

УДК 678.046

А. Ю. Люштык¹, Ж. С. Шашок², Е. П. Усс², О. А. Кротова², А. В. Лешкевич²¹ОАО «Белшина»²Белорусский государственный технологический университет**СВОЙСТВА ШИННЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
С КРЕМНЕКИСЛОТНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ И КАПЛИНГ-АГЕНТОМ**

Исследованы свойства эластомерных композиций на основе комбинации растворного бутадиен-стирольного (ДССК-2560М-27) и стереорегулярного бутадиенового (СКД-Н) каучуков, содержащие кремнекислотный наполнитель и каплинг-агент в различной дозировке. В работе использовался кремнезем Экстрасил 150ВД в дозировках 70, 75 и 80 мас. ч. В качестве каплинг-агента применяли силан марки X 50-S. Определено, что повышение дозировки наполнителя увеличивает вязкость по Муни резиновых смесей на 8,9–15,9%, практически не оказывает влияние на конфекционную клейкость и способствует увеличению когезионной прочности на 17,9–21,6%. Повышение дозировки каплинг-агента приводит к некоторому уменьшению (на 3–4 усл. ед. Муни) вязкости по Муни резиновых смесей, что связано с улучшением диспергирования наполнителя в объеме эластомерной матрицы.

Установлено, что увеличение дозировки наполнителя вызывает повышение (на 19,4–25,3%) условного напряжения при 300%-м удлинении и сопротивление раздиру (на 6,3–20,8%) до теплового старения, но снижает (на 5,5–12,2%) относительное удлинение при разрыве. Увеличение содержания каплинг-агента приводит к наиболее существенному изменению эластических свойств резин (уменьшение показателя относительно удлинения при разрыве на 9,3–15,7). Характер изменения технических свойств шинных резин обусловлен структурой пространственной сетки, так как в процессе вулканизации, помимо образования поперечных связей между макромолекулами каучука, происходит образование химической связи между кремнеземом и эластомером с помощью каплинг-агента, что и приводит к различиям вулканизационной структуры вулканизатов.

Ключевые слова: бутадиен-стирольный каучук, резина, кремнекислотный наполнитель, каплинг-агент, дозировка, эластомерная композиция.

Для цитирования: Люштык А. Ю., Шашок Ж. С., Усс Е. П., Кротова О. А., Лешкевич А. В. Свойства шинных эластомерных композиций с кремнекислотным наполнителем и каплинг-агентом // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 12–19. DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-2.

A. Yu. Lyushtyk¹, Zh. S. Shashok², E. P. Uss², O. A. Krotova², A. V. Leshkevich²¹JSC “Belshina”²Belarusian State Technological University**TECHNICAL PROPERTIES OF TYRE RUBBERS
WITH VARIOUS DOSAGES OF COPING AGENT**

The properties of elastomer compositions based on a combination of solution butadiene-styrene (DSSK-2560M-27) and stereoregular butadiene (SKD-N) rubbers containing silica filler and a coupling agent in different dosages were investigated. In the work, Extrasil 150VD silica was used in dosages of 70, 75 and 80 mass parts. Silane grade X 50-S was used as a coupling agent. It was determined that an increase in the filler dosage increases the Mooney viscosity of rubber compounds by 8.9–15.9%, has virtually no effect on confection tackiness and promotes an increase in cohesive strength by 17.9–21.6%. Increasing the dosage of the coupling agent leads to a slight decrease (by 3–4 conventional Mooney units) in the Mooney viscosity of rubber compounds, which is associated with improved dispersion of the filler in the volume of the elastomer matrix.

It was found that increasing the dosage of the filler leads to an increase (by 19.4–25.3%) in the conventional stress at 300% elongation and tear resistance (by 6.3–20.8%) before heat aging, but reduces (by 5.5–12.2%) the relative elongation at break. An increase in the content of the coupling agent leads to the most significant change in the elastic properties of rubbers (a decrease in the index relative to elongation at break by 9.3–15.7). The nature of the change in the technical properties of tire rubbers is determined by the structure of the spatial network, since during the vulcanization process, in addition to the formation of cross-links between the rubber macromolecules, a chemical bond is formed between silica and the elastomer with the help of the coupling agent, which leads to differences in the vulcanization structure of the vulcanizates.

Keywords: styrene-butadiene rubber, natural rubber, rubber, silica filler, coupling agent, strength, tear resistance.

For citation: Lyushtyk A. Yu., Shashok Zh. S., Uss E. P., Krotova O. A., Leshkevich A. V. Technical properties of tyre rubbers with various dosages of coping agent. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 12–19 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-2.

Введение. Растущий спрос на энергоэффективные и экологически чистые продукты привел к разработке «зеленых» шин с низким сопротивлением качению и высокой устойчивостью к заносам на мокрой дороге [1]. Кремнекислотный наполнитель (ККН), или кремнезем, широко используется в качестве наполнителя для улучшения механических свойств «зеленых» шин благодаря своей активности, связанной с поверхностными гидроксильными группами, которые придают ему сильную полярность [2]. Однако плохая совместимость и взаимодействие между полярным кремнеземом и неполярной эластомерной матрицей препятствуют достижению желаемой эффективности усиления [3]. Наличие силанольных групп на поверхности кремнезема вызывает сильное взаимодействие между частицами, что приводит к высокой склонности наполнителя к агломерации в резиновой матрице [4, 5]. По этой причине кремнекислотный наполнитель сложнее диспергировать в эластомерную матрицу и обрабатывать резиновые смеси с ним по сравнению с другими наполнителями [5].

Для улучшения технологических свойств резиновых смесей с кремнеземом в них вводят силановые связующие агенты или каплинг-агенты.

Как правило, кремнекислотный наполнитель в процессе смешения модифицируется с помощью силанового связующего агента посредством реакции между гидроксильными группами на поверхности кремнезема и гидролизуемыми группами каплинг-агента, а затем модифицированный наполнитель взаимодействует с эластомерной матрицей посредством реакции между органofункциональными группами силанового связующего агента и двойными углерод-углеродными связями каучука в процессе вулканизации [6, 7]. Таким образом, диспергирование наполнителя и межфазное взаимодействие между кремнеземом и каучуком значительно улучшаются.

Основная часть. Цель работы – определить влияние дозировок кремнекислотного наполнителя и каплинг-агента на технические свойства шинных резин на основе комбинации бутадиен-стирольного и бутадиенового каучуков.

Объектом исследования являлись эластомерные композиции на основе комбинации растворного бутадиен-стирольного каучука марки ДССК-2560М-27 и бутадиенового каучука СКД-Н (в соотношении 75 : 25).

ДССК-2560М-27 – продукт сополимеризации 1,3-бутадиена со стиролом в углеводородном рас-

творителе с повышенным содержанием 1,2-звеньев и 1,4-транс-звеньев, наполнен маслом [8, 9]. В работе использовался синтетический бутадиеновый каучук СКД-Н, который характеризуется высокими содержанием цис-1,4-звеньев (96–98%) и линейностью полимерных цепей, что обеспечивает его отличные физико-механические показатели при статическом и динамическом нагружении, теплообразование в вулканизатах как при переменной нагрузке, так и при переменной деформации, а также усталостную выносливость, сопротивление разрастанию трещин и порезов [9, 10].

В эластомерные композиции вводился высокодисперсный кремнекислотный наполнитель марки Экстрасил 150ВД в дозировках 70, 75 и 80 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Данный наполнитель характеризуется удельной поверхностью по адсорбции ЦТАБ – 140–165 м²/г и массовой долей диоксида кремния – 97%.

Каплинг-агентом являлся органосилан марки Х50-S, который представляет собой смесь бифункционального серосодержащего органосилана бис(триэтоксисилилпропил)тетрасульфид (наиболее известного под торговой маркой Si 69 (TESPT)) и технического углерода типа N 330 в соотношении 1 : 1 по массе.

Дозировка связующего агента, применяемого в рецептах, была рассчитана на основе показателей удельной поверхности по адсорбции цетилтриметиламмоний бромиду (ЦТАБ) в соответствии с уравнением [11]:

$$C_{\text{силана}} = 5,3 \cdot 10^{-4} \cdot S_{\text{ЦТАБ}} \cdot C_{\text{ККН}},$$

где $C_{\text{силана}}$ – дозировка каплинг-агента, мас. ч.; $S_{\text{ЦТАБ}}$ – удельная поверхность по адсорбции ЦТАБ, м²/г; $C_{\text{ККН}}$ – дозировка кремнекислотного наполнителя, мас. ч.

Содержание каплинг-агента варьировалась в диапазоне $\pm 2,0$ мас. ч. в зависимости от рассчитанной дозировки.

Определение вязкости по Муни резиновых смесей проводилось на роторном вискозиметре MV 2000 в соответствии с ГОСТ Р 54552–2011 [12]. Клейкость резиновых смесей определялась на приборе Tel-Tak клейкометр, разработанном фирмой Monsanto в 1969 г. [13]. Сущность испытания по оценке когезионной прочности резиновых смесей заключалась в растяжении испытываемого образца смеси с постоянной скоростью до разрыва и измерении силы в момент разрыва [14]. Упруго-прочностные свойства резин определялись в соответствии с ГОСТ 270–75 [15],

сопротивление раздиру – по ГОСТ 262–93 [16], а стойкость резин к тепловому старению оценивалась по ГОСТ 9.024–74 [17] (температура 120°C, продолжительность 12 ч). Динамический механический анализ (ДМА) свойств резин оценивался при различных температурах на приборе DMA GABO Eplexor 500N фирмы Netzsch. Образцы подвергали циклическому сжатию при статической нагрузке 0,56 МПа, динамической нагрузке 0,50 МПа, при постоянной частоте 11 Гц. Температурный интервал, в котором происходили испытания, составлял от 55 до 74°C при скорости нагрева образцов 2 К/мин.

Изготавливаемые в промышленности резиновые смеси должны обеспечивать заданные эксплуатационные свойства резин и при этом быть технологичными при переработке [18]. Для оценки перерабатываемости смесей используется ряд показателей, которые позволяют прогнозировать поведение смесей при их формовании и сборке в изделие. В табл. 1 приведены некоторые технологические характеристики исследуемых эластомерных композиций.

Таблица 1
Технологические свойства резиновых смесей с кремнекислотным наполнителем и каплинг-агентом

Дозировка наполнителя, мас. ч.	Дозировка силана X50-S, мас. ч.	Вязкость по Муни, усл. ед. Муни	Клейкость, фунт/дюйм ²	Когезионная прочность, МПа
70	9,0	67	14	0,39
	11,0	65	13	0,37
	13,0	63	12	0,38
75	10,7	71	12	0,41
	12,7	68	13	0,42
	14,7	68	12	0,40
80	11,5	76	13	0,46
	13,5	75	13	0,45
	15,5	73	13	0,46

Из таблицы видно, что с повышением дозировки кремнекислотного наполнителя вязкость по Муни резиновых смесей увеличивается на 8,9–15,9%, что связано с повышением влияния гидродинамического фактора наполнителя ввиду роста его взаимодействия с эластомером и частиц наполнителя друг с другом [5]. При этом с увеличением дозировки каплинг-агента вязкость резиновых смесей незначительно уменьшается (на 3–4 усл. ед. Муни), что может быть обусловлено большей степенью уменьшения взаимодействия частиц наполнителя друг с другом при гидрофобизировании поверхности кремнекислотного наполнителя в условиях смешения [19].

Использование в составе эластомерных композиций различных дозировок кремнезема и сила-

нового связующего агента оказывает незначительное влияние на конфекционную клейкость резиновых смесей. В данном случае значение клейкости для всех исследуемых смесей находится в пределах 12–14 фунт/дюйм². В то же время повышение содержания кремнекислотного наполнителя приводит к увеличению когезионной прочности смесей, причем дозировка каплинг-агента оказывает незначительное влияние на данный показатель. Так, при повышении содержания кремнекислотного наполнителя с 70 мас. ч. до 80 мас. ч. когезионная прочность увеличивается на 17,9–21,6%. При этом показатель когезионной прочности резиновых смесей с 70 мас. ч. ККН при различных дозировках силанового связующего агента находится в пределах 0,37–0,39 МПа, а при 80 мас. ч. ККН составляет 0,45–0,46 МПа. Выявленный характер изменения когезионной прочности смесей может быть обусловлен тем, что из-за полярной поверхности кремнезем обладает сильным взаимодействием в системе кремний – кремний посредством образования водородной связи, которая вызывает возникновение прочной пространственной решетки [19]. Наличие решетки наполнителя в резиновой смеси, вероятно, и обуславливает большую когезионную прочность резиновых смесей при большей дозировке кремнезема.

В табл. 2 приведены результаты определения некоторых технических свойств резин на основе ДССК-2560М-27 до и после воздействия повышенной температуры и кислорода воздуха.

Из таблицы видно, что показатель условного напряжения при 300%-м удлинении с увеличением дозировки кремнекислотного наполнителя в эластомерных композициях на основе маслонаполненного растворного бутадиен-стирольного каучука ДССК-2560М-27 несколько повышается. В данном случае изменение названного показателя составляет 16,9–22,1% с увеличением содержания ККН в составе резин. После теплового старения показатель условного напряжения при 300%-м удлинении увеличивается для всех исследуемых резин, что может быть связано с распадом и перегруппировкой полисульфидных связей, образующихся при вулканизации и как следствие уменьшением прочности резин, но повышением ее жесткости [18]. При этом установлен аналогичный характер изменения данного показателя с увеличением дозировки наполнителя.

Выявлено, что с повышением содержания в составе эластомерных композиций каплинг-агента значение условного напряжения при 300%-м удлинении увеличивается на 19,4–25,3%. Продемонстрировано, что после теплового старения такой показатель увеличивается для всех исследуемых резин.

Таблица 2

Технические свойства шинных резин с кремнекислотным наполнителем и каплинг-агентом

Дозировка наполнителя, мас. ч.	Дозировка силана X50-S, мас. ч.	Условное напряжение при 300%-м удлинении, МПа		Условная прочность при растяжении, МПа		Относительное удлинение при разрыве, %		Сопротивление раздиру, кН/м	
		до старения	после старения	до старения	после старения	до старения	после старения	до старения	после старения
70	9,0	6,4	9,0	12,9	11,3	540	380	48	45
	11,0	7,1	9,8	12,8	11,8	520	380	47	46
	13,0	7,7	9,8	12,7	11,2	490	360	47	42
75	10,7	7,2	10,0	12,8	12,1	520	360	51	43
	12,7	8,0	11,0	12,8	12,5	470	350	51	45
	14,7	8,6	11,2	13,1	12,1	460	330	51	41
80	11,5	7,5	10,8	13,0	12,4	510	360	53	40
	13,5	8,3	11,4	13,3	12,6	450	340	58	41
	15,5	9,4	12,1	13,4	12,1	430	300	51	41

Дозировка кремнекислотного наполнителя в составе эластомерных композиций оказывает незначительное влияние на показатель условной прочности при растяжении резин. В данном случае наибольшее изменение отмеченного показателя вулканизатов составляет 5,5%. В то же время для резин после теплового старения определено, что резины с 75 и 80 мас. ч. ККН характеризуются несколько большими показателями условной прочности при растяжении, чем резины с 70 мас. ч. Так, для композиций с 75 мас. ч. кремнезема условная прочность при растяжении составляет 12,1–12,5 МПа, а для резин с 70 мас. ч. – 11,2–11,8 МПа. При этом дозировка каплинг-агента оказывает неоднозначное влияние на прочностные свойства резин, поскольку не выявлено четкой зависимости изменения прочности резины от дозировки силанового связующего агента до и после теплового старения.

В случае показателя относительного удлинения при разрыве установлено, что увеличение дозировки кремнекислотного наполнителя и каплинг-агента приводит к уменьшению эластических свойств резин как до, так и после воздействия повышенной температуры и кислорода воздуха. Для композиций с 70 мас. ч. ККН показатель относительного удлинения при разрыве резин находится в пределах 540–490%, а для композиций с 80 мас. ч. – 510–430%. При этом для резин с 75 мас. ч. кремнекислотного наполнителя увеличение содержания связующего агента X50-S вызывает уменьшение показателя относительного удлинения при разрыве с 520 до 460%. Аналогичный характер изменения эластических свойств от дозировки каплинг-агента выявлен и при других исследуемых дозировках наполнителя.

Результаты определения сопротивления раздиру резин с ККН и каплинг-агентом выявили, что повышение содержания наполнителя приводит к некоторому увеличению данного показателя. Так, для композиций с 70 мас. ч. кремнезема

сопротивление раздиру составляет 47–48 кН/м, а для композиций с 80 мас. ч. наполнителя – 50–58 кН/м. Однако определение стойкости резин разрушению в условиях наличия концентрации напряжения после теплового старения выявило, что вулканизаты с меньшей дозировкой ККН характеризуются большими показателями сопротивления раздиру. При этом влияние дозировки каплинг-агента при увеличении содержания кремнекислотного наполнителя несколько нивелируется. В данном случае резина с 80 мас. ч. ККН и различной дозировкой связующего агента после теплового старения имеет практически одинаковое значение сопротивления раздиру (40–41 кН/м). Для других исследуемых композиций наибольшие показатели сопротивления раздиру резин после теплового старения установлены для композиций с рассчитанной дозировкой каплинг-агента, учитывающей удельную поверхность наполнителя по адсорбции ЦТАБ. Характер изменения показателя сопротивления раздиру может зависеть от плотности сшивания резины и степени вулканизации, а также от количества наполнителя [13].

Таким образом, анализ результатов определения технических свойств резин с кремнекислотным наполнителем и каплинг-агентом показал, что увеличение дозировки кремнезема приводит к повышению условного напряжения при 300%-м удлинении и сопротивления раздиру до теплового старения, оказывает незначительное влияние на прочность резин до теплового старения и снижает эластические показатели вулканизатов. Наиболее существенное изменение свойств вулканизатов в зависимости от дозировки каплинг-агента выявлено только для показателя относительного удлинения при разрыве (увеличение содержания связующего агента приводит к уменьшению эластических характеристик). Установленный характер изменения основных упруго-прочностных свойств резин обусловлен

структурой пространственной сетки, поскольку применяемый связующий агент X50-S в процессе вулканизации может распадаться по сульфидной связи, что приводит к образованию элементарной серы [20]. Увеличение дозировки силана способствует повышению содержания элементарной серы [21] и тем самым обуславливает повышение взаимодействия с макромолекулами каучуками. В результате в резине резко возрастает доля связанного каучука, что приводит к улучшению комплекса свойств резин [22–26].

В табл. 3 приведены результаты определения упруго-гистерезисных свойств шинных резин с различной дозировкой кремнекислотного наполнителя и каплинг-агента.

Таблица 3

Упруго-гистерезисные свойства шинных резин с кремнекислотным наполнителем и каплинг-агентом

Дозировка наполнителя, мас. ч.	Дозировка силана X50-S, мас. ч.	Модуль упругости E' , МПа	Модуль потерь E'' , МПа	Тангенс угла механических потерь $\tan \delta$
70	9,0	9,544	0,997	0,10446
	11,0	9,857	1,039	0,10541
	13,0	10,055	1,061	0,10552
75	10,7	11,645	1,247	0,10708
	12,7	13,005	1,388	0,10672
	14,7	12,480	1,369	0,10970
80	11,5	12,820	1,389	0,10835
	13,5	14,340	1,613	0,11248
	15,5	15,595	1,757	0,11266

Из таблицы видно, что с повышением содержания в составе эластомерных композиций кремнекислотного наполнителя и каплинг-агента увеличиваются гистерезисные потери резин. При этом происходит повышение всех определяемых характеристик вулканизатов (модуля упругости, модуля потерь и тангенса угла механических потерь).

Установленный характер изменения упруго-гистерезисных свойств резин на основе маслонеполненного каучука ДДСК-2560М-27 обусловлен структурой вулканизационной сетки, формируемых в процессе вулканизации плотностью поперечного сшивания и равномерностью рас-

пределения связей в объеме эластомерной матрицы [27].

Закключение. Таким образом, на основании проведенных исследований определено, что повышение дозировки кремнекислотного наполнителя Экстрасил 150ВД в составе эластомерных композиций на основе маслонеполненного растворного бутадиен-стирольного каучука ДССК-2560М-27 наполнителя увеличивает вязкость по Муни резиновых смесей на 8,9–15,9%, практически не оказывает влияние на конфекционную клейкость и способствует повышению когезионной прочности на 17,9–21,6%. При этом дозировка каплинг-агента марки X50-S оказывает неоднозначное влияние на клейкость и когезионную прочность эластомерных композиций, но приводит к некоторому уменьшению (на 3–4 усл. ед. Муни) вязкости по Муни резиновых смесей, что связано с улучшением диспергирования наполнителя в объеме эластомерной матрицы.

Результаты определения технических свойств резин с кремнекислотным наполнителем и каплинг-агентом показали, что увеличение дозировки наполнителя приводит к повышению (на 19,4–25,3%) условного напряжения при 300%-м удлинении и сопротивления раздиру (на 6,3–20,8%) до теплового старения, незначительно влияет на прочность резин до теплового старения и снижает (на 5,5–12,2%) эластические показатели вулканизатов. Увеличение содержания связующего агента X50-S в составе эластомерных композиций вызывает наиболее существенное изменение эластических свойств резин (уменьшение показателя относительно удлинения при разрыве на 9,3–15,7%). Упруго-гистерезисные свойства исследуемых вулканизатов выявили, что дозировка ККН оказывает определяющее влияние на теплообразование резин.

Установленный характер изменения основных технических свойств резин обусловлен структурой пространственной сетки, поскольку в процессе вулканизации, помимо образования поперечных связей между макромолекулами каучука, происходит образование химической связи между кремнеземом и эластомером с помощью каплинг-агента [21], что приводит к образованию поперечных связей различной сульфидности, различиям в их распределении в объеме эластомерной матрицы и плотности поперечного сшивания.

Список литературы

1. Synthesis of mesoporous silica with superior properties suitable for green tire / H. Askwar [et al.] // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2012. Vol. 18, no. 5. P. 1841–1844.
2. Effect of nanosilica surface-capped by bis[3-(triethoxysilyl)propyl] tetrasulfide on the mechanical properties of styrene-butadiene rubber/butadiene rubber nanocomposites / T. Qingfeng [et al.] // Composites Communications. 2018. Vol. 10. P. 190–193.
3. Analysis of the non-linear viscoelastic behaviour of silica filled styrene butadiene rubber / C. Gauthier [et al.] // Polymer. 2004. Vol. 45, no. 8. P. 2761–2771.

4. Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in an efficient vulcanization system / P. Sae-oui [et al.] // *Polymer Testing*. 2005. Vol. 24, no. 4. P. 439–446.
5. Гришин Б. С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития. Казань: КНИТУ, 2016. 420 с.
6. Enhanced interfacial interaction and excellent performance of silica/epoxy group-functionalized styrene-butadiene rubber (SBR) nanocomposites without any coupling agent / Q. He [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 356–364.
7. Effect of the temperature on surface modification of silica and properties of modified silica filled rubber composites / Ya. Li [et al.] // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 62. P. 52–59.
8. ДССК-2163-ПФ/SSBR-2163 PF в пластиковой упаковке 0,45 ТТ 00148889-016-2015. URL: https://shop.sibur.ru/catalog/kauchuki/dssk_2163_pf_ssbr_2163_pf_v_plastikovoy_upakovke_0_45_tt_00148889_016_2015_142977/ (дата обращения: 17.03.2025).
9. Куперман Ф. Е. Новые каучуки для шин. Натуральный каучук. Синтетические стереорегулярные изопреновые и бутадиеновые каучуки. Структура, свойства, применение. М.: НИИШП, 2009. 607 с.
10. Резниченко С. В., Морозова Ю. Л. Большой справочник резинщика: в 2 ч. М.: Техинформ, 2012. Ч. 1: Каучуки и ингредиенты. 744 с.
11. Mihara S. Reactive Processing of Silica-Reinforced Tire Rubber: New Insight into The Time- And Temperature-Dependence of Silica Rubber Interaction. Netherlands: University of Twente, Enschede, 2009. 170 p.
12. Каучуки и резиновые смеси. Определение вязкости, релаксации напряжения и характеристик подвулканизации с использованием вискозиметра Муни: ГОСТ Р 54552–2011. М.: Стандартиформ, 2013. 22 с.
13. Дик Дж. С. Технология резины: рецептуростроение и испытания. СПб.: HOT, 2010. 620 с.
14. Raw rubber or unvulcanized compounds – Determination of green strength: ISO 9026:2007. Geneva: ISO copyright office, 2007. 14 p.
15. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении: ГОСТ 270–75. М.: Стандартиформ, 1975. 29 с.
16. Резина. Определение сопротивления раздиру (раздвоенные, угловые и серповидные образцы): ГОСТ 262–93. М.: Стандартиформ, 2002. 11 с.
17. Резины. Методы испытаний на стойкость к термическому старению: ГОСТ 9.024–74. М.: Стандартиформ, 1974. 12 с.
18. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов. М.: Эксим, 2000. 287 с.
19. Limper A. Mixing of rubber compounds. Munich: Hanser Publishers, 2012. 251 p.
20. White J., De S. K., Naskar K. Rubber technologist's handbook. UK: Smithers Rapra Technology Limited, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, 2009. 450 p.
21. Choi S.-S., Kim I.-S., Chang S. Influence of TESPT content on crosslink types and rheological behaviors of natural rubber compounds reinforced with silica // *Journal of Applied Polymer Science*. 2007. Vol. 106. P. 2753–2758.
22. Song S. H. Study on silica-based rubber composites with epoxidized natural rubber and solution styrene butadiene rubber // *Polym. Polym. Compos.* 2021. Vol. 29, no. 9. P. 1422–1429.
23. Силанизация протекторной резиновой смеси легкой шины. Сообщение 1. Кинетические особенности процесса силанизации / В. П. Дорожкин [и др.] // *Каучук и резина*. 2018. Т. 77, № 3. С. 158–165.
24. Силанизация протекторной резиновой смеси легкой шины. Сообщение 2. Кинетические особенности процесса силанизации / В. П. Дорожкин [и др.] // *Каучук и резина*. 2018. Т. 77, № 3. С. 166–172.
25. Analysis of effect of modification of silica and carbon black co-filled rubber composite on mechanical properties / X. Wang [et al.] // *e-Polymers*. 2021. Vol. 21, no. 1. P. 279–288.
26. Технические свойства эластомерных композиций, содержащих комбинации наполнителей / Ж. С. Шашок [и др.] // *Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. 2024. № 1 (277). С. 55–60.
27. Жовнер Н. А., Чиркова Н. В., Хлебов Г. А. Структура и свойства материалов на основе эластомеров. Омск: Филиал РосЗИТЛП, 2003. 276 с.

References

1. Askwar H., Jong-Kil K., Pradip B. S., Dang V. Q., Godlisten N. Sh., Gideon E., Hee T. K. Synthesis of mesoporous silica with superior properties suitable for green tire. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2012, vol. 18, no. 5, pp. 1841–1844.

2. Qingfeng T., Yuan T., Tao D., Xiaohong Li, Zhijun Zh. Effect of nanosilica surface-capped by bis[3-(triethoxysilyl)propyl] tetrasulfide on the mechanical properties of styrene-butadiene rubber/butadiene rubber nanocomposites. *Composites Communications*, 2018, vol. 10, pp. 190–193.
3. Gauthier C., Reynaud E., Vassoille R., Ladouce-Stelandre L. Analysis of the non-linear viscoelastic behaviour of silica filled styrene butadiene rubber. *Polymer*, 2004, vol. 45, no. 8, pp. 2761–2771.
4. Sae-oui P., Sirisinha Ch., Thepsuwan U., Hathapanit K. Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in an efficient vulcanization system. *Polymer Testing*, 2005, vol. 24, no. 4, pp. 439–446.
5. Grishin B. S. *Teoriya i praktika usileniya elastomerov. Sostoyaniye i napravleniya razvitiya* [Theory and practice of strengthening elastomers. State and directions of development]. Kazan, Izdatel'stvo KNITU Publ., 2016. 420 p. (In Russian).
6. He Q., Mingyuan Ch., David H., Jun L., Junchi Zh., Weiwei L., Xinxin Zh., Runguo W., Liquan Zh. Enhanced interfacial interaction and excellent performance of silica/epoxy group-functionalized styrene-butadiene rubber (SBR) nanocomposites without any coupling agent. *Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 114, pp. 356–364.
7. Li Ya., Han B., Wen Sh., Lu Yo., Yang H., Zhang L., Liu L. Effect of the temperature on surface modification of silica and properties of modified silica filled rubber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol. 62, pp. 52–59.
8. DSSC-2163-PF/SSBR-2163 PF in plastic packaging 0.45 TT 00148889-016-2015. Available at: https://shop.sibur.ru/catalog/kauchuki/dssk_2163_pf_ssbr_2163_pf_v_plastikovoy_upakovke_0_45_tt_00148889_016_2015_142977/ (accessed 17.03.2025) (In Russian).
9. Kuperman F. E. *Novyye kauchuki dlya shin. Natural'nyy kauchuk. Sinteticheskiye stereoregulyarnyye izoprenovyye i butadienovyye kauchuki. Struktura, svoystva, primeneniye* [New rubbers for tires. Natural rubber. Synthetic stereoregular isoprene and butadiene rubbers. Structure, properties, application]. Moscow, NIISHP Publ., 2009. 607 p. (In Russian).
10. Reznichenko S. V., Morozova Yu. L. *Bol'shoy spravochnik rezinshchika* [Great reference book for rubber workers], part 1: Rubbers and ingredients. Moscow, Tekhninform Publ., 2012. 744 p. (In Russian).
11. Mihara S. Reactive Processing of Silica-Reinforced Tire Rubber: New Insight into The Time- And Temperature-Dependence of Silica Rubber Interaction. Netherlands, University of Twente, Enschede, 2009. 170 p.
12. GOST R 54552–2011. Rubbers and rubber compounds. Determination of viscosity, stress relaxation and scorch characteristics using a Mooney viscometer. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 22 p. (In Russian).
13. Dik Dzh. S. *Tekhnologiya reziny: retsepturostroyeniye i ispytaniya* [Rubber technology: formulation development and testing]. St. Petersburg, NOT Publ., 2010. 620 p. (In Russian).
14. ISO 9026:2007. Raw rubber or unvulcanized compounds – Determination of green strength. Geneva, ISO copyright office Publ., 2007. 14 p.
15. GOST 270–75. Rubber. Method for determining tensile elastic strength properties. Moscow, Standartinform Publ., 1975. 29 p. (In Russian).
16. GOST 262–93. Rubber. Determination of tear resistance (split, corner and crescent samples). Moscow, Standartinform Publ., 2002. 11 p. (In Russian).
17. GOST 9.024–74. Rubbers. Test methods for resistance to thermal aging. Moscow, Standartinform Publ., 1974. 12 p. (In Russian).
18. Kornev A. E., Bukanov A. M., Sheverdyayev O. N. *Tekhnologiya elastomernykh materialov* [Elastomeric Materials Technology]. Moscow, Eksim Publ., 2000. 287 p. (In Russian).
19. Limper A. Mixing of rubber compounds. Munich, Hanser Publishers, 2012. 251 p.
20. White J., De S. K., Naskar K. Rubber technologist's handbook. UK, Smithers Rapra Technology Limited, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, 2009. 450 p.
21. Choi S.-S., Kim I.-S., Chang S. Influence of TESPT content on crosslink types and rheological behaviors of natural rubber compounds reinforced with silica. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, vol. 106, pp. 2753–2758.
22. Song S. H. Study on silica-based rubber composites with epoxidized natural rubber and solution styrene butadiene rubber. *Polym. Polym. Compos*, 2021, vol. 29, no. 9, pp. 1422–1429.
23. Dorozhkin V. P., Salaev M. V., Mokhnatkin A. M., Mokhnatkina E. G., Makhotin A. A., Prinada A. L. Silanization of the tread rubber compound of a passenger tire. Message 1. Kinetic features of the silanization process. *Kauchuk i rezina* [Rubber and rubber], 2018, vol. 77, no. 3, pp. 158–165 (In Russian).
24. Dorozhkin V. P., Salaev M. V., Mokhnatkin A. M., Mokhnatkina E. G., Makhotin A. A., Prinada A. L. Silanization of the tread rubber compound of a passenger tire. Message 2. Kinetic features of the silanization process. *Kauchuk i rezina* [Rubber and rubber], 2018, vol. 77, no. 3, pp. 166–172 (In Russian).
25. Wang X., Wu L., Yu H., Xiao T., Li H., Yang J. Analysis of effect of modification of silica and carbon black co-filled rubber composite on mechanical properties. *e-Polymers*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 279–288.

26. Shashok Zh. S., Uss E. P., Krotova O. A., Leshkevich A. V., Kayushnikov S. N., Lyushtyk A. Yu. Technical properties of elastomer compositions containing combinations of fillers. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnology, Geoecology, 2024, no. 1 (277), pp. 55–60 (In Russian).

27. Zhovner N. A., Chirkova N. V., Khlebov G. A. *Struktura i svoystva materialov na osnove elastomerov* [Structure and properties of materials based on elastomers]. Omsk, Filial RosZITLP Publ., 2003. 276 p. (In Russian).

Информация об авторах

Люштык Андрей Юрьевич – главный химик – начальник лаборатории. ОАО «Белшина» (ул. Минское шоссе, 213824, г. Бобруйск, Республика Беларусь). E-mail: jb133xxxx@gmail.com

Шашок Жанна Станиславовна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: shashok@belstu.by

Усс Елена Петровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: uss@belstu.by

Кротова Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: o.krotova@belstu.by

Лешкевич Анастасия Владимировна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: leshkevich@belstu.by

Information about the authors

Lyushtyk Andrey Yur'yevich – Chief Chemist – Head of the Laboratory. JSC “Belshina” (Minskoye shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: jb133xxxx@gmail.com

Shashok Zhanna Stanislavovna – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shashok@belstu.by

Uss Elena Petrovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: uss@belstu.by

Krotova Olga Aleksandrovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.krotova@belstu.by

Leshkevich Anastasiya Vladimirovna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leshkevich@belstu.by

Поступила 25.04.2025