

УДК 678.046

К. В. Вишнеvский¹, Ж. С. Шашок¹, Цзинь Хуэй Лэ², У Я Донг²¹Белорусский государственный технологический университет²Вэньчжоуский университет (Китайская Народная Республика)

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛМЕТИЛСИЛОКСАНОВОГО КАУЧУКА

В данной статье представлены результаты исследования, направленного на определение влияния состава многокомпонентной каталитической вулканизирующей системы на реологические, физико-механические и динамические свойства вулканизатов и оптимизацию ее состава на базе эластомерной композиции на основе поливинилметилсилоксанового каучука. Основной задачей являлась оптимизация многокомпонентной каталитической вулканизирующей системы, включающей сшивающий агент (A1), платиновый катализатор (A2) и ингибитор (A0), для получения материала, работающего в условиях знакопеременных нагрузок в контакте с пищевыми продуктами. Методология исследования базировалась на принципах математического планирования эксперимента и регрессионного анализа. Были установлены количественные зависимости ключевых характеристик – времени начала вулканизации (t_{S2}), разницы между максимальным и минимальным крутящими моментами (ΔM), характеризующей плотность сшивки пространственной сетки резин, и динамической выносливости (DE) – от концентрации компонентов системы. Анализ показал доминирующее влияние катализатора (A2) на скорость процесса и плотность сетки вулканизатов, в то время как ингибитор (A0) эффективно регулировал технологическое время переработки и скорость протекания реакции. В результате оптимизации был определен состав, обеспечивающий баланс технологичности и высоких эксплуатационных свойств: A1 = 60%, A0 = 40%, A2 = 80%. В ходе проведенных исследований были экспериментально подтверждены прогнозируемые свойства для данного состава. Так, время начала вулканизации составило 2,15 мин, $\Delta M = 27,23$ дН · м, а усталостная выносливость – 195,8 тыс. циклов. Дополнительно экспериментально доказано положительное влияние процесса термостатирования на твердость и динамическую выносливость вулканизатов.

Ключевые слова: эластомерная композиция, поливинилметилсилоксановый каучук, вулканизирующая система, пероксидная вулканизация, оптимизация, математическое моделирование.

Для цитирования: Вишнеvский К. В., Шашок Ж. С., Цзинь Хуэй Лэ, У Я Донг. Оптимизация составов эластомерных композиций на основе поливинилметилсилоксанового каучука // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 80–91.

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-8.

K. V. Vishnevskii¹, Zh. S. Shashok¹, Jin Huile², Wu Yadong²¹Belarusian State Technological University²Wenzhou University (People's Republic of China)

OPTIMIZATION OF FORMULATION ELASTOMERIC COMPOSITIONS BASED ON POLYVINYL METHYLSILOXANE RUBBER

This article presents the results of a study focused on determining the influence of the composition of a multicomponent catalytic vulcanization system on the rheological, physico-mechanical, and dynamic properties of vulcanizates, and on optimizing its formulation for an elastomeric composition based on poly(vinylmethylsiloxane) rubber. The primary objective was to optimize the multicomponent catalytic system, comprising a cross-linking agent (A1), a platinum catalyst (A2), and an inhibitor (A0), to develop a material capable of operating under dynamic loading conditions in contact with food products. The research methodology was based on the principles of mathematical experiment design and regression analysis. Quantitative relationships were established between the concentration of the system components and key characteristics: scorch time (t_{S2}), the difference between maximum and minimum torque (ΔM) – indicative of cross-link density – and dynamic endurance (DE). The analysis revealed the dominant influence of the catalyst (A2) on the process rate and vulcanizate network density, while the inhibitor (A0) effectively

regulated the processing safety window and reaction rate. As a result of the optimization, a composition ensuring a balance of processability and high performance properties was determined: A1 = 60%, A0 = 40%, A2 = 80%. The predicted properties for this composition were experimentally confirmed: a scorch time of 2.15 min, $\Delta M = 27.23 \text{ dN} \cdot \text{m}$, and a fatigue endurance of 195.8 thousand cycles. Furthermore, a positive influence of the post-cure (thermostating) process on the hardness and dynamic endurance of the vulcanizates was experimentally demonstrated.

Keywords: elastomeric composition, polyvinylmethylsiloxane rubber, vulcanizing system, peroxide vulcanization, optimization, mathematical modeling.

For citation: Vishnevskii K. V., Shashok Zh. S., Jin Huile, Wu Yadong. Optimization of formulation elastomeric compositions based on polyvinylmethylsiloxane rubber. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 80–91 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-8.

Введение. Разработка и оптимизация составов эластомерных композиций на основе силоксановых каучуков представляют собой важную задачу в области создания материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами. В настоящее время широко применяются несколько типов полисилоксановых каучуков: фторсилоксановые каучуки (обладают повышенной стойкостью к топливам и маслам, однако имеют высокую стоимость), фенилсилоксановые каучуки (отличаются улучшенной стойкостью к радиации и низким температурам) и метилвинилсилоксановые каучуки (наиболее распространенный тип, широко используемый в производстве уплотнений, прокладок и других изделий общего назначения) [1, 2]. Последний тип полимера получил большое распространение благодаря своей способности работать в широком интервале температур (от -60 до $+250^\circ\text{C}$) и устойчивости к воздействию окружающей среды, что обеспечивает высокую надежность и долговечность изделиям.

Ключевым процессом, определяющим свойства резин и конечных изделий из них, является вулканизация (сшивка). Для силоксановых каучуков применяются два основных типа систем вулканизации: пероксидная и каталитическая (платиновая) сшивка по реакции гидросилилирования. Пероксидная вулканизация активно используется и подходит для широкого спектра составов благодаря простоте, надежности и невысокой стоимости [3, 4]. Однако она часто требует высоких температур, может сопровождаться выделением летучих побочных продуктов, а также в обязательном порядке требует термостатирования изделий для полного протекания реакции и удаления продуктов (что особенно важно в пищевой промышленности). Для достижения более высокого уровня свойств данных каучуков сегодня широко применяются многокомпонентные вулканизирующие системы, включающие в себя несколько отдельных компонентов различного назначения. Каталитическая вулканизация по реакции гидросилилирования является более современным и технологичным подходом [5]. Данная реакция заключается в присоединении Si–H-групп (содержащихся в сшивающем агенте, например полиметилгидросилоксане) к винильным группам (C=C) каучука. Реакция может катализироваться комплексами олова или платины и позволяет проводить сшивку при более низких температурах, в том числе при комнатной, в случае использования олова, или является бесследной (не образуются побочные продукты) при использовании комплексов платины [6]. Каталитические системы для данной реакции постоянно совершенствуются. В научной литературе подробно изучены классические катализаторы, такие как катализатор Спайера (Speier's catalyst) – хлорплатиновая кислота в изопропанолe [7] и катализатор Карштедта (Karstedt's catalyst) – комплексы платины с дивинилсодержащим дисилоксаном, отличающиеся высокой активностью и отсутствием ионов хлора [8]. Исследования показывают, что модификация лигандов в платиновых комплексах позволяет тонко управлять их активностью, селективностью и стабильностью. Например, введение аминовых или фосфиновых лигандов может подавлять побочные реакции, уменьшать индукционный период и повышать конверсию Si–H-связей [6, 9].

В последние годы активно развивается направление фотосенсибилизирующих платиновых катализаторов, которые остаются неактивными в условиях хранения и иницируют

реакцию сшивки только под воздействием УФ-излучения. Это открывает возможности для 3D-печати и создания материалов с пространственно контролируемой сшивкой [10]. Синтез новых, более доступных фотоактивных комплексов платины, таких как производные дихлор(1,5-циклооктадиен)платины(II), позволяет снизить стоимость таких систем без значительной потери эффективности [10].

Кроме упоминавшегося выше полиметилгидросилоксана (ПМГС), в качестве сшивающих агентов в системах с платиновыми катализаторами могут использоваться олигомерные или полимерные соединения, содержащие в своей цепи несколько Si–H-групп. Наиболее распространенный ПМГС представляет собой чередование звеньев диметилсилоксана и метилгидросилоксана ($[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]$ и $[\text{SiH}(\text{CH}_3)\text{O}]$). Ключевой характеристикой ПМГС является содержание активного водорода (обычно выражается в мас. % или моль/100 г), которое напрямую определяет потенциальную плотность поперечной сетки вулканизата [9, 11]. Чем выше содержание водорода, тем большее количество поперечных связей может быть образовано на одну макромолекулу сшивающего агента, что при прочих равных условиях ведет к получению более жесткого и прочного материала. Помимо ПМГС, могут вводиться и другие сшивающие агенты, например тетраакис(диметилсилокси)силан, имеющий четыре Si–H активные группы, или сополимеры с заданным содержанием Si–H-звеньев. Выбор конкретного сшивающего агента зависит от требуемой реологии смеси, скорости отверждения и конечных физико-механических свойств эластомера [12].

При использовании катализаторов в рецептурах композиций на основе полисилоксановых каучуков повышается риск преждевременного протекания реакций вулканизации на этапе хранения или переработки резиновых смесей. Поэтому в рецептурах применяется еще один класс веществ – ингибиторы, которые, напротив, замедляют начало реакции. Из всего разнообразия веществ, которые могут выполнять роль ингибиторов радикальных реакций, протекающих при пероксидной вулканизации, по ряду причин наиболее подходящими для композиций на основе силоксановых каучуков считаются фенольные соединения, в частности 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенол [13–15].

Таким образом, оптимальное соотношение сшивающего агента, катализатора и ингибитора является ключевым фактором для достижения требуемых технологических и эксплуатационных свойств материала [7, 8, 12].

В настоящее время активно применяются готовые коммерческие рецепты эластомерных композиций на основе полисилоксанового каучука, но они имеют ряд недостатков, не связанных с качеством материала: доступность сырья для закупки, коммерческая тайна состава (когда конечный потребитель, по сути, не знает, с чем он работает), что особенно важно для использования в пищевой промышленности или медицине.

Целью настоящей работы являлось определение влияния состава многокомпонентной каталитической вулканизирующей системы на реологические, физико-механические и динамические свойства вулканизатов и последующая оптимизация рецептуры наполненной композиции на основе полиметилвинилсилоксанового каучука для работы в условиях знакопеременных нагрузок.

Для достижения поставленной цели необходимо было найти путь решения вопроса по разработке рецептур на основе полисилоксановых каучуков на базе имеющегося сырья с минимальными временными и финансовыми затратами. Решение подобных задач на современном этапе развития технологий осуществляется с использованием методов математического моделирования и планирования экспериментов. Наиболее часто для задач оптимизации используется регрессионный анализ, применение которого позволяет установить зависимость между содержанием компонентов и свойствами материала, что дает возможность предсказать оптимальный состав без проведения большого количества экспериментов [14, 16].

Объекты и методы исследования. В рамках данного исследования проводился сравнительный анализ свойств эластомерных композиций на основе полисилоксанового каучука (поставщик – компания DOW), полученных с использованием каталитической вулканизирующей

системы различного состава. Вулканизирующая система состояла из трех компонентов: сшивающего агента (A1), катализатора (A2) и ингибитора (A0). В результате была определена вулканизирующая система, обеспечивающая получение резин с наилучшим комплексом свойств. В рамках работы подбор рецептуры проводился для конкретного изделия, работающего в условиях знакопеременных нагрузок при температурах от 20 до 40°C в контакте с пищевыми продуктами. В качестве ключевых характеристик материала, кроме упругопрочностных свойств, были выбраны параметры кинетики вулканизации и динамическая выносливость. Кроме того, исследовалось влияние процесса термостабилизации на твердость и усталостную выносливость эластомерных композиций с многокомпонентной каталитической вулканизирующей системой.

Изготовление композиций осуществляли на лабораторных смесительных вальцах при скорости вращения 15 об/мин на медленном валке и фрикции 1:1,17. Кинетические параметры вулканизации определяли с помощью роторного реометра ODR 2000 по ГОСТ 12535–84 «Смеси резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулканометре» (ASTM D2084) при температуре 130°C. Оценку технических характеристик композиций проводили с использованием современного оборудования по международным стандартам. Определение условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве выполняли по ГОСТ 270–75 тип I «Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении» (ASTM D412 DIE C), а сопротивление раздиру оценивали по ГОСТ 262–93 метод В «Резина. Определение сопротивления раздиру (раздвоенные, угловые и серповидные образцы)» (ASTM D624 DIE B) с помощью универсальной испытательной машины T2200 DC фирмы Alpha Technologies, твердость по Шору А определяли по ГОСТ 263–75 «Резина. Метод определения твердости по Шору А» (ASTM D2240) на приборе DIGI-TEST фирмы Bareiss, сопротивление разрастанию трещин оценивали в соответствии с ГОСТ 9983–74 метод Б «Резина. Методы испытаний на многократный продольный изгиб образцов с прямой канавкой» (ASTM D813) с помощью испытательной машины WALLace F16-12.

В качестве контрольного образца была выбрана композиция, содержащая вулканизирующую систему, состоящую из трех компонентов в следующих дозировках: сшивающий агент (A1) – 5 мас. ч., катализатор (A2) – 0,9 мас. ч., ингибитор (A0) – 2,5 мас. ч.

Для оптимизации составов использовались методы планирования и математического моделирования эксперимента. После проведения испытаний серии эластомерных композиций (14 вариантов с различным содержанием компонентов A1, A2 и A0) в качестве критериев для оптимизации были приняты: время начала реакции вулканизации (t_{s2}) – в данном случае выбирался интервал времени, в течение которого обеспечивалась безопасная переработка эластомерной композиции (1,8–2,5 мин); разница максимального (реакция вулканизации прошла, и крутящий момент обусловлен образовавшейся пространственной вулканизационной сеткой) и минимального (по сути обусловлен только вязкостью прогретого материала, т. е. только межмолекулярным взаимодействием) крутящего момента (ΔM), поэтому данный показатель может быть мерой оценки плотности поперечной сшивки; еще одним важным параметром для оценки стала динамическая выносливость (DE), которая была важна для работы изделия. Далее для прогнозирования свойств материала с оптимизированным составом были построены математические модели с применением регрессионного анализа.

Основная часть. *Экспериментальные исследования.* Для исследования были подготовлены 14 вариантов эластомерных композиций с различным содержанием компонентов A1, A2 и A0, которые варьировались в процентах от рекомендуемого производителем содержания:

A1: 0–100% (0–5,0 мас. ч.);

A0: 25–100% (0,625–2,500 мас. ч.);

A2: 25–100% (0,225–0,900 мас. ч.).

Состав вулканизирующей системы исследуемых эластомерных композиций приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав вулканизирующей системы исследуемых эластомерных композиций, %

Шифр состава	A0	A1	A2
1	25	100	25
2	25	100	100
3	50	100	50
4	50	100	100
5	75	100	75
6	75	100	100
7	100	100	25
8	100	100	50
9	100	100	75
10	100	0	100
11	100	25	100
12	100	50	100
13	100	75	100
14	100	100	100

Результаты исследования кинетических параметров эластомерных композиций представлены на рис. 1 и в табл. 2.

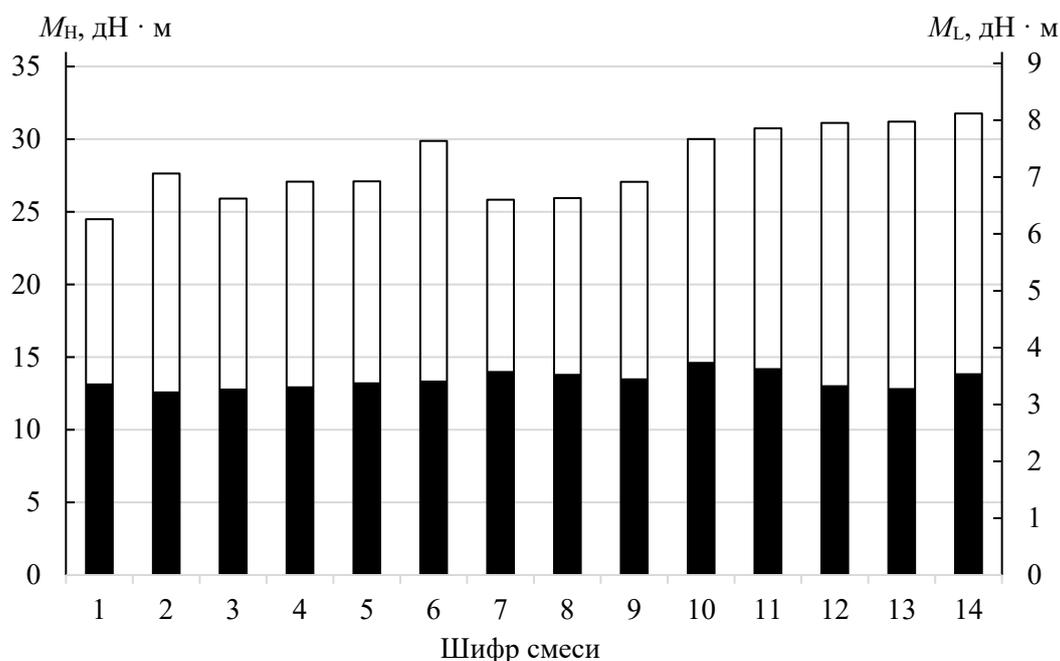


Рис. 1. Вулканизационные характеристики исследуемых эластомерных композиций: □ – максимальный крутящий момент (M_n); ■ – минимальный крутящий момент (M_L)

На основании полученных данных выявлено, что на вязкостные показатели композиций корректировки вулканизирующей системы практически не влияют (значения минимального крутящего момента находились в пределах 3,23–3,75 дН·м). Однако состав вулканизирующей системы оказал значительное воздействие на процесс образования пространственной сетки вулканизатов и ее структуру. Из результатов исследований можно сделать однозначный вывод о том, что структура вулканизатов в значительной степени определяется именно концентрацией каталитической составляющей вулканизирующей системы (компонент A2), поскольку прослеживается четкая зависимость между его дозировкой и плотностью образовавшейся пространственной структуры. В ряду композиций (7–9, 14), где уменьшали содержание A2, установлено резкое снижение максимального крутящего момента и ΔM (с 31,77 дН·м

для композиции 14 до значений меньше 27,06 дН · м при введении 75% компонента). Концентрация каталитической составляющей (компонент А2) напрямую влияет на плотность пространственной сетки через количество активных центров, служащих для образования Si–С-связей [17]. Кроме того, катализатор способствует более полному протеканию реакций по функциональным группам сшивающего агента (компонента А1). При этом снижение содержания самого компонента А1 оказывает значительно меньшее влияние на структуру вулканизата. Так, для композиций 13 и 12, содержащих 75 и 50% соответственно от рекомендуемого А1, снижение значений M_n и ΔM составило менее 2–3%, при этом время достижения оптимума вулканизации увеличивается на 11 и 16% соответственно. По-видимому, его содержание было несколько избыточно, что обеспечивало получение высокой плотности пространственной сетки и более высокие прочностные свойства вулканизатов даже при условии снижения активности катализатора при нарушении условий хранения или переработки. Ингибитор (компонент А0), как показали исследования, оказывает влияние не только на продолжительность индукционного периода, время достижения оптимума вулканизации и скорость протекания реакции, которая оценивалась по параметру Rh , но и на структуру пространственной сетки. Полученные результаты согласуются с современными представлениями о механизме платиновой вулканизации силоксановых каучуков, где ключевую роль играет баланс между концентрацией катализатора, гидрогенсодержащего компонента и регуляторов скорости процесса [18].

Таблица 2. Кинетические параметры вулканизации исследуемых эластомерных композиций

Шифр состава	t_{S2} , мин	t_{90} , мин	Rh , мин ⁻¹	ΔM , дН · м
1	3,64	5,16	22,74	21,1
2	1,24	1,72	63,28	24,4
3	3,60	4,56	35,02	22,6
4	2,05	2,62	57,85	23,8
5	3,70	4,81	32,39	23,7
6	2,55	3,72	41,15	26,5
7	11,34	14,54	1,21	22,2
8	7,32	8,79	10,57	22,4
9	4,65	4,75	27,11	23,6
10	5,14	6,37	36,46	26,3
11	4,48	6,11	29,15	27,1
12	4,41	5,69	40,49	27,8
13	3,70	5,41	34,25	27,9
14	3,60	4,87	35,21	28,2

Примечание. t_{S2} – время, необходимое для увеличения минимального крутящего момента на 2 дН · м, мин; t_{90} – время достижения оптимальной степени вулканизации, мин; ΔM – разница между максимальным и минимальным крутящими моментами, дН · м.

Были также исследованы динамические характеристики резин, определяющие работоспособность изделий, и твердость как показатель общего контроля образовавшейся пространственной сетки вулканизатов. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Твердость является интегральным показателем структуры полимерной матрицы вулканизатов и хоть и позволяет косвенно оценить качество формирования пространственной сетки и выявить проблемы при их резких колебаниях, но не дает возможности определить структуру. Так, полученные значения твердости находятся в диапазоне 66,8–70,5 усл. ед., при этом наблюдается умеренная дисперсия показателей, свидетельствующая о стабильности процесса вулканизации.

Таблица 3. Результаты определения твердости по Шору А и усталостной выносливости композиций

Шифр состава	Твердость по Шору А, усл. ед.	Усталостная выносливость, тыс. циклов нагружения
1	68,9	70,8
2	69,5	116,4
3	67,3	91,8
4	69,7	147,6
5	68,6	161,4
6	70,5	189,6
7	69,8	61,2
8	68,4	98,4
9	68,8	129,6
10	68,0	80,4
11	66,8	192,6
12	67,0	218,4
13	67,5	224,4
14	69,4	219,6

Усталостная выносливость демонстрирует значительное варьирование значений от 61,2 до 224,4 тыс. циклов нагружения, что свидетельствует о существенных различиях в пространственной структуре вулканизатов и, соответственно, влияет на распределение напряжений и деформаций, что и определяет работоспособность материала в поле знакопеременных нагрузок [19–21].

Построение модели и решение задачи оптимизации. Для каждого варианта эластомерных композиций определялся целый ряд показателей. Для решения задачи оптимизации служили следующие характеристики: t_{s2} – время начала реакции вулканизации, ΔM – разница между максимальным и минимальным крутящими моментами, DE – усталостная выносливость (количество циклов нагружения).

Для анализа данных использовались методы регрессионного анализа. Были построены математические модели, описывающие зависимость свойств (t_{s2} , ΔM , DE) от содержания компонентов (A1, A2, A0).

Например:

– для t_{s2} : $t_{s2} = b_0 + b_1 \cdot A1 + b_2 \cdot A0 + b_3 \cdot A2$;

– для ΔM : $\Delta M = c_0 + c_1 \cdot A1 + c_2 \cdot A0 + c_3 \cdot A2$;

– для DE: $DE = d_0 + d_1 \cdot A1 + d_2 \cdot A0 + d_3 \cdot A2$.

Коэффициенты моделей были рассчитаны с использованием метода наименьших квадратов.

Результаты исследований эластомерных композиций позволили выявить следующие закономерности:

A1: увеличение содержания A1 приводит к повышению ΔM и DE, но также увеличивает t_{s2} ;

A2: увеличение содержания A2 снижает t_{s2} и повышает ΔM и DE;

A0: увеличение содержания A0 повышает t_{s2} , но снижает ΔM и DE.

Оптимизация включала в себя следующие этапы.

1. Определение целевых значений:

– t_{s2} : 1,8–2,5 мин (указанного времени достаточно для осуществления формования изделия);

– ΔM : максимальное значение;

– DE: максимальное значение.

2. Поиск оптимального состава. Для поиска оптимального состава использовались методы математической оптимизации. Выполнение оптимизации проводилось с использованием языка программирования Python.

В результате решения задачи оптимизации был предложен следующий состав:

A1 = 60% (3,0 мас. ч.);

A0 = 40% (1,0 мас. ч.);

A2 = 80% (0,72 мас. ч.).

Прогнозируемые свойства для этого состава следующие:

t_{S2} : ~2,0 мин (в пределах целевого интервала 1,8–2,5 мин);

ΔM : ~26,9 дН · м (близко к максимальным значениям);

DE: ~190 000 циклов (близко к максимальным значениям).

Экспериментальная проверка результатов моделирования и оптимизации. Для проверки полученного результата была изготовлена эластомерная композиция по рецепту, полученному с помощью математической оптимизации (A1 = 60% (3,0 мас. ч.), A0 = 40% (1,0 мас. ч.), A2 = 80% (0,72 мас. ч.)). Результаты исследования свойств резиновых смесей и резин представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты исследования свойств эластомерной композиции оптимизированного состава

Показатель	Значение показателя
Минимальный крутящий момент M_L , дН · м	3,57
Максимальный крутящий момент M_H , дН · м	30,80
Разница между M_H и M_L (ΔM), дН · м	27,23
Время t_{S2} увеличения крутящего момента на 2 дН · м, мин	2,15
Время достижения оптимума вулканизации t_{90} , мин	6,87
Скорость вулканизации Rh , мин ⁻¹	29,6
Твердость по Шору А, усл. ед.	68,7
Усталостная выносливость, тыс. циклов нагружения	195,8

Для полного завершения реакций, протекающих при перекисной вулканизации полисилоксановых каучуков, а также разложения и удаления продуктов реакции требуется проведение термостатирования. При использовании каталитических вулканизационных систем на основе платины продуктов реакции не образуется, однако информации о необходимости проведения данной технологической операции недостаточно. Поэтому важным этапом работы было установить степень влияния процесса термостатирования на свойства эластомерных композиций. Влияние оценивалось по изменению твердости и усталостной выносливости образцов, полученных по оптимизированной рецептуре. Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 5. Испытания проводились на 10 образцах.

Таблица 5. Результаты исследования свойств эластомерной композиции оптимизированного состава

Образец	Без термостатирования		После термостатирования	
	Твердость по Шору А, усл. ед.	Усталостная выносливость, тыс. циклов	Твердость по Шору А, усл. ед.	Усталостная выносливость, тыс. циклов
O1	64,9	183,1	70,5	191
O2	62,7	187,4	69,5	186
O3	64,4	189,2	68,5	202
O4	62,6	185,3	69,7	201
O5	64,8	176,3	68,6	189
O6	66,9	161,9	70,5	197
O7	67,3	195,1	69,8	205
O8	63,7	175,2	68,4	198
O9	65,2	191,7	68,8	190
O10	61,8	174,5	68,6	199
Среднее	64,4	182,0	69,3	195,8

Полученные данные показывают, что термостатирование оказывает значительное влияние на рассматриваемые технические свойства вулканизатов. Так, изменение твердости вулканизатов свидетельствует об изменении пространственной сетки. При этом результатом изменения стало не только повышение усталостной выносливости образцов, выраженное в увеличении количества циклов нагружения, но и сам характер разрушения. На рис. 2 показаны фото образцов после испытания.

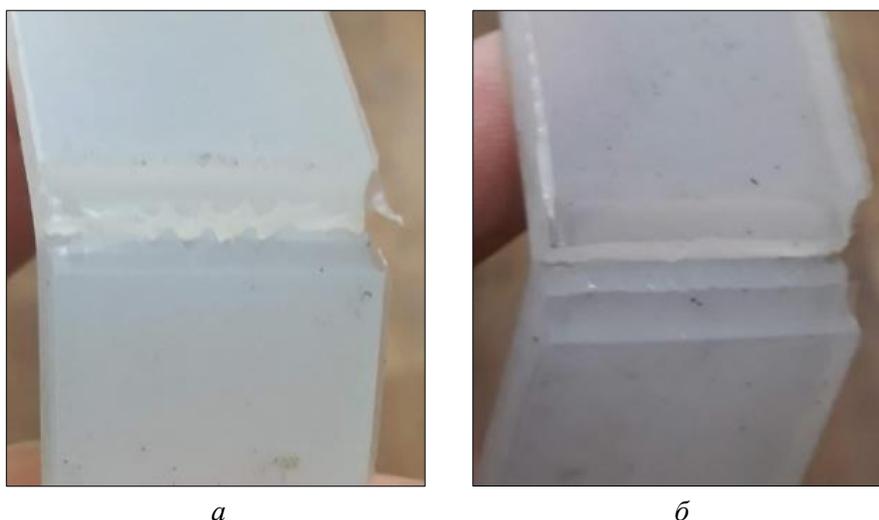


Рис. 2. Фото образцов после испытания на усталостную выносливость:
а – после термостатирования; *б* – до термостатирования

Характер разрушения свидетельствует об увеличении пути разрастания трещин резин, поэтому можно предположить, что это приводит к росту энергии разрушения [21] и, как следствие, к увеличению усталостной выносливости. Таким образом, на основании полученных результатов исследования свойств резин можно сделать однозначный вывод о положительном влиянии процесса термостатирования.

Заключение. Таким образом, результаты исследований показали, что состав каталитической вулканизирующей системы оказывает комплексное воздействие на свойства эластомерных композиций. Концентрация катализатора является доминирующим фактором, определяющим скорость процесса вулканизации и плотность формирующейся пространственной сетки, что непосредственно влияет на прочностные и эксплуатационные показатели материала. Сшивающий агент в большей степени воздействует на конечную степень сшивки, а ингибитор не только эффективно регулирует продолжительность индукционного периода, обеспечивая технологическую безопасность переработки, но и оказывает влияние на общую скорость реакции.

Применение методов математического планирования эксперимента и регрессионного анализа [14, 16] позволило эффективно установить количественные зависимости между составом вулканизирующей системы и ключевыми свойствами материала. Оптимизированный состав ($A_1 = 60\%$, $A_0 = 40\%$, $A_2 = 80\%$) обеспечил достижение целевых показателей: время начала вулканизации составило 2,15 мин, были получены высокие значения плотности пространственной структуры вулканизатов и усталостной выносливости (195,8 тыс. циклов нагружения).

Экспериментально подтверждено, что процесс термостатирования оказывает значительное положительное влияние на структуру и свойства вулканизатов. Наблюдаемое увеличение твердости и, что наиболее важно, динамической выносливости, а также изменение характера разрушения образцов (увеличение пути разрастания трещины) свидетельствуют о доструктурировании и упрочнении пространственной сетки вулканизата в процессе последующей термической обработки.

Список литературы

1. Smith J. R., Johnson L. M. Silicone Rubbers: Properties and Applications // *Journal of Polymer Science*. 2020. Vol. 58, no. 4. P. 123–135.
2. Brown A. S., Taylor R. W. Advances in Silicone Elastomers // *Rubber Chemistry and Technology*. 2019. Vol. 92, no. 3. P. 456–470.
3. Lee H. K., Park S. Y. Peroxide Vulcanization of Silicone Rubbers // *Polymer Engineering & Science*. 2018. Vol. 58, no. 7. P. 1123–1134.
4. Zhang Y., Wang X. Catalytic Systems for Silicone Vulcanization // *Journal of Applied Polymer Science*. 2017. Vol. 134, no. 45. P. 45678.
5. Hydrosilylation – a comprehensive review on recent advances / B. Marciniec [et al.]. Berlin: Springer, 2009. 432 p.
6. Platinum Complexes Catalyzed Hydrosilylation of Trichlorosilane and Allyl Chloride / Shao Yuegang [et al.] // *Progress in Chemistry*. 2015. Vol. 27, no. 9. P. 1182–1190.
7. Speier J. L., Webster J. A., Barnes G. H. The Addition of Silicon Hydrides to Olefinic Double Bonds. Part II. The Use of Group VIII Metal Catalysts // *Journal of the American Chemical Society*. 1957. Vol. 79. P. 974–979.
8. Platinum complexes of unsaturated siloxanes and platinum containing organopolysiloxanes: Patent US 3775452A / B. Karstedt. Publ. 27.11.1973.
9. Synthesis of Functionalized Polymethylhydrosiloxane via Pt-Catalyzed Hydrosilylation and the Effect of Substituents at the Olefin on the Reaction / He Daguang [et al.] // *Silicon*. 2023. Vol. 15. P. 1691–1700.
10. Zhang Weifu, Jiang Guo, Liao Kai. Synthesis of a Novel Platinum Catalyst and Its Application in the Photoactivated Hydrosilylation Reaction // *Silicon*. 2024. Vol. 16. P. 5613–5623.
11. Южелевский Ю. А., Бурмистрова Л. И. Силоксановые каучуки и материалы на их основе медицинского назначения. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1987. 69 с.
12. Barlow F. W. Rubber Compounding: Principles, Materials, and Techniques. New York: Marcel Dekker Inc., 1993. 304 p.
13. Kim J. H., Lee D. S. Inhibitors in Silicone Vulcanization: Mechanisms and Applications // *Rubber World*. 2016. Vol. 254, no. 3. P. 23–29.
14. Patel R. M., Gupta V. K. Optimization of Silicone Rubber Formulations Using Statistical Methods // *Journal of Elastomers & Plastics*. 2015. Vol. 47, no. 2. P. 145–160.
15. Doe J. E., Smith P. L. Filled Silicone Composites: Mechanical and Dynamic Properties // *Composites Science and Technology*. 2014. Vol. 102. P. 45–52.
16. White R. J., Green T. D. Silicone Rubber in High-Temperature Applications // *High Performance Polymers*. 2013. Vol. 25, no. 6. P. 678–690.
17. Де Векки Д. А., Сквоцов Н. К. Каталитическое гидросилилирование в силоксановых системах // *Известия СПбГТИ (ТУ)*. 2009. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kataliticheskoe-gidrosililirovanie-v-siloksanovyh-sistemah> (дата обращения: 11.11.2025).
18. Mazurek P., Vudayagiri S., Skov A. L. How to tailor flexible silicone elastomers with mechanical integrity: a tutorial review // *Chemical Society Reviews*. 2019. Vol. 48, no. 6. P. 1448–1464. DOI: 10.1039/c8cs00963e.
19. Horst T., Heinrich G. Crack propagation behavior in rubber materials // *Polymer Science*. 2008. Vol. 50, no. 5. P. 583–590. DOI: 10.1134/S0965545X08050131.
20. Crack propagation in rubber-like materials / B. N. J. Persson [et al.] // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2005. Vol. 17, no. 44. P. R1071–R1142. DOI: 10.1088/0953-8984/17/44/R01.
21. Гаришин О. К., Шадрин В. В. Исследование развития макроразрыва в эластомерных композитах // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2022. № 3. С. 21–30. DOI: 10.17072/1994-3598-2022-3-21-30.

References

1. Smith J. R., Johnson L. M. Silicone Rubbers: Properties and Applications. *Journal of Polymer Science*, 2020, vol. 58, no. 4, pp. 123–135.
2. Brown A. S., Taylor R. W. Advances in Silicone Elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*, 2019, vol. 92, no. 3, pp. 456–470.
3. Lee H. K., Park S. Y. Peroxide Vulcanization of Silicone Rubbers. *Polymer Engineering & Science*, 2018, vol. 58, no. 7, pp. 1123–1134.
4. Zhang Y., Wang X. Catalytic Systems for Silicone Vulcanization. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134, no. 45, p. 45678.
5. Marciniec B., Maciejewski H., Pietraszuk C., Pawluc P. Hydrosilylation – a comprehensive review on recent advances. Berlin, Springer, 2009. 432 p.
6. Shao Yuegang, Liu Ji, Chen Xiangqian, Jin Peiyu, Tang Hongding. Platinum Complexes Catalyzed Hydrosilylation of Trichlorosilane and Allyl Chloride. *Progress in Chemistry*, 2015, vol. 27, no. 9, pp. 1182–1190.
7. Speier J. L., Webster J. A., Barnes G. H. The Addition of Silicon Hydrides to Olefinic Double Bonds. Part II. The Use of Group VIII Metal Catalysts. *Journal of the American Chemical Society*, 1957, vol. 79, pp. 974–979.
8. Karstedt B. Platinum complexes of unsaturated siloxanes and platinum containing organopolysiloxanes. Patent US 3775452A, 1973.
9. He Daguang, Gui Xuefeng, Lin Shudong, Tu Yuanyuan, Hu Jiwen, Li Shi, Zhao Jihe. Synthesis of Functionalized Polymethylhydrosiloxane via Pt-Catalyzed Hydrosilylation and the Effect of Substituents at the Olefin on the Reaction. *Silicon*, 2023, vol. 15, pp. 1691–1700.
10. Zhang Weifu, Jiang Guo, Liao Kai. Synthesis of a Novel Platinum Catalyst and Its Application in the Photoactivated Hydrosilylation Reaction. *Silicon*, 2024, vol. 16, pp. 5613–5623.
11. Yuzhelevskiy Yu. A., Burmistrova L. I. *Siloksanovyye kauchuki i materialy na ikh osnove meditsinskogo naznacheniya* [Siloxane rubbers and materials based on them for medical purposes]. Moscow, TsNIITEneftkhim Publ., 1987. 69 p. (In Russian).
12. Barlow F. W. Rubber Compounding: Principles, Materials, and Techniques. New York, Marcel Dekker Inc., 1993. 304 p.
13. Kim J. H., Lee D. S. Inhibitors in Silicone Vulcanization: Mechanisms and Applications. *Rubber World*, 2016, vol. 254, no. 3, pp. 23–29.
14. Patel R. M., Gupta V. K. Optimization of Silicone Rubber Formulations Using Statistical Methods. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2015, vol. 47, no. 2, pp. 145–160.
15. Doe J. E., Smith P. L. Filled Silicone Composites: Mechanical and Dynamic Properties. *Composites Science and Technology*, 2014, vol. 102, pp. 45–52.
16. White R. J., Green T. D. Silicone Rubber in High-Temperature Applications. *High Performance Polymers*, 2013, vol. 25, no. 6, pp. 678–690.
17. De Vekki D. A., Skvotsov N. K. Catalytic hydrosilylation in siloxane systems. *Izvestiya SPbGTU (TU)* [News of the Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2009, no. 6. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kataliticheskoe-gidrosililirovanie-v-siloksanovyh-sistemah> (accessed 11.11.2025) (In Russian).
18. Mazurek P., Vudayagiri S., Skov A. L. How to tailor flexible silicone elastomers with mechanical integrity: a tutorial review. *Chemical Society Reviews*, 2019, vol. 48, no. 6, pp. 1448–1464. DOI: 10.1039/c8cs00963e.
19. Horst T., Heinrich G. Crack propagation behavior in rubber materials. *Polymer Science*, 2008, vol. 50, no. 5, pp. 583–590. DOI: 10.1134/S0965545X08050131.
20. Persson B. N. J., Albohr O., Heinrich G., Ueba H. Crack propagation in rubber-like materials. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2005, vol. 17, no. 44, pp. R1071–R1142. DOI: 10.1088/0953-8984/17/44/R01.
21. Garishin O. K., Shadrin V. V. Study of macro-rupture development in elastomer composites. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika* [Bulletin of Perm University. Physics], 2022, no. 3, pp. 21–30. DOI: 10.17072/1994-3598-2022-3-21-30 (In Russian).

Информация об авторах

Вишнеvский Константин Викторович – кандидат технических наук, докторант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: vik@belstu.by. SPIN-код: 6128-5230. Scopus ID: 55433017600. ORCID: 0000-0002-1720-2229. ResearcherID: AED-8181-2022.

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. SPIN-код: 8884-2657. Scopus ID: 23988064000. ORCID: 0000-0003-2279-6866. ResearcherID: AAD-8042-2019.

Цзинь Хуэй Лэ – кандидат технических наук, профессор, руководитель ключевой лаборатории передовых технологий хранения и преобразования энергии г. Вэньчжоу, куратор ключевой лаборатории кожевенной инженерии провинции Чжэцзян, профессор колледжа химии и инженерии материалов и Вэньчжоуского университета. Вэньчжоуский университет (Университетский городок Чашань, 325035, г. Вэньчжоу, провинция Чжэцзян, Китайская Народная Республика). E-mail: huilejin@wzu.edu.cn. ORCID: 0000-0002-2899-0515.

У Я Донг – кандидат технических наук, профессор, научный сотрудник ключевой лаборатории передовых технологий хранения и преобразования энергии г. Вэньчжоу, профессор колледжа химии и инженерии материалов и Вэньчжоуского университета. Вэньчжоуский университет (Университетский городок Чашань, 325035, г. Вэньчжоу, провинция Чжэцзян, Китайская Народная Республика). E-mail: huilejin@wzu.edu.cn. ORCID: 0000-0003-3709-8497.

Information about the authors

Vishnevskii Konstantin Viktorovich – PhD (Engineering), post-doctoral student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vik@belstu.by. SPIN code: 6128-5230. Scopus ID: 55433017600. ORCID: 0000-0002-1720-2229. ResearcherID: AED-8181-2022.

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. SPIN code: 8884-2657. Scopus ID: 23988064000. ORCID: 0000-0003-2279-6866. ResearcherID: AAD-8042-2019.

Jin Huile – PhD (Engineering), Professor, Head of the Wenzhou Key Laboratory of Advanced Energy Storage and Conversion, Curator of the Zhejiang Province Key Laboratory of Leather Engineering, Professor at the College of Chemistry and Materials Engineering and at the Wenzhou University. Wenzhou University (Chashan University Town, 325035, Wenzhou City, Zhejiang Province, People’s Republic of China). E-mail: huilejin@wzu.edu.cn. ORCID: 0000-0002-2899-0515.

Wu Yadong – PhD (Engineering), Professor, researcher of the Wenzhou Key Laboratory of Advanced Energy Storage and Conversion, Professor at the College of Chemistry and Materials Engineering and at the Wenzhou University. Wenzhou University (Chashan University Town, 325035, Wenzhou City, Zhejiang Province, People’s Republic of China). E-mail: huilejin@wzu.edu.cn. ORCID: 0000-0003-3709-8497.

Поступила 05.10.2025