

Исследование влияния поверхности оксида цинка на вулканизацию полидиенов

Александр А. Голякевич¹ sasha4292@ya.ru  0000-0003-4206-8874

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Проведены испытания комплексных активаторов вулканизации с содержанием оксида цинка 30 масс. % на основе бентонита марки ПТ₂ и цинковых белил с различной площадью удельной поверхности. Исследованы вулканизационные и упруго-прочностные свойства опытных и эталонных резиновых смесей на основе каучука SKI-3 и их вулканизатов. Опытные резиновые смеси получены путём замены традиционной активаторной системы (оксид цинка (5 масс. ч.) и стеариновая кислота (2 масс.ч.)) на комплексный активатор вулканизации (5 масс. ч.). Установлено, что минимальный крутящий момент у опытных смесей был ниже, что свидетельствует о хороших технологических свойствах опытных резиновых смесей. Время оптимума и скорость вулканизации были выше у эталонных образцов. Образцы комплексных активаторов вулканизации, содержащие частицы оксида цинка с удельной поверхностью от 5,2 до 18,1 м²/г характеризовались большей устойчивостью к преждевременной вулканизации. Установлено, что применение комплексных активаторов вулканизации позволяет сократить общее время изготовления резиновых смесей и вулканизатов. Упруго-прочностные показатели опытных резин в присутствии комплексных активаторов вулканизации находились на уровне эталонных. Стоит отметить лучшие показатели относительного удлинения при разрыве для опытных образцов. Установлено, что комплексный активатор вулканизации со сниженным содержанием оксида цинка и удельной поверхностью частиц оксида цинка от 4 до 7,5 м²/г мм обеспечивают лучший комплекс физико-механических свойств и могут быть рекомендованы к практическому использованию в составе резиновых смесей, что позволит снизить содержание токсичного для окружающей среды оксида цинка и улучшить технико-эксплуатационные показатели резиновых изделий.

Ключевые слова: комплексный активатор вулканизации, резиновая смесь, вулканизаты, цинковые белила

Investigation of zinc oxide surface effect on polydienes vulcanization

Alexander A. Golyakevich¹ sasha4292@ya.ru  0000-0003-4206-8874

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Tests were carried out of complex vulcanization activators containing 30 wt. % zinc oxide based on PT₂ bentonite and zinc oxide with different specific surface areas. Vulcanization and elastic-strength properties of experimental and reference rubber compounds based on SKI-3 rubber and their vulcanizates were investigated. The experimental rubber compounds were obtained by replacing the traditional activator system (zinc oxide (5 parts by weight) and stearic acid (2 parts by weight)) with a complex vulcanization activator (5 parts by weight). It was found that the minimum torque in the experimental compounds was lower, which indicates good technological properties of the experimental rubber compounds. The optimum time and vulcanization rate were higher in the reference samples. Samples of complex vulcanization activators containing zinc oxide particles with a specific surface area from 5.2 to 18.1 m²/g were characterized by greater resistance to premature vulcanization. It has been established that the use of complex vulcanization activators allows to reduce the total time of manufacturing rubber compounds and vulcanizates. The elastic-strength indicators of the experimental rubbers in the presence of complex vulcanization activators were at the level of the reference ones. It is worth noting the best indicators of relative elongation at break for the experimental samples. It has been established that a complex vulcanization activator with a reduced content of zinc oxide and a specific surface area of zinc oxide particles from 4 to 7.5 m²/g mm provides the best set of physical and mechanical properties and can be recommended for practical use in rubber compounds, which will reduce the content of toxic zinc oxide for the environment and improve the technical and operational indicators of rubber products.

Keywords: complex vulcanization activator, rubber compound, vulcanizates, zinc white

Введение

В технологии производства шин и резинотехнических изделий в качестве полимерной основы наиболее широко используются ненасыщенные каучуки, для сшивания которых применяется серно-ускорительная вулканизирующая группа [1]. Получение высококачественных изделий, отвечающих эксплуатационным требованиям, невозможно без использования

широкой номенклатуры химических веществ в рецептурах резин. На сегодняшний день современные технологии производства резиновых изделий требуют не только разработки новых соединений, но и повышения эффективности использования в рецептурах уже применяемых ингредиентов, улучшения технологичности, снижения энергозатрат и минимизацию экологической нагрузки на всех стадиях жизненного цикла эластомера.

Для цитирования

Голякевич А.А. Исследование влияния поверхности оксида цинка на вулканизацию полидиенов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 1. С. 266–271. doi:10.20914/2310-1202-2025-1-266-271

For citation

Golyakevich A.A. Investigation of zinc oxide surface effect on polydienes vulcanization. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 266–271. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-1-266-271

В большинстве рецептов на основе диеновых каучуков оксид цинка (ZnO) применяется в качестве активатора серной вулканизации и участвует в образовании сшитой структуры эластомера, за счёт формирования промежуточного активного комплекса из компонентов вулканизирующей группы (серы, ускорителя и активаторов вулканизации) – действительного агента вулканизации (ДАВ) [1, 2].

Авторами [3, 4] определена структура промежуточного комплекса (рисунок 1), образованного между ZnO и стеариновой кислотой состоящая из двухмостиковых бидентатных лигандов стеариновой кислоты, координированных с двумя ионами цинка с молярным соотношением «Zn : стеариновая кислота», равным 1:1. Структура комплекса представляет собой $(Zn_2(\mu-O_2 C C_{17} H_{35})_2)^2+(OH)_2 \cdot XV$, где X и Y – либо два каучуковых сегмента, или молекула воды и один каучуковый сегмент, или две молекулы воды в качестве лигандов.

Способность цинковых белил образовывать ДАВ зависит от кристаллической структуры, площади удельной поверхности. Предполагается, что увеличение площади удельной поверхности оксида цинка может обеспечить высокие физико-механические и вулканизационные показатели при сниженном его содержании [5].

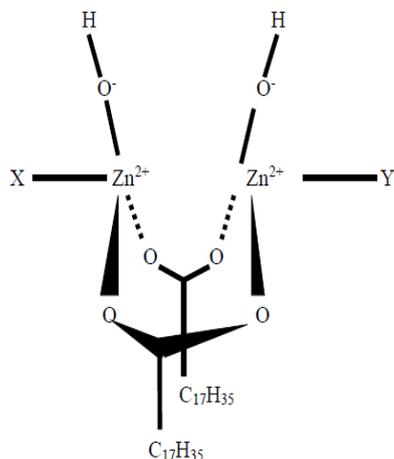


Рисунок 1. Структура двухъядерного типа, соединяющая бидентатный комплекс цинк / стеарат
Figure 1. The binuclear type structure connecting the bidentate zinc/stearate complex

Известно [6], что образование ДАВ происходит только на поверхности кристалла оксида цинка (ZnO), поэтому применение цинковых белил с высокой удельной поверхностью способствует увеличению количества центров формирования вулканизационных узлов пространственной сетки вулканизата и позволяет

получать резины с более высокой концентрацией поперечных связей. Однако цинковые белила плохо диспергируются при смешении в каучуке и имеют склонность к агломерации, а образующиеся поперечные связи могут быть неоднородными, локализованными, вулканизаты могут иметь области с сильно сшитыми и несшитыми участками, что приводит к снижению физико-механических показателей резин.

При производстве резинотехнических изделий особую актуальность приобретает задача снижения содержания соединений цинка в рецептурах резиновых смесей, в том числе за счёт создания компонентов для вулканизации с пониженным содержанием цинка [7]. Последние исследования показали, что для обеспечения экологически безопасных показателей эластомеров содержание ZnO не должно превышать 1 масс. %, однако, в этом случае снижаются физико-механические показатели резин.

Одним из путей решения этой проблемы является получение премиксов на основе оксида цинка. В работах [8–10] представлены результаты исследований по созданию комплексного активатора вулканизации (КАВ) на основе оксида цинка, жирных кислот и наполнителей, применение которых позволяет не только улучшить технологичность резиновых смесей, но и снизить содержание оксида цинка при замене стандартной активационной группы, улучшить диспергируемость продукта.

Целью работы являлось изучение возможности применения в комплексном активаторе вулканизации оксида цинка, отличающегося от стандартизованных цинковых белил марки БЦОМ (ГОСТ 202–84) площадью удельной геометрической поверхности, при сохранении требуемых вулканизационных характеристик и физико-механических показателей готовых резиновых изделий.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования применяли КАВ на основе бентонита марки П1Т₂, стеариновой кислоты и цинковых белил производства НПО «Белхим» с разной удельной геометрической поверхностью следующих марок – БЦОМ (марка А) – 4,4 м²/г, БЦОМ – 5,2 м²/г (ГОСТ 202–74), БЦОМ Актив-1 – 7,5 м²/г, «ЭО-1» – 18,1 м²/г.

Опытные активаторы вулканизации, которые характеризовались пониженным содержанием оксида цинка (30 % масс), были получены на лабораторной установке, оборудованной обогреваемым реактором и высокоскоростной

мешалкой. В процессе получения КАВ осуществлялась дробная подача компонентов, температуру синтеза поддерживали в диапазоне ± 10 °С, скорость вращения мешалки 600 мин^{-1} , продолжительность синтеза 1 ч. Полученную пастообразную массу КАВ охлаждали в эксикаторе до комнатной температуры и измельчали в лабораторной мельнице [10].

Для изучения влияния полученных КАВ на вулканизационные свойства резиновых смесей и физико-механические показатели резин разработаны модельные рецептуры на основе стереорегулярного каучука СКИ-3 (ГОСТ 14925–79). Резиновые смеси готовили в лабораторном микросмесителе с объёмом камеры $0,01 \text{ м}^3$. В качестве эталонной использовали резиновую смесь, содержащую (масс. ч. на 100 масс. ч. каучука): сера – 2 масс. ч.; стеариновая кислота – 1,5 масс. ч.; цинковые белила – 5 масс. ч. тех же марок, что и при синтезе КАВ; ускоритель вулканизации сульфенамид Ц – 3 масс. ч; технический углерод П 514 – 60 масс. ч. Эталонным смесям присвоили следующие шифры: Э – 4,4; Э – 5,2; Э – 7,5; Э – 18,1. Опытные резиновые смеси изготавливали заменой активаторов (цинковых белил и стеариновой кислоты) на опытные КАВ (5 масс. ч.) и присваивали шифры: Оп – 4,4; Оп – 5,2; Оп – 7,5; Оп – 18,1.

Вулканизацию проводили в вулканизационном прессе с электрическим обогревом при температуре 143 °С в течение 30 минут.

Кинетику вулканизации изучали на реометре MDR-2000 при температуре 155 °С. С помощью программного обеспечения «GetData Graph Digitizer», полученные реометрические кривые оцифровывали, а в программе «Vulcanization 1.0» определяли константы скорости вулканизации.

Согласно ГОСТ 269–66 были подготовлены образцы и проведен комплекс физико-механических испытаний по определению упруго прочностных свойств вулканизатов (ГОСТ 270–75), твёрдость по Шору А (ГОСТ 263–75), эластичность по отскоку (ГОСТ 27110–86).

Концентрацию поперечных связей резин определяли методом равновесного набухания в толуоле [11].

Результаты и обсуждение

На первом этапе изучали вулканизационные свойства изготовленных резиновых смесей. Установлено (таблица 1), что M_{\min} (рисунок 2) эталонных резиновых смесей с цинковыми белилами, удельная площадь которых составляла 4,4 и 5,2 $\text{м}^2/\text{г}$ на 11,5 % выше, чем опытных резиновых смесей, а у образцов Э–7,5 и 18,1 значения показателя снижались более, чем на 37 %.

Это может свидетельствовать о худшем диспергировании частиц цинковых белил в эталонных смесях и их агломерации.

Значения показателя M_{\max} (рисунок 2) у опытных образцов было ниже на 5–8 %, что может свидетельствовать о пластицирующем действии бентонита на каучук в составе КАВ.

Индукционный период (рисунок 3) t_s , характеризующий стойкость резин к преждевременной вулканизации для эталонных образцов Э–4,4 и Э–5,2 был выше на 1,29 и на 0,44 мин., соответственно, но с увеличением удельной площади частиц цинковых белил значения резко снижались, и были ниже чем у опытных образцов.

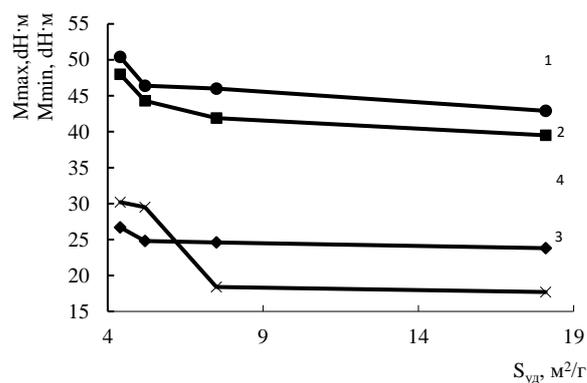


Рисунок 2. Зависимости максимального и минимального крутящего моменты M_{\max} (1 и 2) и M_{\min} (3 и 4) от удельной поверхности ZnO в активаторе вулканизации: 1, 3 – эталон 2, 4 – опытные

Figure 2. Dependences of the maximum and minimum torque M_{\max} (1 and 2) and M_{\min} (3 and 4) on the specific surface of ZnO in the vulcanization activator: 1, 3 – standard 2, 4 – experimental

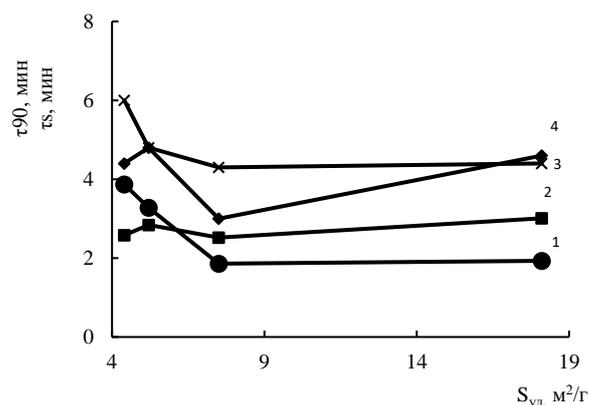


Рисунок 3. Зависимости времени начала и оптимума вулканизации t_s (1' и 2') и τ_{90} (1 и 2) от удельной поверхности ZnO в активаторе вулканизации; 1,3 – эталон 2, 4 – опытные

Figure 3. Dependences of the start time and optimum of vulcanization t_s (1' and 2') and τ_{90} (1 and 2) on the specific surface area of ZnO in the vulcanization activator; 1,3 – standard 2, 4 – experimental

Таким образом, образцы с опытным КАВ с удельной поверхностью частиц ZnO от 5,2 до 18,1 м²/г. характеризуются большей устойчивостью к преждевременной вулканизации

Оптимум вулканизации (рисунок 3) τ₉₀ для опытных образцов ОП – 4,4, ОП – 7,5 был ниже, чем у эталонных с этой же удельной поверхностью. Для эталонных и опытных образцов (S_{уд} = 5,2, 18,1 м²/г) оптимум вулканизации находился на одном уровне, при этом общая скорость вулканизации опытных образцов (v_c) на 30–40 %, выше чем у эталонных.

С применением программного продукта «Vulcanization 1.0» оценены константы вулканизации. Так, скорость образования ДАВ, характеризующаяся (k₀) для опытных резиновых смесей возрастала с увеличением удельной поверхности применяемых цинковых белил, а для эталонных – наоборот, снижалась. Можно предположить, что в присутствии АВ-к взаимодействию компонентов вулканизирующей группы с образованием ДАВ протекает эффективнее. Константа (k₃) соответствующая образованию узлов вулканизации между двумя цепями каучука для опытных смесей была выше, чем у эталона, что подтверждается увеличением скорости вулканизации в главном периоде. Таким образом, применение КАВ позволяет улучшить технологичность смесей и сократить время вулканизации.

Испытания упруго-прочностных свойств показало, что модуль при растяжении на 300 % для эталонных смесей был выше, чем у опытных, значения условной прочности при растяжении – сопоставимы. Значение f_p ОП – 18,1 было ниже чем у эталонного с теми же белилами. Эти результаты согласуются с данными определения структурных параметров N_{эф} (рис 4), по которым отмечено незначительное снижение плотности сшивки по сравнению с эталонами.

Следует отметить, что применение цинковых белил с S_{уд} 5,2 м²/г – обусловило максимальные значения модулей при растяжении.

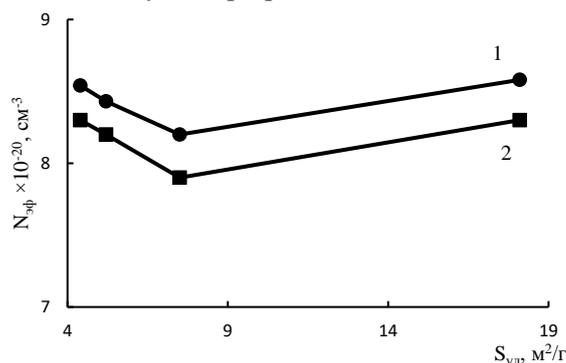


Рисунок 4. Зависимости концентрации поперечных связей N_{эф} (1 и 2) от удельной поверхности ZnO в активаторе вулканизации; 1 – эталон 2 – опытные
 Figure 4. Dependences of the concentration of cross-links Neff (1 and 2) on the specific surface area of ZnO in the vulcanization activator; 1 – standard, 2 – experimental

Относительное удлинение при разрыве для всех опытных образцов было выше. Наибольшее значение ε было у образцов резин, содержащих КАВ и с S_{уд} 7.5 м²/г и характеризовались более низкой плотностью сшивок.

По нашему мнению, это обусловлено тем, что цинковые белила с удельной поверхностью 4,4–7,5 м²/г образуют оптимальное количество центров, необходимых для протекания реакций сшивания макромолекул каучука, описанных [1] в соответствии с реакциями сшивания полидиенов по гетерогенному механизму. Снижение показателя при увеличении удельной поверхности до 18,1 м²/г может быть связано с тем, что, несмотря на увеличение активных центров, взаимодействие ДАВ с участками макромолекул менее вероятно вследствие влияния термодинамических факторов.

Таблица 1. Вулканизационные характеристики резиновых смесей на основе каучука SKI-3

Table 1.

Vulcanization characteristics of rubber compounds based on rubber SKI-3

Показатель Indicator	Шифры образцов (удельная геометрическая поверхность м ² /г) Sample codes (specific geometric surface area m ² /g)							
	Эталон Reference				Опытные смеси Experimental mixtures			
	4,4	5,2	7,5	18,1	4,4	5,2	7,5	18,1
Mmin, дН×м Mmin, dH×m	30,2	29,5	18,4	17,7	26,7	24,8	24,6	23,8
Mmax, дН×м Mmax, dH×m	50,4	46,4	46,0	42,9	48,0	44,3	41,9	39,5
M90, дН·м M90, dH·m	48,4	44,7	43,2	40,4	45,9	42,3	40,1	37,9
τ ₉₀ , мин τ ₉₀ , min	6,0	4,8	4,3	4,4	4,4	4,4	3,8	4,6
τ _s , мин τ _s , min	3,87	3,28	1,86	1,93	2,58	2,94	2,52	3,01
υ _c , мин ⁻¹ υ _c , min ⁻¹	46,9	65,8	40,9	40,5	54,9	68,5	78,1	62,9
k ₀	0,024	0,034	0,034	0,026	0,014	0,021	0,038	0,037
k ₁	0,959	0,960	0,978	0,983	0,976	0,994	0,989	0,999
k ₂	4,16	4,47	4,81	4,34	3,31	4,51	4,93	4,87
k ₃	277	247	250	271	342	261	236	273

Таблица 2.

Физико-механические свойства резин на основе каучука СКИ-3

Table 2.

Physico-mechanical properties of rubber-based SKI-3

Показатель Indicator	Шифры образцов							
	эталонные смеси				опытные смеси			
	4,4	5,2	7,5	18,1	4,4	5,2	7,5	18,1
M300, Мпа M300, МПа	14,4	15,3	15,2	14,7	14,7	15,2	14,9	14,4
fp, Мпа fp, МПа	16,7	17,8	18,1	17,5	16,9	17,9	18,0	17,2
HA, усл. ед.	69	68	68	69	65	67	66	66
ε, %	343	367	407	370	395	400	417	410
Θ, %	5,3	10,0	7,3	8,0	9,3	5,3	10,0	8,0
Nэф×10 ⁻²⁰ , см ⁻³ Nef×10 ⁻²⁰ , cm ⁻³	8,54	8,43	8,2	8,58	8,30	8,20	7,90	8,30

Заключение

Установлено, что применение цинковых белил с удельной поверхностью 5,2 до 7,5 м²/г в составе комплексного активатора вулканизации обеспечивает высокий комплекс упруго-прочностных свойств. Полученные значения показателей не уступают значениям эталонных резин.

Показатели вулканизационных характеристик резин в присутствии КАВ возрастали, тем самым подтверждено, что опытный продукт способствует сокращению времени вулканизации и общего времени изготовления резиновых изделий. Значения подтверждаются расчётными данными кинетических параметров процесса вулканизации.

Литература

- 1 Донцов А.А. О механизме образования вулканизационных структур при серной вулканизации // Высокомолекулярные соединения. 1973. Т. 15А. № 7. С. 1545–1551.
- 2 Догадкин Б.А., Донцов А.А., Шершнев В.А. Химия эластомеров. М.: Химия, 1981. 376 с.
- 3 Ikeda Y., Yasuda Y., Ohashi T. et al. Dinuclear Bridging Bidentate Zinc/Stearate Complex in Sulfur Cross-Linking of Rubber // *Macromolecules*. 2015. Vol. 48. P. 462–475.
- 4 Ikeda Y., Sakaki Y., Yasuda Y. et al. Roles of Dinuclear Bridging Bidentate Zinc/Stearate Complexes in Sulfur Cross-Linking of Isoprene Rubber // *Organometallics*. 2019. Vol. 38. P. 2363–2380.
- 5 Heideman G., Noordermeer J., Datta R., Baarle B.V. Effect of Zinc Complexes as Activator for Sulfur Vulcanization in Various Rubbers // *Rubber Chemistry and Technology*. 2005. Vol. 78. P. 245–257.
- 6 Butuc S.G. Novel Cyclic Polysulfide Based Blends: Elucidation of the Role of Zinc Oxide in Sulfur Crosslinking: Ph.D. Thesis. University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2021.
- 7 Мухутдинов А.А., Нелюбин А.А., Ильясов Р.С. и др. Экологические аспекты модификации ингредиентов и технологии производства шин. Казань: Фэн, 1999. 399 с.
- 8 Карманова О.В., Тихомиров С.Г., Голякевич А.А. Применение новых активаторов вулканизации в производстве резинотехнических изделий // Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии: Доклады XXVI научно-практической конференции. М., 2021. С. 107–108.
- 9 Шварц А.Г. Применение метода набухания при изучении свойств различных резин // *Каучук и резина*. 1965. № 4. С. 39–43.
- 10 Srivastava A., Sharma S. Recent advances in experimental and molecular dynamics study of graphene-oxide/natural rubber composites: A review // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022. Vol. 42. № 3-4. P. 110–130. doi: 10.1177/07316844221102939.
- 11 Фатнева А.Ю. Активаторы вулканизации каучуков со сниженным содержанием оксида цинка: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГУИТ, 2020. 127 с.
- 12 Карманова О.В., Голякевич А.А., Шашок Ж.С., Лешкевич А.В., Сафонов К.Д. Влияние дисперсности комплексного активатора вулканизации на свойства резиновых смесей и резин // *Вестник ВГУИТ*. 2024. Т. 86. № 4. С. 207–214. doi: 10.20914/2310-1202-2024-4-207-214.
- 13 Lin Y., Chen Y., Zeng Z. et al. Effect of ZnO nanoparticles doped graphene on static and dynamic mechanical properties of natural rubber composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015. Vol. 70. P. 35–44. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.12.008.
- 14 Krainoi A., Prasert W. et al. Effect of modified zinc oxide nanoparticles on enhancement of mechanical, thermal and antibacterial properties of disinfected natural rubber latex foams // *Materials Today Communications*. 2023. Vol. 35. 105601. doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.105601.
- 15 Hadi F.A., Kadhim R.G. A Study of the Effect of Nano Zinc Oxide on Cure Characteristics and Mechanical Properties of Rubber Composites // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1234. 012043. doi: 10.1088/1742-6596/1234/1/012043.
- 16 Qin X., Xu H. et al. Enhancing the Performance of Rubber with Nano ZnO as Activators // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12. № 42. P. 48007–48015. doi: 10.1021/acsami.0c15114.
- 17 Mostoni S., Milana P. et al. Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process // *Catalysts*. 2019. Vol. 9. № 8. 664. doi: 10.3390/catal9080664.
- 18 Mostoni S., D'Arienzo M. et al. Design of a Zn Single-Site Curing Activator for a More Sustainable Sulfur Cross-Link Formation in Rubber // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60. № 28. P. 10180–10192. doi: 10.1021/acs.iecr.1c01580.
- 19 da Silva A.A., de Souza M.A.V. et al. Magnesium oxide synthesized with *Alpinia zerumbet* leaf extracts as a sustainable alternative to zinc oxide in nitrile rubber compounds: A comparative vulcanization kinetics investigation // *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. Vol. 141. № 7. e54945. doi: 10.1002/app.54945.

20 Roy A., Rajkumar K., Kapgate B. Prospects of Green Materials in Rubber Technology // Encyclopedia of Green Materials / Eds. C. Baskar, S. Ramakrishna, A. Daniela La Rosa. Singapore: Springer, 2024. doi: 10.1007/978-981-16-4921-9_282-1.

References

- 1 Dontsov A.A. On the mechanism of vulcanization structure formation during sulfur vulcanization. High Molecular Compounds. 1973. vol. 15A. no. 7. pp. 1545–1551. (in Russian).
- 2 Dogadkin B.A., Dontsov A.A., Shershnev V.A. Chemistry of elastomers. Moscow, Khimiya, 1981. 376 p. (in Russian).
- 3 Ikeda Y., Yasuda Y., Ohashi T. et al. Dinuclear Bridging Bidentate Zinc/Stearate Complex in Sulfur Cross-Linking of Rubber. Macromolecules. 2015. vol. 48. pp. 462–475.
- 4 Ikeda Y., Sakaki Y., Yasuda Y. et al. Roles of Dinuclear Bridging Bidentate Zinc/Stearate Complexes in Sulfur Cross-Linking of Isoprene Rubber. Organometallics. 2019. vol. 38. pp. 2363–2380.
- 5 Heideman G., Noordermeer J., Datta R., Baarle B.V. Effect of Zinc Complexes as Activator for Sulfur Vulcanization in Various Rubbers. Rubber Chemistry and Technology. 2005. vol. 78. pp. 245–257.
- 6 Butuc S.G. Novel Cyclic Polysulfide Based Blends: Elucidation of the Role of Zinc Oxide in Sulfur Crosslinking. Ph.D. Thesis. University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2021.
- 7 Mukhutdinov A.A., Nelyubin A.A., Ilyasov R.S. et al. Environmental aspects of modifying ingredients and tire production technology. Kazan, Fen, 1999. 399 p. (in Russian).
- 8 Karmanova O.V., Tikhomirov S.G., Golyakevich A.A. Application of new vulcanization activators in the production of rubber products. Rubber Industry. Raw Materials. Materials. Technologies: Proc. of the XXVI Scientific and Practical Conference. Moscow, 2021. pp. 107–108. (in Russian).
- 9 Schwartz A.G. Application of the swelling method in the study of various rubber properties. Rubber and Rubber. 1965. no. 4. pp. 39–43. (in Russian).
- 10 Srivastava A., Sharma S. Recent advances in experimental and molecular dynamics study of graphene-oxide/natural rubber composites: A review. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2022. vol. 42. no. 3-4. pp. 110–130. doi: 10.1177/07316844221102939.
- 11 Fatneva A.Yu. Vulcanization activators for rubbers with reduced zinc oxide content. Ph.D. Thesis. Voronezh, VSUIT, 2020. 127 p. (in Russian).
- 12 Karmanova O.V., Golyakevich A.A., Shashok Zh.S., Leshkevich A.V., Safonov K.D. Influence of the dispersion of a complex vulcanization activator on the properties of rubber compounds and rubbers. Bulletin of VSUIT. 2024. vol. 86. no. 4. pp. 207–214. doi: 10.20914/2310-1202-2024-4-207-214. (in Russian).
- 13 Lin Y., Chen Y., Zeng Z. et al. Effect of ZnO nanoparticles doped graphene on static and dynamic mechanical properties of natural rubber composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2015. vol. 70. pp. 35–44. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.12.008.
- 14 Krainoi A., Prasert W. et al. Effect of modified zinc oxide nanoparticles on enhancement of mechanical, thermal and antibacterial properties of disinfectant natural rubber latex foams. Materials Today Communications. 2023. vol. 35. 105601. doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.105601.
- 15 Hadi F.A., Kadhim R.G. A Study of the Effect of Nano Zinc Oxide on Cure Characteristics and Mechanical Properties of Rubber Composites. Journal of Physics: Conference Series. 2019. vol. 1234. 012043. doi: 10.1088/1742-6596/1234/1/012043.
- 16 Qin X., Xu H. et al. Enhancing the Performance of Rubber with Nano ZnO as Activators. ACS Applied Materials & Interfaces. 2020. vol. 12. no. 42. pp. 48007–48015. doi: 10.1021/acsami.0c15114.
- 17 Mostoni S., Milana P. et al. Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process. Catalysts. 2019. vol. 9. no. 8. 664. doi: 10.3390/catal9080664.
- 18 Mostoni S., D'Arienzo M. et al. Design of a Zn Single-Site Curing Activator for a More Sustainable Sulfur Cross-Link Formation in Rubber. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2021. vol. 60. no. 28. pp. 10180–10192. doi: 10.1021/acs.iecr.1c01580.
- 19 da Silva A.A., de Souza M.A.V. et al. Magnesium oxide synthesized with *Alpinia zerumbet* leaf extracts as a sustainable alternative to zinc oxide in nitrile rubber compounds: A comparative vulcanization kinetics investigation. Journal of Applied Polymer Science. 2023. vol. 141. no. 7. e54945. doi: 10.1002/app.54945.
- 20 Roy A., Rajkumar K., Kapgate B. Prospects of Green Materials in Rubber Technology. Encyclopedia of Green Materials / Eds. C. Baskar, S. Ramakrishna, A. Daniela La Rosa. Singapore, Springer, 2024. doi: 10.1007/978-981-16-4921-9_282-1.

Сведения об авторах

Александр А. Голякевич д.т.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, sasha4292@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-4206-8874>

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

Alexander A. Golyakevich Dr. Sci. (Engin.), head of department, technologies of organic compounds, polymer processing and technosphere safety department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sasha4292@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-4206-8874>

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 06/02/2025

После редакции 03/03/2025

Принята в печать 17/03/2025

Received 06/02/2025

Accepted in revised 03/03/2025

Accepted 17/03/2025