

Исследование влияния температурно-временных условий вулканизации на свойства эластомерных композиций

Жанна С. Шашок¹ shashok@belstu.by  0000-0003-2279-6866

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

Аннотация. Исследовано влияние температурно-временных условий вулканизации на кинетические параметры структурирования резиновых смесей и физико-механические показатели резин. Объектом исследования являлась эластомерная композиция на основе натурального каучука, содержащая серную вулканизирующую систему. Исследуемые резины были получены при различных временных режимах и температурах 143, 160 и 170°C. Определено, что с увеличением температуры вулканизации значения минимального крутящего момента уменьшаются на 11,6–15,6%, а максимального крутящего момента увеличиваются на 3,5–4,1%, при этом установлено повышение плотности поперечного сшивания резин на 6,2–7,5%. Анализ результатов определения физико-механических показателей резин выявил, что при температуре 143°C время вулканизации не оказывает существенного влияния на упруго-прочностные показатели резин и вулканизаты характеризуются наибольшими значениями условной прочности при растяжении как до, так и после теплового старения. Установлено, что с повышением температурного режима вулканизации происходит активизация побочных процессов, приводящая к снижению показателей упруго-прочностных свойств резин (уменьшению условной прочности при растяжении на 9,2–16,4% и относительного удлинения при разрыве до 7,2%). Вулканизаты, полученные при 170°C, характеризуются наименьшими показателями как упруго-прочностных свойств, так и твердости по Шору А, эластичности по отскоку, что обусловлено густотой сетки и природой поперечных связей. Результаты исследований показали, что при выборе окончательного режима вулканизации, особенно многослойных изделий, необходимо учитывать не только энергозатраты при производстве готовой продукции, но и влияние температурно-временных параметров на комплекс физико-механических свойств каждого составного элемента изделия.

Ключевые слова: вулканизация, резиновая смесь, резина, температура, продолжительность вулканизации

Study of the influence of temperature-time conditions of vulcanization on the properties of elastomer compositions

Zhanna S. Shashok¹ shashok@belstu.by  0000-0003-2279-6866

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

Abstract. The article was devoted to the study of the influence of temperature-time conditions of vulcanization on the kinetic parameters of structuring of rubber compounds and the physical and mechanical properties of rubbers. The object of the study was an elastomeric composition based on natural rubber and containing a sulfur curing system. The investigated rubbers were obtained under various time conditions and temperatures of 143, 160 and 170°C. It was determined that with an increase in the vulcanization temperature, the values of the minimum torque decrease by 11.6–15.6%, and the maximum torque increase by 3.5–4.1%, at the same time the density of rubber cross-linking increases by 6.2–7.5%. Analysis of the results of determining the physical and mechanical parameters of rubbers revealed that at a temperature of 143°C the vulcanization time does not significantly affect the elastic-strength parameters of rubbers and vulcanizates are characterized by the highest values of tensile strength both before and after thermal aging. It has been established that with an increase in the vulcanization temperature, side processes are activated, leading to a decrease in the elastic-strength properties of rubber (a decrease in tensile strength by 9.2–16.4% and elongation at break up to 7.2%). Vulcanizates obtained at 170°C are characterized by the lowest indicators of elastic-strength properties, hardness Shore A and rebound resilience, which is due to the density of the network and the nature of cross-links. The research results showed that when choosing the final vulcanization mode, especially for multilayer products, it is necessary to take into account not only the energy consumption in the production of finished products, but also the influence of temperature and time parameters on the complex of physical and mechanical properties of each component of the product.

Keywords: vulcanization, rubber compound, rubber, temperature, vulcanization time.

Введение

Вулканизация является заключительным и решающим этапом при получении изделий из эластомеров, так как на этой стадии переработки пластическая резиновая смесь превращается в эластично-отвержденную резину путем формирования пространственной трехмерной сетки. Условия проведения процесса вулканизации, а также состав резиновых смесей оказывают существенное влияние на технические и эксплуатационные свойства резины [1, 2].

Для цитирования

Шашок Ж.С. Исследование влияния температурно-временных условий вулканизации на свойства эластомерных композиций // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 3. С. 166–171. doi:10.20914/2310-1202-2022-3-166-171

For citation

Shashok Zh.S. Study of the influence of temperature-time conditions of vulcanization on the properties of elastomer compositions. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 3. pp. 166–171. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-3-166-171

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

Вулканизирующие вещества представляют собой химически активные соединения, принимающие участие в образовании пространственной структуры вулканизатов. В процессе образования пространственной структуры с увеличением степени поперечного сшивания происходит уменьшение среднечисловых отрезков цепей полимера и соответственно увеличение количества поперечных связей в единице объема вулканизата. С изменением степени поперечного сшивания происходит постепенное изменение свойств вулканизатов [5, 6].

Цель работы – исследование влияния температурно-временных режимов вулканизации на изменение основных кинетических параметров формирования пространственной сетки вулканизатов и физико-механических показателей резиновых смесей и резин на их основе.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась наполненная эластомерная композиция на основе натурального каучука (НК), применяемая для изготовления деталей грузовых шин. Композиция содержала серную вулканизирующую систему, состоящую из серы в повышенной дозировке (3,9 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука) и сульфенамидного ускорителя вулканизации (1,1 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука).

Определение кинетических параметров вулканизации осуществлялось на реометре MDR 2000 согласно ГОСТ Р 54547–2011 при температурах 143, 160 и 170 °С. Упруго-прочностные характеристики образцов определялись на разрывной машине Тензометр Т 220 DC в соответствии с ГОСТ 270–75. Стойкость образцов к термическому старению в среде воздуха оценивалась по изменению относительного удлинения при разрыве и условной прочности при растяжении после выдержки их в термостате при температуре 100 ± 1 °С в течение 72 ± 1 ч, испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.024–74. Твердость резин по Шор А определялось

в соответствии с ГОСТ 263–75, а эластичность по отскоку по ГОСТ 27110–86.

Результаты и обсуждение

В процессе вулканизации вулканизирующий агент взаимодействует с ненасыщенными полиизопреновыми цепями в НК, формируя сшивки, химически соединяющие молекулы вместе в определенных точках по всему объему полимера. Это необходимая стадия при получении материалов со свойствами эластомера, поскольку наличие сшивок обеспечивает эластичное восстановление материала при приложении значительной деформации. При вулканизации натурального каучука с использованием серы сшивки могут включать в себя один, два или больше атомов серы в зависимости от условий вулканизации и используемого реагента [6, 7].

Характеристики вулканизации резиновой смеси играют важную роль в переработке эластомерных композиций и определяют основу для базового анализа технологических режимов получения готового изделия, поскольку поведение при структурировании существенно зависит от типа каучука и используемых добавок, а также условий проведения процесса [7].

Результаты определения основных параметров вулканизации резиновой смеси на основе НК при различных температурах представлены в таблице 1.

На основании полученных данных установлено, что для исследуемых резиновых смесей значения минимального крутящего момента, характеризующего их вязкость, уменьшаются с увеличением температуры вулканизации на 11,6–15,6%. В то же время значения максимального крутящего момента изменяются всего на 3,5–4,1%. Повышение температуры вулканизации обуславливает сокращение времени продолжительности индукционного периода (показатель t_{s2} уменьшается), времени достижения оптимальной степени вулканизации (показатель t_{90} уменьшается) и увеличение скорости вулканизации.

Таблица 1.

Вулканизационные характеристики резиновых смесей на основе НК

Table 1.

Vulcanization characteristics of rubber compounds based on NK

Температура, °С Temperature, °С	Показатели Indicators								
	M_L , дН×м dN×m	M_H , дН×м dN×m	t_{s2} , мин min	t_{50} , мин min	t_{90} , мин min	R_h , дН×м/мин dN×m/min	ΔS , дН×м dN×m	$tg\delta(M_H)$	$tg\delta(M_L)$
143	2,50	16,91	8,20	11,29	20,45	1,84	14,41	0,078	0,524
160	2,21	17,51	2,36	3,52	7,04	5,12	15,30	0,059	0,548
170	2,11	17,60	1,23	2,07	3,40	9,27	15,49	0,072	0,588

Примечание: M_L – минимальный крутящий момент, дН×м; M_H – максимальный крутящий момент, дН×м; t_{s2} – время увеличения минимального крутящего момента на 2 единицы, мин; t_{50} – время достижения заданной степени вулканизации, мин; t_{90} – время достижения оптимальной степени вулканизации, мин; R_h – скорость вулканизации, дН × м/мин; ΔS – разница между максимальным и минимальным крутящими моментами, дН×м; $tg\delta(M_H)$ – тангенс угла механических потерь при максимальном крутящем моменте; $tg\delta(M_L)$ – тангенс угла механических потерь при минимальном крутящем моменте.

Note: M_L – minimum torque, dN×m; M_H – maximum torque, dN×m; t_{s2} – time to increase the minimum torque by 2 units, min; t_{50} – time to reach the specified degree of vulcanization, min; t_{90} – time to reach the optimal degree of vulcanization, min; R_h – vulcanization rate, dN · m / min; ΔS – difference between maximum and minimum torques, dN×m; $tg\delta(M_H)$ – loss tangent at maximum torque; $tg\delta(M_L)$ – tangent of mechanical loss angle at minimum torque

Следует отметить, что показатель разницы между максимальным и минимальным крутящими моментами ΔS , который косвенно характеризует плотность поперечного сшивания резин [8, 9], возрастает на 6,2–7,5% с повышением температуры. Изменение плотности сшивания обусловлено, прежде всего тем, что на начальном этапе вулканизации образуются полисульфидные связи, которые затем в результате распада и перегруппировки могут превращаться в моно- и дисульфидные связи. Разложение полисульфидных поперечных связей также приводит к образованию большого количества радикалов серы, которые могут дополнительно осуществлять процесс сшивания макромолекул каучука [10]. Кроме того, механические свойства вулканизатов напрямую связаны с типом и плотностью поперечных связей [7].

Анализ полученных данных показал, что наименьшим значением тангенса угла механических потерь при максимальном крутящем моменте (0,059) характеризуется композиция при температуре вулканизации 160 °С.

Вулканизация резиновых смесей осуществляется при использовании различных теплоносителей, температура которых достигает до 200 °С. Применение высоких температурных режимов при производстве шин позволяет повысить производительность оборудования и увеличить выпуск продукции. Однако при этом необходимо учитывать изменение основных характеристик резин и их стойкость к реверсии

в условиях длительного воздействия высоких температур. В таблице 2 приведены результаты определения влияния температурно-временных параметров вулканизации на физико-механические показатели исследуемых резин.

Результаты исследования резин до теплового старения показали, что при температуре 143 °С время вулканизации не оказывает существенного влияния на упруго-прочностные показатели резин. Показатель условного напряжения при удлинении 300% находится в пределах 12,6–13,0 МПа, а условной прочности при растяжении – 25,1 – 27,8 МПа. Аналогичные зависимости выявлены для показателей эластичности по отскоку и твердости по Шору А.

При температуре 160 °С с увеличением времени вулканизации условная прочность при растяжении уменьшается на 9,2% (с 26,1 МПа до 23,7 МПа), при этом эластические свойства резин изменяются незначительно. В то же время установлено более существенное влияние времени вулканизации на показатели эластичности по отскоку и твердости по Шору А (изменение составляет до 4,0 усл. ед. Шор А при различных температурах измерения и до 8% эластичности по отскоку).

Установлено, что при температуре 170 °С увеличение продолжительности вулканизации приводит к наиболее существенным изменениям показателей физико-механических свойств вулканизатов.

Физико-механические показатели исследуемых резин до и после теплового старения

Таблица 2.

Table 2.

Physical and mechanical parameters of the studied rubbers before and after thermal aging

Показатель Indicator	Показатели резин, полученные при различных температурно-временных параметрах Rubber indicators obtained at various temperature-time parameters												
	143 °С				160 °С				170 °С				
	30 мин min	40 мин min	60 мин min	90 мин min	10 мин min	20 мин min	30 мин min	60 мин min	90 мин min	5 мин min	10 мин min	20 мин min	40 мин min
до теплового старения before heat aging													
f_ϵ	12,6	13,0	13,1	13,0	11,8	12,2	12,0	10,6	10,2	11,4	11,3	10,9	9,8
f	27,8	26,4	26,0	25,1	26,1	25,7	25,7	24,2	23,7	26,9	26,0	23,4	22,5
ϵ	510	490	480	480	520	510	500	500	500	550	520	510	510
H	66	66	67	68	66	66	66	63	62	65	64	62	61
H^*	64	64	65	64	62	62	62	59	58	61	60	59	57
\mathcal{E}	49	50	49	48	50	47	46	46	46	48	48	46	45
\mathcal{E}^*	60	60	59	59	62	59	57	56	54	58	55	55	54
после теплового старения after heat aging													
f	13,3	13,5	13,6	13,3	9,9	9,9	12,3	12,7	11,4	10,0	9,6	9,6	8,8
ϵ	250	230	230	240	180	190	230	240	240	180	180	210	220

Примечание: f_ϵ – условное напряжение при удлинении 300%, МПа; f – условная прочность при растяжении, МПа; ϵ – относительное удлинение при разрыве,%; H – твердость, усл. ед. Шор А; H^* – твердость при 100 °С, усл. ед. Шор А; \mathcal{E} – эластичность по отскоку,%; \mathcal{E}^* – эластичность по отскоку при 100°,%.

Note: f_ϵ – tensile modulus at 300% elongation, MPa; f – tensile strength, MPa; ϵ – elongation at break,%; H – hardness, Shore A; H^* – hardness at 100° C, Shore A; \mathcal{E} – rebound elasticity,%; \mathcal{E}^* – rebound elasticity at 100 °C, %

В данном случае с увеличением времени вулканизации уменьшение условного напряжения при удлинении 300% составляет 14,0%, условной прочности при растяжении резин – 16,4%, а относительного удлинения при разрыве – 7,3%. Показатели твердости резин по Шору А и эластичности по отскоку также имеют наименьшие значения по сравнению с резинами, полученными при более низких температурах. Уменьшение прочностных свойств резин может быть связано с увеличением густоты сетки поперечных связей, затрудняющей ориентацию молекулярных сегментов при растяжении [11].

Определение основных упруго-прочностных свойств резин после теплового старения показало, что вулканизаты, полученные при 143 °С характеризуются наибольшими показателями условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве, при чем продолжительность вулканизации практически не оказывает влияния на стойкость резин к воздействию повышенной температуры и кислорода воздуха. В то же время для резин, свулканизованных при 160 °С, наилучшие показатели прочностных и эластических свойств определены при вулканизации в течение 30 и 60 мин. Вулканизаты, полученные при 170 °С, характеризуются наименьшими значениями условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве после теплового старения по сравнению с резинами, свулканизованными

при меньших температурах. Выявленный характер изменения свойств обусловлен структурой вулканизатов, а именно природой поперечных связей и их плотностью сшивания. В процессе вулканизации резиновых смесей помимо основной реакции структурирования в объеме эластомерной композиции протекают побочные процессы, связанные не только с распадом и перегруппировкой полисульфидных поперечных связей, но и цис-транс-изомеризацией цепей, циклизацией, окислением, деструкцией и др. [12–20], что в итоге оказывает влияние на пространственную сетку вулканизатов и их стойкость к воздействию агрессивных факторов.

Заключение

В результате определения кинетических параметров вулканизации и физико-механических показателей резиновых смесей и резин на их основе выявлено, что повышение температуры вулканизации способствует увеличению скорости процесса формирования пространственной сетки и оказывает влияние на структуру вулканизата. В связи с этим при выборе окончательного режима вулканизации, особенно многослойных изделий, необходимо учитывать не только энергозатраты при производстве готовой продукции, но и влияние температурно-временных параметров на комплекс физико-механических свойств каждого составного элемента изделия.

Литература

- 1 Indrajati I.N., Dewi I.R. Performance of binary accelerator system on natural rubber compound // *Majalah Kulit Karet dan Plastik*. 2018. V. 34. P. 49–60. doi: 10.20543/mkpp.v34i2.4049.
- 2 Wreczycki Ja., Bielinski D.M., Anyszka R. Sulfur/Organic Copolymers as Curing Agents for Rubber // *Polymers*. 2018. V. 10. doi: 10.3390/polym10080870.
- 3 Marković G., Marinović-Cincović M., Samaržija-Jovanović S., Jovanović V. et al. Crosslinking of Polymers: Rubber Vulcanization // *Reactive and Functional Polymers*. 2020. V. 2. P. 117–134. doi: 10.1007/978-3-030-45135-6_5.
- 4 Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика: в 2 ч. Ч. 1: Каучуки и ингредиенты. М.: Техинформ, 2012. 744 с.
- 5 Ibadullaev A., Teshabaeva E., Vapaev M. Composite Elastomer Materials Based On New Ingredients // *Chemistry and Chemical Engineering*. 2021. № 2. P. 31–44. doi: 10.51348/ZNKZ7723.
- 6 Шахрампур Х. Влияние типа вулканизирующего агента на физические и термические свойства полимерной матрицы бутадиен-стирольного и натурального каучука // *Нефтехимия*. 2018. Т. 58. № 4. С. 515–521. doi: 10.1134/S002824211804024X.
- 7 Kim D.Y., Park J.W., Lee D. Yu., Seo K.H. Correlation between the Crosslink Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound via Accelerators and Reinforcement // *Polymers*. 2020. V. 12. № 9. doi: 10.3390/polym12092020.
- 8 Sathi S.G., Harea E., Machů A., Stoček R. Facilitating high-temperature curing of natural rubber with a conventional accelerated-sulfur system using a synergistic combination of bismaleimides // *eXPRESS Polymer Letters*. 2021. V. 15. № 1. P. 16–27. doi: 10.3144/expresspolymlett.2021.3.
- 9 Hayeemasae N., Soontaranon, S., Rasidi M.S.M., Masa, A. Tensile and Structural Properties of Natural Rubber Vulcanizates with Different Mastication Times // *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 2021. V. 31. doi: 10.1590/0104-1428.09120.
- 10 Saito T., Yamano M., Nakayama K., Kawahara S. Quantitative analysis of crosslinking junctions of vulcanized natural rubber through rubber-state NMR spectroscopy // *Polymer Testing*. 2021. V. 96. doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107130.
- 11 Bukit N., Ginting E.M., Pardede I.S., Frida E., et al. Mechanical Properties of Natural Rubber Compounds with Oil palm boiler ash and Carbon Black as a Filler // *Journal of Physics*. 2018. V. 1120. P. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/1428/1/012020.

- 12 Yamano M., Yamamoto Yo., Saito T., Kawahara S. Preparation and characterization of vulcanized natural rubber with high stereoregularity // *Polymer*. 2021. V. 235. doi: 10.1016/j.polymer.2021.124271.
- 13 Khang T. H., Ariff Z. M. Vulcanization kinetics study of natural rubber compounds having different formulation variables // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012. V. 109. №. 3. P. 1545-1553. doi: 10.1007/s10973-011-1937-3
- 14 Kruželák J., Sýkora R., Hudec I. Vulcanization of rubber compounds with peroxide curing systems // *Rubber chemistry and technology*. 2017. V. 90. №. 1. P. 60-88. doi: 10.5254/rct.16.83758
- 15 Kruželák J., Hudec I. Vulcanization systems for rubber compounds based on IIR and halogenated IIR: an overview // *Rubber Chemistry and Technology*. 2018. V. 91. №. 1. P. 167-183. doi: 10.5254/rct-18-82609
- 16 Zanchet A., Demori R., De Sousa F.D.B., Ornaghi Jr H.L. et al. Sugar cane as an alternative green activator to conventional vulcanization additives in natural rubber compounds: Thermal degradation study // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 207. P. 248-260. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.203
- 17 Ortega L., Cervený S., Sill C., Isitman N.A. et al. The effect of vulcanization additives on the dielectric response of styrene-butadiene rubber compounds // *Polymer*. 2019. V. 172. P. 205-212. doi: 10.1016/j.polymer.2019.03.073
- 18 Khimi S.R., Pickering K.L. A new method to predict optimum cure time of rubber compound using dynamic mechanical analysis // *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. V. 131. №. 6. doi: 10.1002/app.40008
- 19 Fazli A., Rodrigue D. Recycling waste tires into ground tire rubber (GTR)/rubber compounds: a review // *Journal of Composites Science*. 2020. V. 4. №. 3. P. 103. doi: 10.3390/jcs4030103
- 20 Vélez J.S., Velásquez S., Giraldo D. Mechanical and rheometric properties of gilsonite/carbon black/natural rubber compounds cured using conventional and efficient vulcanization systems // *Polymer Testing*. 2016. V. 56. P. 1-9. doi: 10.1016/j.polymertesting.2016.09.005


References

- 1 Indrajati I.N., Dewi I.R. Performance of binary accelerator system on natural rubber compound. *Majalah Kulit Karet dan Plastik*. 2018. vol. 34. pp. 49–60. doi: 10.20543/mkpp.v34i2.4049.
- 2 Wreczycki Ja., Bielinski D.M., Anyszka R. Sulfur/Organic Copolymers as Curing Agents for Rubber. *Polymers*. 2018. vol. 10. doi: 10.3390/polym10080870.
- 3 Marković G., Marinović-Cincović M., Samaržija-Jovanović S., Jovanović V. et al. Crosslinking of Polymers: Rubber Vulcanization. *Reactive and Functional Polymers*. 2020. vol. 2. pp. 117–134. doi: 10.1007/978-3-030-45135-6_5.
- 4 Reznichenko S.V., Morozov Yu. L. Large handbook of rubber technologist. Part 1: Rubbers and Ingredients. Moscow, Tekhinform, 2012. 744 p. (in Russian).
- 5 Ibadullaev A., Teshabaeva E., Vapaev M. Composite Elastomer Materials Based On New Ingredients Chemistry and Chemical Engineering. 2021. no. 2. pp. 31–44. doi: 10.51348/ZNKZ7723.
- 6 Shahrapur H. Influence of the type of vulcanizing agent on the physical and thermal properties of the polymer matrix of styrene-butadiene and natural rubber. *Petrochemistry*. 2018. vol. 58. no. 4. pp. 515–521. doi: 10.1134/S002824211804024X (in Russian).
- 7 Kim D.Y., Park J.W., Lee D. Yu., Seo K.H. Correlation between the Crosslink Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound via Accelerators and Reinforcement. *Polymers*. 2020. vol. 12. no. 9. doi: 10.3390/polym12092020.
- 8 Sathi S.G., Harea E., Machů A., Stoček R. Facilitating high-temperature curing of natural rubber with a conventional accelerated-sulfur system using a synergistic combination of bismaleimides. *eXPRESS Polymer Letters*. 2021. vol. 15. no. 1. pp. 16–27. doi: 10.3144/expresspolymlett.2021.3.
- 9 Hayeemasae N., Soontaranon, S., Rasidi M.S.M., Masa, A. Tensile and Structural Properties of Natural Rubber Vulcanizates with Different Mastication Times. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 2021. vol. 31. doi: 10.1590/0104-1428.09120.
- 10 Saito T., Yamano M., Nakayama K., Kawahara S. Quantitative analysis of crosslinking junctions of vulcanized natural rubber through rubber-state NMR spectroscopy. *Polymer Testing*. 2021. vol. 96. doi: org/10.1016/j.polymertesting.2021.107130.
- 11 Bukit N., Ginting E.M., Pardede I.S., Frida E., et al. Mechanical Properties of Natural Rubber Compounds with Oil palm boiler ash and Carbon Black as a Filler. *Journal of Physics*. 2018. vol. 1120. pp. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/1428/1/012020.
- 12 Yamano M., Yamamoto Yo., Saito T., Kawahara S. Preparation and characterization of vulcanized natural rubber with high stereoregularity. *Polymer*. 2021. vol. 235. doi: 10.1016/j.polymer.2021.124271
- 13 Khang T. H., Ariff Z. M. Vulcanization kinetics study of natural rubber compounds having different formulation variables. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012. vol. 109. no. 3. pp. 1545-1553. doi: 10.1007/s10973-011-1937-3
- 14 Kruželák J., Sýkora R., Hudec I. Vulcanization of rubber compounds with peroxide curing systems. *Rubber chemistry and technology*. 2017. vol. 90. no. 1. pp. 60-88. doi: 10.5254/rct.16.83758
- 15 Kruželák J., Hudec I. Vulcanization systems for rubber compounds based on IIR and halogenated IIR: an overview. *Rubber Chemistry and Technology*. 2018. vol. 91. no. 1. pp. 167-183. doi: 10.5254/rct-18-82609
- 16 Zanchet A., Demori R., De Sousa F.D.B., Ornaghi Jr H.L. et al. Sugar cane as an alternative green activator to conventional vulcanization additives in natural rubber compounds: Thermal degradation study. *Journal of Cleaner Production*. 2019. vol. 207. pp. 248-260. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.203
- 17 Ortega L., Cervený S., Sill C., Isitman N.A. et al. The effect of vulcanization additives on the dielectric response of styrene-butadiene rubber compounds. *Polymer*. 2019. vol. 172. pp. 205-212. doi: 10.1016/j.polymer.2019.03.073
- 18 Khimi S.R., Pickering K.L. A new method to predict optimum cure time of rubber compound using dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. vol. 131. no. 6. doi: 10.1002/app.40008


19 Fazli A., Rodrigue D. Recycling waste tires into ground tire rubber (GTR)/rubber compounds: a review. Journal of Composites Science. 2020. vol. 4. no. 3. pp. 103. doi: 10.3390/jcs4030103

20 Vélez J.S., Velásquez S., Giraldo D. Mechanical and rheometric properties of gilsonite/carbon black/natural rubber compounds cured using conventional and efficient vulcanization systems. Polymer Testing. 2016. vol. 56. pp. 1-9. doi: 10.1016/j.polymertesting.2016.09.005

Сведения об авторах

Жанна С. Шашок д.т.н., профессор, 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>

Information about authors

Zhanna S. Shashok Dr. Sci. (Engin.), 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>

Вклад авторов

Жанна С. Шашок написала рукопись, корректировала её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Zhanna S. Shashok wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила 28/06/2022	После редакции 14/07/2022	Принята в печать 10/08/2022
Received 28/06/2022	Accepted in revised 14/07/2022	Accepted 10/08/2022