

Исследование упруго-гистерезисных свойств протекторных шинных резин с кремнекислотными наполнителями

Ольга А. Кротова	¹	o.krotova@belstu.by	 0000-0003-1142-7934
Жанна С. Шашок	¹	shashok@belstu.by	 0000-0003-2279-6866
Елена П. Усс	¹	uss@belstu.by	 0000-0003-2849-6004
Андрей Ю. Люштык	²	lyushtykayu@belshina.by	 0000-0002-3938-0077
Ольга В. Карманова	³	karolga@mail.ru	 0000-0003-2226-6582

¹ Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

² ОАО «Белшина», Минское шоссе, 4, г. Бобруйск, 213824, Республика Беларусь

³ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Исследовано влияние различных марок кремнекислотных наполнителей (ККН), отличающихся качественными характеристиками, на комплексный модуль резин, их модуль упругости, модуль потерь, а также на тангенс угла механических потерь. Минеральные наполнители ККН 1 и ККН 2 вводились в дозировке 80,00 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука в наполненные эластомерные композиции на основе комбинации синтетических бутадиен-стирольного и полибутадиенового каучуков, применяемые для изготовления протекторов легковых шин. Испытания проводились на динамическом механическом анализаторе путем циклического сжатия вулканизатов в интервале температур 20–70°C. Установлено, что вулканизаты с минеральным наполнителем ККН 2 характеризуются на 8–56% меньшим значением комплексного модуля. Выявлено, что резины, содержащие кремнекислотный наполнитель ККН 2, в зависимости от температуры имеют на 13–36% более низкие значения модуля упругости и на 19–46% меньшее значение модуль потерь по сравнению с образцами, наполненными ККН 1. Определено, что в интервале температур от 20 до 70 °C вулканизаты с минеральным наполнителем ККН 2, характеризуются на 7–12% меньшими значениями тангенса угла механических потерь. В результате проведенных исследований установлено, что наиболее целесообразно вводить в рецептуру протекторных резиновых смесей для легковых шин минеральный наполнитель ККН 2, что позволит получить вулканизаты, обладающие повышенной эластичностью и сцеплением с дорожным покрытием, а также меньшими потерями тепла в окружающую среду и расходом топлива.

Ключевые слова: кремнекислотный наполнитель, резина, протектор, упруго-гистерезисные свойства

Investigation of the elastic and hysteresis properties of tread rubber tires with silica

Olga A. Krotova	¹	o.krotova@belstu.by	 0000-0003-1142-7934
Zhanna S. Shashok	¹	shashok@belstu.by	 0000-0003-2279-6866
Elena P. Uss	¹	uss@belstu.by	 0000-0003-2849-6004
Andrey Yu. Lyushtyk	²	lyushtykayu@belshina.by	 0000-0002-3938-0077
Olga V. Karmanova	³	karolga@mail.ru	 0000-0003-2226-6582

¹ Belarusian State Technological University, Sverdlova Str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus

² JSC Belshina, Minsk Highway Str., 4, Bobruisk, 213824, Republic of Belarus

³ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The influence of different types of silica, differing in quality characteristics, on the complex modulus of rubbers, their elastic modulus, loss modulus, and also on the tangent of angle of mechanical loss are investigated. Mineral fillers silica 1 and silica 2 are introduced at a dosage of 80.00 phr into filled elastomeric compositions based on combination of synthetic styrene-butadiene and polybutadiene rubbers, used for the manufacture of treads for passenger tires. The tests are carried out on a dynamic mechanical analyzer by cyclic compression of vulcanizates in the temperature range 20–70°C. It is established that vulcanizates with silica 2 are characterized by 8–56% lower value of the complex modulus. It is revealed that rubbers containing a silica 2, depending on temperature, have 13–36% lower values of the elastic modulus and 19–46% lower values of the loss modulus in comparison with samples filled with silica 1. It is determined that in the temperature range from 20 to 70°C vulcanizates with silica 2 are characterized by 7–12% lower values of the tangent of angle of mechanical loss. As a result of the study, it is established that it is the most expedient to introduce mineral filler silica 2 into the formulation of tread rubber compounds for passenger tires. This will make it possible to obtain vulcanizates with increased elasticity and adhesion to the road surface, as well as lower heat losses to the environment and fuel consumption.

Keywords: silica, rubber, tread, elastic and hysteresis properties

Введение

Анализ требований к протекторным резинам показывает, что в большинстве случаев они противоречивы. Так, требования к повышенной износостойкости не совпадают с требованиями

обеспечения высокого коэффициента трения и усталостной выносливости и низких гистерезисных потерь. В связи с этим, свойства протекторных резин дифференцируются в зависимости от типа и размера шин, условий их эксплуатации. Современные легковые шины должны обладать

Для цитирования

Кротова О.А., Шашок Ж.С., Усс Е.П., Люштык А.Ю., Карманова О.В. Исследование упруго-гистерезисных свойств протекторных шинных резин с кремнекислотными наполнителями // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1. С. 330–335. doi:10.20914/2310-1202-2021-1-330-335

For citation

Krotova O.A., Shashok Zh.S., Uss E.P., Lyushtyk A.Yu., Karmanova O.V. Investigation of the elastic and hysteresis properties of tread rubber tires with silica. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2021. vol. 83. no. 1. pp. 330–335. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2021-1-330-335

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

низким сопротивлением качению, что приводит к снижению расхода топлива, иметь хорошее сцепление с мокрой и сухой дорогой для обеспечения безопасности движения и низкую истираемость, обеспечивающую долговечность покрышек [1–5].

Несмотря на успехи в использовании традиционного усиливающего наполнителя – технического углерода – только при наполнении протекторных резин кремнекислотными наполнителями (ККН) удается понизить сопротивление качению, улучшить сцепление с мокрой дорогой при сохранении на высоком уровне износостойкости. Развитие современных шин с желаемыми свойствами идет, в частности, по пути совместного использования в резиновых смесях технического углерода и ККН, либо полной замены техуглерода на диоксид кремния [5–7].

Вместе с тем простая замена технического углерода на кремнекислотный наполнитель невозможна из-за особенностей структуры поверхности частиц минерального наполнителя [6, 7]. Химическая природа и энергетика поверхности частиц ККН отличаются от структуры и поверхностной энергии частиц техуглерода. Водородные связи между поверхностными силанольными группами в агломератах диоксида кремния намного прочнее, чем взаимодействие между полярными силанольными группами наполнителя и неполярными макромолекулами углеводородных каучуков. Это приводит к усложнению технологии получения высококачественных резиновых смесей, при этом возникает необходимость использования дополнительных ингредиентов: технологических добавок, антистатиков, силанизирующих агентов, что повышает стоимость получаемых резиновых смесей.

Поскольку при эксплуатации шин резина подвергается знакопеременным деформациям, амплитуда которых значительно меньше, чем удлинение резин при разрыве, для оценки поведения изделий в таких условиях недостаточно прочностных и усталостных характеристик.

Выбор резин с оптимальными свойствами применительно к конкретным особенностям

динамического режима, реализуемого при эксплуатации того или иного изделия, должен базироваться на знании комплекса показателей, характеризующих: взаимосвязь между напряжением и деформацией при циклическом нагружении (упруго-гистерезисные свойства); взаимосвязь между динамическими напряжениями и выносливостью резин, т. е. числом циклов нагружения, которое может выдержать образец данного материала, не разрушаясь (усталостно-прочностные свойства).

Известно [8], что наполнители оказывают наиболее существенное влияние на динамические характеристики резин. Повышение модуля упругости с увеличением содержанием наполнителя обусловлено следующими взаимосвязанными факторами:

- структурным эффектом, т. е. возникновением структуры наполнителя, обуславливающей жесткость наполненных вулканизатов при малых деформациях;
- гидродинамическим эффектом частиц наполнителя, распределенных в вязкоупругой среде;
- адгезией между каучуком и наполнителем, роль которой возрастает с увеличением степени деформации.

Главная причина изменения модуля в том, что между каучуком и активным наполнителем происходит химическое или сильное адсорбционное взаимодействие, приводящее к образованию специфических связей каучук–наполнитель.

Цель работы – исследование влияния различных марок кремнекислотных наполнителей на упруго-гистерезисные свойства вулканизатов на основе каучуков общего назначения.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись наполненные эластомерные композиции на основе комбинации синтетических бутадиенстирольного и полибутадиенового каучуков (в соотношении 80:20), применяемые для изготовления протекторов легковых шин. Минеральные наполнители ККН 1 и ККН 2, отличающиеся качественными характеристиками (таблица 1), вводились в резиновые смеси в дозировке 80,00 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука.

Таблица 1.

Характеристика применяемых марок ККН

Table 1.

Characteristics of the used silica

Показатель Indicator	Значение Value	
	ККН 1 Silica 1	ККН 2 Silica 2
Удельная поверхность по адсорбции азота, м ² /г Specific surface area, m ² /g	>165	161
Удельная адсорбция по ЦТАБ, м ² /г СТАВ surface area, m ² /g	>160	153
рН водной суспензии pH of slurry	6,3	7,0
Массовая доля диоксида кремния, % Silica content, % (by mass)	>87	>97,7
Насыпная плотность, кг/м ³ Compacted bulk density, kg/m ³	120–150	203
Потери при прокаливании (950 °С), % Loss on drying (950 °С), %	<0–12	<3,3
Массовая доля влаги, % Moisture content, %	5,6	5,9

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 56801–2015 (ISO 6721) [9] на динамическом механическом анализаторе путем циклического сжатия вулканизатов при статической нагрузке 0,56 МПа, динамической нагрузке 0,50 МПа, скорости нагрева образцов 2 К/мин, частоте 11 Гц. Температурный интервал, в котором происходили испытания, – от 20 до 70 °С.

Результаты и обсуждение

Для количественной оценки упругогистерезисных свойств резины в условиях гармонического динамического нагружения широко используется комплексный модуль E^* , состоящий из вещественной составляющей E' (модуль упругости), совпадающей по фазе с функцией деформации, и мнимой E'' (модуль потерь), сдвинутой относительно нее на угол $\pi/2$. Следствием сдвига фаз между напряжением и деформацией является динамический гистерезис, приводящий к механическим потерям и теплообразованию при циклическом нагружении. Механические потери пропорциональны углу сдвига фаз [10].

Комплексный модуль E^* представляет собой результирующее нормальное напряжение, отнесенное к нормальной деформации. Иными словами, данный показатель определяет общую сопротивляемость материала деформации [2, 10].

Результаты исследования влияния природы ККН, температуры и динамической деформации на комплексный модуль резин представлены в таблице 2.

Таблица 2.
Комплексный модуль упругости резин
Table 2.
Complex modulus of elasticity of rubbers

Марка ККН Silica	Параметры Parameters		
	Температура, °С Temperature, °C	Динамическая деформация, % Dynamic deformation, %	Комплексный модуль упругости, МПа Complex modulus of elasticity, MPa
ККН 1 Silica 1	20,01	2,15	20,30
	23,75	2,50	18,53
	28,84	2,78	16,64
	33,79	3,09	14,90
	38,81	3,42	13,43
	43,77	3,75	12,18
	48,73	4,11	11,06
	53,74	4,48	10,05
	58,76	4,75	9,32
ККН 2 Silica 2	63,71	5,15	8,65
	20,02	3,04	12,96
	23,75	3,32	12,14
	28,87	3,61	11,81
	33,80	4,07	11,27
	38,69	4,18	9,90
	43,81	4,49	9,15
	48,76	4,83	8,51
	53,63	5,18	7,96
58,72	5,52	7,51	
63,75	5,81	7,52	

Анализ полученных данных показал, что в интервале температур от 20 до 70 °С значения комплексного модуля упругости вулканизатов

уменьшаются в 1,7 раза в случае использования в резиновой смеси ККН 2, и 2,3 раза при введении в эластомерные композиции ККН 1. Такой характер изменения данного показателя, вероятно, обусловлен уменьшением межмолекулярного взаимодействия, вследствие разрушения физических связей, что приводит к увеличению гибкости молекулярных цепей и уменьшению времени релаксации. При этом выявлено, что вулканизаты с ККН 2 характеризуются на 8–56% меньшим значением E^* по сравнению с резинами, содержащими ККН 1.

Аналогичное изменение величины комплексного модуля упругости установлено и от динамической деформации. Так, изменение деформации от 3,04 до 5,81% приводит к уменьшению комплексного модуля вулканизатов с ККН 2 от 12,96 до 7,52 МПа, а в случае образцов с минеральным наполнителем ККН 1 увеличение деформации от 2,15 до 5,15% приводит к изменению комплексного модуля от 20,30 до 8,65 МПа. Явление снижения модуля при повторных деформациях называется эффектом Патрикеева-Малинза и обусловлено неполным восстановлением структуры материала к началу повторного деформирования из-за наличия флуктуационной сетки. Чем больше узлов в сетке вулканизата, чем медленнее идет релаксация в процессе деформирования, тем в большей степени проявляется эффект размягчения [10].

Модуль упругости E' характеризует часть механической работы, которая накапливается в виде упругой деформации и обратимо возвращается при разгрузке, то есть нормальный модуль эластичности E' определяет упругость материала и способность сохранять энергию. При этом модуль упругости резин оказывает существенно влияние на сцепление шин с дорогой, которое определяется типом и состоянием дорожного покрытия, конструкцией и назначением шины, скоростью движения, фрикционными свойствами протекторных резин и др. [2, 10].

Зависимость изменения модуля упругости E' от температуры представлена на рисунке 1.

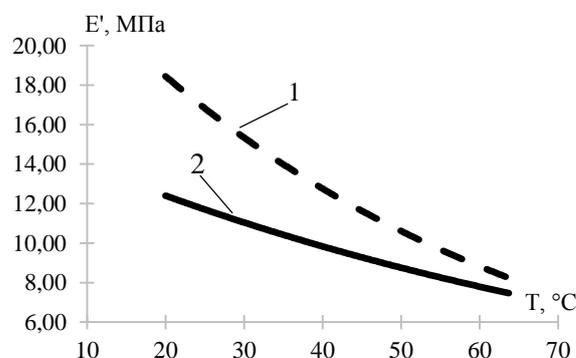


Рисунок 1. Зависимость модуля упругости E' от температуры T : 1 – ККН 1; 2 – ККН 2

Figure 1. Dependence of the elastic modulus E' on temperature T : 1 – silica 1; 2 – silica 2

Из полученных данных видно, что повышение температуры приводит к некоторому снижению модуля упругости, а, следовательно, повышается эластичность материала, что может оказывать влияние на сцепление шины с дорогой. Выявлено, что вулканизаты, содержащие кремнекислотный наполнитель марки ККН 2, в зависимости от температуры имеют на 13–36% более низкие значения модуля упругости по сравнению с резинами, содержащих ККН 1 (12,00–7,38 МПа и 18,85–8,45 МПа соответственно). Таким образом, применение в протекторных резиновых смесях ККН 2 приводит к уменьшению модуля упругости резин на их основе, что также ведет к снижению их твердости и может ухудшать сопротивление протектора механическим повреждениям [1, 2, 10].

Модуль потерь E'' определяет часть механической работы, которая необратимо рассеивается в каждом цикле в виде тепла. Чем больше значение E'' , тем больше материал нагревается в процессе эксплуатации, что приводит к большим потерям тепла в окружающую среду, а это ведет к увеличению расхода топлива [2, 10].

Результаты исследования модуля потерь E'' вулканизатов представлены на рисунке 2.

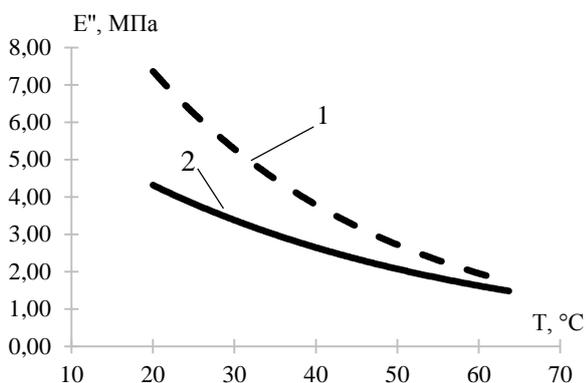


Рисунок 2. Зависимость модуля потерь E'' от температуры T : 1 – ККН 1; 2 – ККН 2

Figure 2. Dependence of the loss modulus E'' on temperature T : 1 – silica 1; 2 – silica 2

Анализ полученных данных выявил аналогичный характер изменения модуля потерь вулканизатов с различными марками ККН, как и в случае с модулем упругости. Установлено, что при ведении в резиновые смеси ККН 2 модуль потерь E'' вулканизата в интервале температур 20–70 °С уменьшается в 2,77 раза, а у резин, содержащих ККН 1, – в 4,12 раза в том же температурном интервале. При этом определено, что резины, содержащие ККН 2, имеют на 19–46% меньшее значение данного показателя, по сравнению с вулканизатами, наполненными ККН 1. Следовательно, применение в эластомерных

композициях минерального наполнителя ККН 2 позволяет снизить потери тепла в окружающую среду, что, в свою очередь, позволит снизить расход топлива.

Тангенс угла механических потерь (фактор потерь) представляет собой отношение модуля потерь к модулю накопления. Чем больше значение тангенса угла механических потерь ($\text{tg}\delta$), тем в большей мере в данном вязкоупругом материале проявляются свойства вязкой жидкости и в меньшей мере – свойства упругого тела [10].

Зависимость тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ от температуры T представлена на рисунке 3.

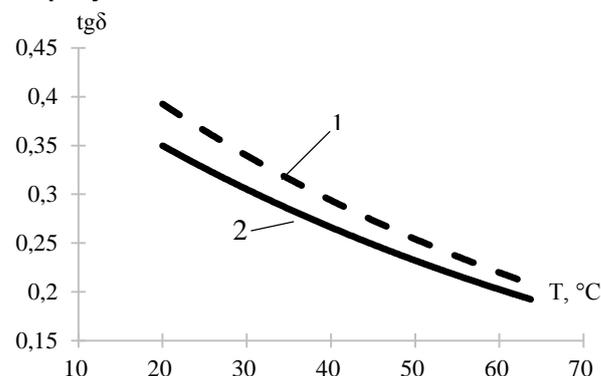


Рисунок 3. Зависимость тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ от температуры T : 1 – ККН 1; 2 – ККН 2

Figure 3. Dependence of the tangent of angle of mechanical loss $\text{tg}\delta$ on temperature T : 1 – silica 1; 2 – silica 2

Из полученных результатов видно, что в интервале температур от 20 до 70 °С вулканизаты, содержащие наполнитель ККН 2, характеризуются на 7–12% меньшими значениями $\text{tg}\delta$ (от 0,34 до 0,19), по сравнению с резинами, наполненными ККН 1 (от 0,39 до 0,21). Из этого следует, что эластомерные композиции, наполненные ККН 2, обладают более низкими гистерезисными потерями.

Пониженные значения комплексного модуля, модуля эластичности, модуля потерь и тангенса угла механических потерь резин с ККН 2 могут быть обусловлены большим размером частиц данного наполнителя по сравнению с ККН 1 и меньшей удельной адсорбционной поверхностью (161 м²/г у ККН 2 и не менее 165 м²/г у ККН 1). Известно [1, 11–20] что, вне зависимости от вводимых марок наполнителей между каучуком и ККН происходит химическое и сильное адсорбционное взаимодействие, приводящее к образованию специфических связей каучук–наполнитель. В связи с тем, что ККН 2 обладает меньшей удельной поверхностью в межфазный слой переходит меньшее количество полимера, что приводит к получению более тонкого граничного слоя, ослаблению адгезионного взаимодействия между полимером и частицами наполнителя.

Заключение

Установлено, что наиболее целесообразно вводить в рецептуру протекторных резиновых смесей для легковых шин минеральный наполнитель ККН 2, что позволит получить вулканизаты, обладающие повышенными эластичностью и сцеплением с дорожным покрытием,

а также меньшими потерями тепла в окружающую среду и расходом топлива. В настоящее время проводятся дальнейшие исследования по установлению влияния предлагаемого кремнекислотного наполнителя на комплекс технологических и эксплуатационных характеристик протекторных эластомерных композиций.

Литература

- 1 Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика: в 2 ч. Ч. 1: Резины и резинотехнические изделия. М.: Техинформ, 2012. 744 с.
- 2 Xu H., Fan T., Ye N., Wu W. et al. Plasticization effect of bio-based plasticizers from soybean oil for tire tread rubber // *Polymers*. 2020. V. 12. № 3. P. 623. doi: 10.3390/polym12030623
- 3 Фаляхов М.И., Лынова А.С., Карманова О.В., Михалева Н.А. Исследование эксплуатационных свойств резин на основе синтетического бутадиен-стирольного каучука ДССК-2560-M27 ВВ // *Вестник ВГУИТ*. 2016. № 1. С. 146–150. doi: 10.20914/2310-1202-2016-1-146-150
- 4 Каблов В.Ф., Аксенов В.И. Современные тенденции применения каучуков и наполнителей в рецептуре резин // *Промышленное производство и использование эластомеров*. 2018. № 3. С. 24–34. doi: 10.24411/2071-8268-2018-10305
- 5 Ejsmont J., Owczarzak W. Engineering method of tire rolling resistance evaluation // *Measurement*. 2019. V. 145. P. 144–149. doi: 10.1016/j.measurement.2019.05.071
- 6 Дорожкин В.П., Мохнаткина Е.Г., Земский Д.Н. Силанизация. Часть I // *Каучук и резина*. 2019. № 1. С. 28–37.
- 7 Дорожкин В.П., Мохнаткина Е.Г., Земский Д.Н. Силанизация. Часть II // *Каучук и резина*. 2019. № 2. С. 100–113.
- 8 Волоцкой А.Н., Юркин Ю.В., Авдонин В.В. Влияние типа наполнителя на динамические свойства вибропоглощающих полимерных композиционных материалов на основе этиленвинилацетата // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 12. С. 31–36.
- 9 ГОСТ 56801–2015. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. М.: Стандартинформ, 2016. 27 с.
- 10 Мансурова И.А., Исупова О.Ю., Бурков А.А., Гаврилов К.Е. Упруго-гистерезисные свойства резин, содержащих функционализированные полимером углеродные нанотрубки // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2018. Т. 61. № 4–5. С. 76–83. doi: 10.6060/tcct.20186104-05.5596
- 11 Gerges N., Issa C., Fawaz S. Rubbers: Mechanical and dynamical properties // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. V. 9. P. 128–129.
- 12 Guo F., Zhang J., Pei J., Zhou B. et al. Study on the mechanical properties of rubber asphalt by molecular dynamics simulation // *Journal of molecular modeling*. 2019. V. 25. № 12. P. 1-8. doi: 10.1007/s00894-019-4250-x
- 13 Maghami S. Silica-filled tire tread compounds: an investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. 2016. doi: 10.3990/1.9789036541282
- 14 Wisojodharmo L.A., Fidyarningsih R., Fitriani D.A., Arti D.K. et al. The influence of natural rubber-butadiene rubber and carbon black type on the mechanical properties of tread compound // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017. V. 223. № 1. P. 012013.
- 15 Fathurrohman M.I., Rugmai S., Hayemasae N., Sahakaro K. et al. Better balance of silica-reinforced natural rubber tire tread compound properties by the use of montmorillonite with optimum surface modifier content // *Rubber Chemistry and Technology*. 2020. V. 93. № 3. P. 548-566. doi: 10.5254/rct.20.80407
- 16 Zafarmehrabian R., Gangali S.T., Ghoreishy M.H.R., Davallu M. The effects of silica/carbon black ratio on the dynamic properties of the tread compounds in truck tires // *E-journal of Chemistry*. 2012. V. 9. № 3. P. 1102-1112. doi: 10.1155/2012/571957
- 17 Sattayanurak S., Noordermeer J.W., Sahakaro K., Kaewsakul W. et al. Silica-reinforced natural rubber: synergistic effects by addition of small amounts of secondary fillers to silica-reinforced natural rubber tire tread compounds // *Advances in materials science and engineering*. 2019. doi: 10.1155/2019/5891051
- 18 Ramarad S., Khalid M., Ratnam C.T., Chuah A.L. et al. Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future // *Progress in Materials Science*. 2015. V. 72. P. 100-140. doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.02.004
- 19 Mousavi H., Sandu C. Sensitivity analysis of tire-ice friction coefficient as affected by tire rubber compound properties // *Journal of Terramechanics*. 2020. V. 91. P. 319-328. doi: 10.1016/j.jterra.2020.08.004
- 20 Thaptong P., Sae-Oui P., Sirisinha C. Effects of silanization temperature and silica type on properties of silica-filled solution styrene butadiene rubber (SSBR) for passenger car tire tread compounds // *Journal of Applied Polymer Science*. 2016. V. 133. № 17. doi: 10.1002/app.43342

References

- 1 Reznichenko S.V., Morozov Yu. L. Large handbook of rubber technologist. Part 1: Rubber and rubber products. Moscow, Tekhinform, 2012. 744 p. (in Russian).
- 2 Xu H., Fan T., Ye N., Wu W. et al. Plasticization effect of bio-based plasticizers from soybean oil for tire tread rubber. *Polymers*. 2020. vol. 12. no. 3. pp. 623. doi: 10.3390/polym12030623
- 3 Falyakhov M.I., Lynova A.S., Karmanova O.V., Mikhaleva N.A. Research of operational properties of compound based on high viscosity styrene-butadiene rubber SSBR-2560 TDAE HV. *Proceedings of VSUET*. 2016. no. 1. pp. 146–150. doi: 10.20914/2310-1202-2016-1-146-150 (in Russian).
- 4 Kablov V.F., Aksenov V.I. Modern trends in the use of rubbers and fillers in rubber formulations. *Industrial production and use of elastomers*. 2018. no. 3. pp. 24–34. doi: 10.24411/2071-8268-2018-10305 (in Russian).
- 5 Ejsmont J., Owczarzak W. Engineering method of tire rolling resistance evaluation. *Measurement*. 2019. vol. 145. pp. 144–149. doi: 10.1016/j.measurement.2019.05.071
- 6 Dorozhkin V.P., Moxhnatkina E.G., Zemsky D.N. Silanization. Part I. *Kauchuk and Rubber*. 2019. no. 1. pp. 28–37. (in Russian).

- 7 Dorozhkin V.P., Mokhnatkina E.G., Zemsky D.N. Silanization. Part II. *Kauchuk and Rubber*. 2019. no. 2. pp. 100–113. (in Russian).
- 8 Volotskoy A.N., Yurkin Yu. V., Avdonin V.V. Influence of the type of filler on the dynamic properties of vibration-absorbing polymer composite materials based on ethylene vinyl acetate. *Modern science-intensive technologies*. 2018. no. 12. pp. 31–36. (in Russian).
- 9 State Standard 56801–2015. *Plastics. Determination of mechanical properties under dynamic loading*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 27 p. (in Russian)
- 10 Mansurova I.A., Isupova O. Yu., Burkov A.A., Gavrillov K.E. Elastic and hysteresis properties of rubbers containing polymer-functionalized carbon nanotubes. *Izvestiya vuzov. Chemistry and chemical technology*. 2018. vol. 61. no. 4–5. pp. 76–83. doi: 10.6060/tcct.20186104–05.5596 (in Russian).
- 11 Gerges N., Issa C., Fawaz S. Rubbers: Mechanical and dynamical properties. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. vol. 9. pp. 128–129.
- 12 Guo F., Zhang J., Pei J., Zhou B. et al. Study on the mechanical properties of rubber asphalt by molecular dynamics simulation. *Journal of molecular modeling*. 2019. vol. 25. no. 12. pp. 1–8. doi: 10.1007/s00894-019-4250-x
- 13 Maghami S. Silica-filled tire tread compounds: an investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. 2016. doi: 10.3990/1.9789036541282
- 14 Wisojodharmo L.A., Fidyansih R., Fitriani D.A., Arti D.K. et al. The influence of natural rubber–butadiene rubber and carbon black type on the mechanical properties of tread compound. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017. vol. 223. no. 1. pp. 012013.
- 15 Fathurrohman M.I., Rugmai S., Hayemasae N., Sahakaro K. et al. Better balance of silica-reinforced natural rubber tire tread compound properties by the use of montmorillonite with optimum surface modifier content. *Rubber Chemistry and Technology*. 2020. vol. 93. no. 3. pp. 548–566. doi: 10.5254/rct.20.80407
- 16 Zafarmehrabian R., Gangali S.T., Ghoreishy M.H.R., Davallu M. The effects of silica/carbon black ratio on the dynamic properties of the tread compounds in truck tires. *E-journal of Chemistry*. 2012. vol. 9. no. 3. pp. 1102–1112. doi: 10.1155/2012/571957
- 17 Sattayanurak S., Noordermeer J.W., Sahakaro K., Kaewsakul W. et al. Silica-reinforced natural rubber: synergistic effects by addition of small amounts of secondary fillers to silica-reinforced natural rubber tire tread compounds. *Advances in materials science and engineering*. 2019. doi: 10.1155/2019/5891051
- 18 Ramarad S., Khalid M., Ratnam C.T., Chuah A.L. et al. Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. *Progress in Materials Science*. 2015. vol. 72. pp. 100–140. doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.02.004
- 19 Mousavi H., Sandu C. Sensitivity analysis of tire-ice friction coefficient as affected by tire rubber compound properties. *Journal of Terramechanics*. 2020. vol. 91. pp. 319–328. doi: 10.1016/j.jterra.2020.08.004
- 20 Thappong P., Sae- Oui P., Sirisinha C. Effects of silanization temperature and silica type on properties of silica-filled solution styrene butadiene rubber (SSBR) for passenger car tire tread compounds. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016. vol. 133. no. 17. doi: 10.1002/app.43342

Сведения об авторах

Ольга А. Кротова к.т.н., старший преподаватель, кафедра полимерных композиционных материалов, Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь, o.krotova@belstu.by
<https://orcid.org/0000-0003-1142-7934>

Жанна С. Шашок к.т.н., доцент, кафедра полимерных композиционных материалов, Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь, shashok@belstu.by
<https://orcid.org/0000-0003-2279-6866>

Елена П. Усс к.т.н., доцент, кафедра полимерных композиционных материалов, Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь, uss@belstu.by
<https://orcid.org/0000-0003-2849-6004>

Андрей Ю. Люштык главный химик – начальник лаборатории, заводская лаборатория, ОАО «Белшина», Минское шоссе, 4, г. Бобруйск, 213824, Республика Беларусь, lyushtykayu@belshina.by
<https://orcid.org/0000-0002-3938-0077>

Ольга В. Карманова д.х.н., зав. кафедрой, кафедра технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, karolga@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Olga A. Krotova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, polymer composite materials department, Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a Minsk, 220006, Republic of Belarus, o.krotova@belstu.by
<https://orcid.org/0000-0003-1142-7934>

Zhanna S. Shashok Cand. Sci. (Engin.), associate professor, polymer composite materials department, Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a Minsk, 220006, Republic of Belarus, shashok@belstu.by
<https://orcid.org/0000-0003-2279-6866>

Elena P. Uss Cand. Sci. (Engin.), associate professor, polymer composite materials department, Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a Minsk, 220006, Republic of Belarus, uss@belstu.by
<https://orcid.org/0000-0003-2849-6004>

Andrey Yu. Lyushtyk chief chemist – head of the laboratory, factory laboratory, JSC Belshina, Minsk Highway Str., 4, Bobruisk, 213824, Republic of Belarus, lyushtykayu@belshina.by
<https://orcid.org/0000-0002-3938-0077>

Olga V. Karmanova Dr. Sci. (Chem.), head of department, technology of organic compounds, polymers processing and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, karolga@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 20/01/2021	После редакции 17/02/2021	Принята в печать 03/03/2021
Received 20/01/2021	Accepted in revised 17/02/2021	Accepted 03/03/2021