivity of carbon black-filled SBR/butadiene rubber composite. *Iran Polym J.*, 2020, vol. 29, pp. 957–974. DOI: 10.1007/s13726-020-00854-0
15. Paleri D. M., Rodriguez-Urbe A., Misra M., Mohantye A. K. Preparation and characterization of eco-friendly hybrid biocomposites from natural rubber, biocarbon, and carbon black. *XPRESS Polymer Letters*, 2021, vol. 15. no.3, pp. 236–249. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2021.21
16. Ho Song S. Characterization of eco-friendly processing aids for styrene butadiene rubber composites with silica. *Journal of Composite Materials*, 2020, vol. 54 (23), pp. 3405–3413. DOI: 10.1177/0021998320916230
17. Roy K., Debnath S. C., Raengthon N., Potiyaraj P. Understanding the reinforcing efficiency of waste eggshell-derived nano calcium carbonate in natural rubber composites with maleated natural rubber as compatibilizer. *Polym Eng Sci.*, 2019, vol. 59, pp. 1428–1436. DOI: 10.1002/pen.25127
18. Yan H., Li H., Li W., Fan X., Zhang L., Zhu M. Probing the damping property of three-dimensional graphene aerogels in carboxylated nitrile butadiene rubber/polyurethane blend. *Polym Eng Sci.*, 2020, vol. 60, pp. 61–70. DOI: 10.1002/pen.25259
19. Das A., Wang D.-Y., Stöckelhuber K. W., Jurk R., Fritzsche J., Klüppel M., Heinrich G. Rubber-clay nanocomposites: some recent facts. *Adv Polym Sci.*, 2011, vol. 239, pp. 85–166. DOI: 10.1007/12_2010_96 2011a.
20. Usha Devi K. S., Maria H. J., Thomas S., Ponnamma D., Causin V. Enhanced morphology and mechanical characteristics of clay/styrene butadiene rubber nanocomposites. *Appl Clay Sci.*, 2015, vol. 114, pp.568–576.
21. Teshabaeva E. U., Vapaev M. D., Ibadullaev A. Modification of mineral fillers and their effect on the properties of rubbers. *Austrian Journal Techn Nat Sci.*, 2016, vol. 3–4, pp.125–128.
22. Zhong B., Jia Z., Luo Y., Jia D., Liu F. Understanding the effect of filler shape induced immobilized rubber on the interfacial and mechanical strength of rubber composites. *Polym Test.*, 2017, vol. 58, pp. 31–39. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.12.010
23. 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. *Polym Test.*, 2017, vol. 63, pp. 133–140.
24. Garishin O. K., Shadrin V. V., Kornev Yu. V. Mechanical studies of rubber micro- and nanocomposites promising for the tire industry. Uniaxial and biaxial tests. *Materials Physics and Mechanics*, 2019, vol. 42, pp. 445-454. DOI: 10.18720/MPM.4242019_9
25. Bakhtiari A., Ghasemi F. A., Naderi G., Nakhai M. R. An approach to the optimization of mechanical properties of polypropylene/nitrile butadiene rubber/halloysite nanotube/polypropylene-g-maleic anhydride nanocomposites using response surface methodology. *Polym Composite*, 2020, vol.41(6), pp. 2330–2343. DOI: 10.1002/pc.25541
26. Garishin O. K., Svistkov A. L., Gerasin V. A., Guseva M. A. Simulation of the elastic-plastic behavior of polyolefin-based nanocomposites with a different structure of layered filler. *Polym Sci Ser A+*, 2009, vol. 51 (4), pp. 407-415.
27. Tang Q., Wang F., Liu X., Tang M., Zeng Z., Liang Z., Guan X., Wang J., Mu X. Surface modified polygorskite nanofibers and their applications as reinforcement phase in cis-polybutadiene rubber nanocomposites. *Appl Clay Sci.*, 2016, vol. 132–133, pp. 175–181.
28. Kornev Yu. V., Yanovskiy Yu. G., Boiko O. V., Semenov N. A., Chirkunova C. V. Investigating the influence of the degree of dispersion of mineral shungite on the properties of elastomeric materials based on butadiene-styrene rubber. *Int Polym Sci Techn.*, 2013, vol.40 (3), pp. 17–22.
29. Fenge G. Clay/polymer composites: the story. *Mater Today*, 2004, vol. 11, pp. 50–55.
30. Theng B K G. Some practical applications of the clay-polymer interaction. *Dev Clay Sci*, 2012, vol. 4, pp. 153–199, 201–241.
31. Buseck P. R. Geological fullerenes: review and analysis. *Earth Planet Sc Lett.*, 2002, vol. 203. pp. 781–792.
32. Kwiecinska B., Pusz S., Krzesinska M., Pilawa B. Physical properties of shungite. *Int J Coal Geol.*, 2007, vol. 71 (4), pp. 455–461.
33. Sheka E. F., Rozhkova N. N. Shungite as the natural pantry of nanoscale reduced graphene oxide. *Int J Smart Nano Mat.*, 2014, vol. 5 (1). pp. 1–16.
34. Fathurrohman M. I., Rugmai S., Hayeemasae N., Sahakaro K. Dispersion and properties of natural rubber-montmorillonite nanocomposites fabricated by novel in situ organomodified and latex compounding method. *Polym Eng Sci.*, 2019, vol. 59, pp. 1830–1839. DOI: 10.1002/pen.25183
35. Kupchishin A. I., Nauryzbaev M. K., Kupchishin A. A., Komarov F. F., Remnev G. E., Voronova N. A., Kaykanov M. Development of technology and investigation of structure and properties of composites on the basis of shungit and polymer resins. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2015, vol. 81, 012004.
36. Garishin O. K., Shadrin V. V., Belyaev A. Yu., Kornev Yu. V. Micro and nanoshungites- perspective mineral fillers for rubber composites used in the tires. *Materials Physics and Mechanics*, 2018, vol. 40, pp. 56–62. DOI: 10.18720/MPM.4012018_7

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Гаришин О. К., Беляев А. Ю. Динамо-механический анализ резин с минеральными наполнителями в сравнении с наполнителями, широко распространенными в шинной промышленности // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 4. С. 05–13. doi: 10.17072/1994-3598-2021-4-05-13

Please cite this article in English as:

Garishin O. K., Belyaev A. Yu. Dynamo-mechanical analysis of rubbers with mineral fillers in comparison with fillers widely used in the tire industry. Bulletin of Perm University. Physics, 2021, no. 4, pp. 05–13. doi: 10.17072/1994-3598-2021-4-05-13

Сведения об авторах

1. *Олег Константинович Гаришин*, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013
2. *Антон Юрьевич Беляев*, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013

Author information

1. *Oleg K. Garishin*, Doctor of the Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuum Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ac. Koroleva str., 1, Perm, Russia, 614013
2. *Anton Y. Beliaev*, PhD, Junior Researcher, Institute of Continuum Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ac. Koroleva, str. 1, Perm, Russia, 614013