




Динамически вулканизированные термоэластопласты на основе ПВДФ и БНКС-40 АМН




Виктория А. Черепанова, ¹	usr21806@vyatsu.ru	 0000-0002-0592-796X
Евгения С. Широкова, ¹	usr06779@vyatsu.ru	 0000-0001-5735-3489
Сергей В. Фомин, ¹	rubber_zerg@mail.ru	 0000-0003-0393-5613

¹ Вятский государственный университет, ул Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия

Аннотация. Термоэластопласты – это материалы, обладающие уникальной двухфазной структурой, характеризующиеся одновременно эластичностью каучука и перерабатываемостью термопластов. Сегодня особое значение приобретают термоэластопласты, полученные методом динамической вулканизации (ДТЭП), демонстрирующие высокие эксплуатационные характеристики. Целью данной работы стало создание динамически вулканизированных термоэластопластов на основе бутадиен-нитрильного каучука (БНКС-40АМН) и поливинилиденфторида (ПВДФ), содержащих перекисную вулканизирующую систему, а также изучение влияния концентрации перекисной вулканизирующей системы на структуру и свойства полученных материалов. Методами ИК-Фурье спектроскопии и дифференциальной сканирующей калориметрии изучена микроструктура полученных материалов. Показано, что увеличение степени вулканизации эластомерной фазы приводит к улучшению комплекса эксплуатационных характеристик: прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве, термостабильности и стойкости к агрессивным средам. Материалы демонстрируют отличную стойкость к воде, маслу и нефти и хорошую стойкость к бензину. Наилучшими характеристиками и целевой морфологией, при которой термопласт формирует сплошную матрицу, а сшитый эластомер диспергирован в ней в виде частиц, обладают образцы с содержанием вулканизирующего агента 0,75 м.ч. Для данных образцов дополнительно определена стойкость к тепловому старению и способность к повторной переработке. Установлено, что изменение ключевых эксплуатационных характеристик после повторной переработки не превышает 10%. Полученные материалы соответствуют требованиям, предъявляемым к маслобензостойким композициям, и могут представлять интерес для использования в автомобилестроении, нефтяной и газовой промышленности, а использование для производства отечественного сырья (бутадиен-нитрильные каучуки производятся АО "СИБУР Холдинг", а ПВДФ – АО "ГалоПолимер") обеспечивает импортозамещающий потенциал разработки.

Ключевые слова: термоэластопласты, поливинилиденфторид, бутадиен-нитрильный каучук, перекисная вулканизирующая система, динамическая вулканизация.

Dynamically vulcanized thermoplastic elastomers based on PVDF and BNKS-40 AMN

Viktoria A. Cherepanova, ¹	usr21806@vyatsu.ru	 0000-0002-0592-796X
Evgenia S. Shirokova, ¹	usr06779@vyatsu.ru	 0000-0001-5735-3489
Sergey V. Fomin, ¹	rubber_zerg@mail.ru	 0000-0003-0393-5613

¹ Vyatka State University, Mockovskaya st., 36, Kirov, 610000, Russia

Abstract. Thermoplastic elastomers (TPEs) are materials possessing a unique two-phase structure that combines the elasticity of rubbers with the processability of thermoplastics. Today, TPEs produced by dynamic vulcanization (thermoplastic vulcanizates, TPVs), which demonstrate superior performance characteristics, are of particular importance. The aim of this work was to create dynamically vulcanized TPEs based on nitrile butadiene rubber (NBR-40 AMN) and polyvinylidene fluoride (PVDF) containing a peroxide curing system, as well as to study the influence of the peroxide system concentration on the structure and properties of the resulting materials. The microstructure of the obtained materials was studied using FTIR spectroscopy and differential scanning calorimetry. It has been shown that an increase in the degree of vulcanization of the elastomeric phase leads to an improvement in the complex of operational characteristics: tensile strength, elongation at break, thermal stability, and resistance to aggressive media. The materials demonstrate excellent resistance to water, oil, and petroleum, as well as good resistance to gasoline. Samples with a curing agent content of 0.75 phr possess the best characteristics and the target morphology, where the thermoplastic forms a continuous matrix and the cross-linked elastomer is dispersed within it as particles. For these samples, resistance to thermal aging and recyclability were additionally determined. It was found that the change in key performance characteristics after recycling does not exceed 10%. The obtained materials meet the requirements for oil- and fuel-resistant compositions and may be of interest for use in the automotive, oil, and gas industries. The use of domestic raw materials for their production (nitrile butadiene rubbers are produced by PJSC "SIBUR Holding," and PVDF is produced by JSC "GaloPolymer") ensures the import substitution potential of the development.

Keywords: thermoplastic elastomers, polyvinylidene fluoride, butadiene-nitrile rubber, peroxide curing system, dynamic vulcanization.

Для цитирования

Черепанова В.А., Широкова Е.С., Фомин С.В. Динамически вулканизированные термоэластопласты на основе ПВДФ и БНКС-40 АМН // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 233–242. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-233-242

For citation

Cherepanova V.A., Shirokova E.S., Fomin S.V. Dynamically vulcanized thermoplastic elastomers based on PVDF and BNKS-40 AMN. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 233–242. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-233-242

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

Введение

Термоэластопласты (ТЭП) занимают важное место среди современных полимерных материалов благодаря уникальной двухфазной структуре, обеспечивающей таким материалам эластичность каучука и перерабатываемость термопластов [1–4]. Особый интерес представляют ТЭП, полученные методом динамической вулканизации (ДТЭП), которые демонстрируют улучшенные эксплуатационные характеристики [5–8]. Суть процесса динамической вулканизации заключается в совмещении двух стадий: вулканизации каучуковой фазы и её смешения с термопластом в расплаве, что приводит к формированию уникальной морфологии – диспергированных сшитых частиц эластомера в непрерывной термопластичной матрице. Процесс динамической вулканизации был впервые описан Гесслером и Хаслеттом [9] в 1962 году. Их идея получила дальнейшее развитие и научное обоснование в исследованиях Фишера [10], заложив основы для создания материалов с исключительным комплексом свойств. По сравнению с обычными смесевыми ТЭП, ДТЭП демонстрируют превосходное упругое восстановление, повышенную термостойкость, сниженную остаточную деформацию [11]. Благодаря этим превосходным свойствам ДТЭП вызывают большой интерес в различных отраслях промышленности.

Первый коммерческий ДТЭП был изготовлен на основе этиленпропиленового каучука и полипропилена, разработанный компанией Monsanto (Exxon Mobil Corporation) в 1981 году, и относился к материалам общего назначения [12]. Однако растущие потребности промышленности, особенно в автомобильном секторе и нефтегазовой отрасли, стимулировали разработку специализированных маслобензостойких марок, способных сохранять свойства в экстремальных условиях [13–21].

Для создания таких маслобензостойких ДТЭП в качестве эластомерной фазы используют полярные каучуки, такие как силоксановые каучуки [14, 15], сополимер этилена и винилацетата (ЭВА) [16], бутадиен-нитрильные каучуки (БНКС) [17], а также их карбоксилированные [18] и гидрированные [19] модификации, фторкаучуки [20, 21].

В качестве термопластичной фазы используют полимеры, проявляющие стойкость к набуханию в агрессивных средах, например, полипропилен (ПП) [22, 23], акрилонитрилбутадиенстирол (АБС) [24], поливинилиденфторид (ПВДФ) [25, 26], полиамид (ПА) [27].

Выбор БНКС в качестве эластомерной составляющей для создания маслобензостойких ДТЭП наиболее перспективен как с технической, так и с экономической точки зрения, его высокая полярность, крупнотоннажность производства, обуславливают значительно более доступную ценовую позицию по сравнению с фторсодержащими и силоксановыми каучуками, позволяют получать экономически выгодные материалы, отвечающие требованию по масло- и бензостойкости [28].

Для обеспечения комплекса свойств эластомерная фаза в ДТЭП должна быть сшита (вулканизована).

Традиционно для вулканизации БНКС применяются три основных типа вулканизирующих систем: сера, перекись и фенольные смолы [29]. Каждая из них обладает уникальным механизмом действия и оказывает прямое влияние на структуру и конечные свойства вулканизатов. Серная вулканизация является классическим методом, широко используемым для ненасыщенных каучуков. Она приводит к образованию полисульфидных мостиков между макромолекулами, что обеспечивает материалу высокую эластичность и хорошие прочностные показатели при комнатной температуре [30]. Однако основным недостатком серных систем является низкая термостабильность полученных связей, что ограничивает рабочую температуру материалов. При более высоких температурах происходит разрыв полисульфидных связей, ведущий к резкой деградации свойств. Вулканизация фенольными смолами позволяет создавать чрезвычайно стабильные углерод-углеродные связи, что придает материалам отличную термостойкость и стойкость к термоокислительному старению [30]. Несмотря на это, данный процесс требует высоких температур (порядка 180–200 °С) и значительного времени для завершения реакции, что создает риск термической деструкции каучука (а в случае ДТЭП – и термопластичной фазы) и усложняет технологический процесс. Перекисная вулканизация, инициируемая радикальным механизмом, также формирует прочные углерод-углеродные связи между макромолекулами каучука. Эти связи обладают значительно более высокой термостабильностью по сравнению с полисульфидными, что позволяет получать вулканизаты, сохраняющие эксплуатационные характеристики при температурах до 150–170 °С [29]. При этом технологические параметры процесса перекисной вулканизации являются менее жесткими по сравнению со смоляной системой.

Имеется ряд исследований, посвященных оценке влияния различных вулканизирующих систем на структуру и свойства ДТЭП на основе бутадиен-нитрильного каучука: серной [31, 32], смоляной [24], перекисной [33, 34]. Так, в работе [31] было изучено влияние концентрации серной вулканизирующей группы на физико-механические свойства ДТЭП на основе БНКС-18 и ПВХ. Показано, что дополнительная термическая обработка полученных образцов приводит к значительному повышению их маслостойкости. Однако следует отметить, что серные системы обеспечивают в основном базовый уровень эксплуатационных свойств без существенного улучшения термической стабильности материала. Перекисная вулканизирующая система для ДТЭП на основе бутадиен-нитрильных каучуков была использована в [33, 34] и показала свою перспективность для создания термостойких и маслостойких материалов, поскольку она обеспечивает оптимальный баланс между высокими эксплуатационными свойствами, в первую очередь термостабильностью, и приемлемыми технологическими требованиями к проведению процесса [35].

Сочетание полярного бутадиен-нитрильного каучука, сшитого перекисной вулканизирующей системой, и исключительно химически стойкого термопласта ПВХ открывает возможность для создания материалов, отвечающих строгим требованиям к масло- и бензостойкости и термостойкости.

Кроме того, разработка таких высокотехнологичных материалов соответствует приоритетам, определенным в Прогнозе научно-технического развития Российской Федерации на период до 2030 года, где особое внимание уделяется созданию новых полимерных композиционных материалов с заданными свойствами, разработке импортозамещающих технологий в области специальной химической продукции и развитию ресурсо- и энергосберегающих производств [36]. Использование отечественных бутадиен-нитрильных каучуков (производятся на предприятиях АО «СИБУР-Холдинг») и ПВХ (выпускается АО «Галополимер») позволяет получать материалы, отвечающие строгим требованиям к масло- и бензостойкости для создания ДТЭП. Такой подход способствует обеспечению технологического суверенитета России в области специальных полимерных материалов, что особенно важно для критических отраслей промышленности, включая нефтегазовый комплекс, оборонно-промышленный комплекс и транспортное машиностроение.

Целью настоящей работы является создание ДТЭП на основе БНКС-40 АМН и ПВХ, содержащих перекисную вулканизирующую систему, а также исследование влияния концентрации перекисной вулканизирующей системы на структуру и свойства, полученных материалов.

Материалы и методы

Для приготовления динамически вулканизованного термоэластопласта были выбраны сополимер нитрила акриловой кислоты (36–40 %) и бутадиена–1,3 (бутадиен-нитрильный каучук БНКС-40 АМН производства ПАО «СИБУР Холдинг») и поливинилиденфторид (Фторопласт-2М марки А производства АО «ГалоПолимер»). В качестве вулканизирующего агента использовался ди (2-трет-бутилпероксиизопрпил) – бензол 40 % (перекись Retic 40 CC). ДТЭП были получены на роторном микросмесителе периодического действия «Vrabender» объемом 0,1 литр. Схема процесса приготовления ДТЭП представлена на рисунке 1.

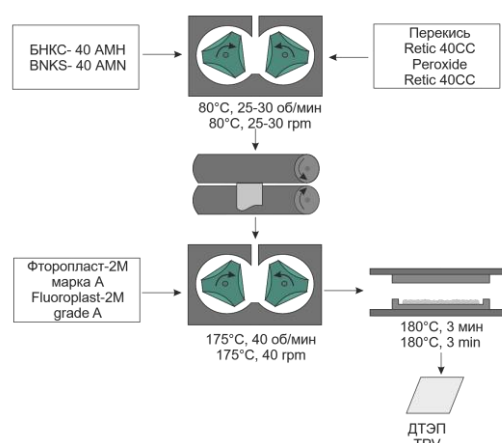


Рисунок 1. Схема процесса приготовления ДТЭП
Figure 1. Scheme of the process of preparation of TPV

Приготовление ДТЭП осуществлялось в два этапа. Первым этапом была подготовка эластомерной фазы, для чего в микросмеситель загружался каучук, пластицировался при 80 °С в течение 5 минут при скорости вращения роторов 25–30 об/мин, после чего вводилась перекись и проводилось смешение в течение 5 минут. Доработка смеси осуществлялась на вальцах резинообрабатывающих подогревательных ПД 320 160/160 (Полимермаш, Санкт-Петербург).

Следующим этапом было совмещение термопластичной и эластомерных фаз и динамическая вулканизация. В микросмеситель при скорости вращения роторов 40 об/мин и температуре 175 °С загружался ПВХ, расплавлялся в течение 5 минут, после чего загружалась эластомерная фаза, смесь находилась в микросмесителе 6 минут при скорости 40 об/мин.

Для последующих испытаний образцы в форме пластин толщиной 2 мм получали прессованием на вулканизационном гидравлическом прессе при температуре 180 °С в течение 3 минут.

Структуру получаемых материалов характеризовали с помощью ИК-спектроскопии на ИК-Фурье-спектрометре «Инфралом ФТ-801» (Россия) с применением метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО).

Температуру плавления, а также степень кристалличности ПВДФ определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием прибора DSC-60 производства «Shimadzu» (Япония). Перед анализом образцы подвергали термообработке при 200 °С для устранения термической предыстории, после чего проводили нагрев со скоростью 10 °С/мин в диапазоне от 40 до 200 °С. Степень кристалличности рассчитывалась по общепринятым методикам; энтальпия плавления полностью кристаллизованного ПВДФ была принята 104,7 Дж/г [37,38].

Для изучения структуры вулканизационной сетки использовали метод равновесного набухания в *o*-ксилоле (квалификация «чистый для анализа» ТУ 2631-088-44493179-06) [39, 40].

Механические свойства композиций оценивали путем определения условной прочности при растяжении и удлинения при разрыве в соответствии со стандартом ASTM D638. Испытания выполняли на разрывной машине AGX фирмы «Shimadzu» (Япония) при комнатной температуре на образцах типа 4 при скорости растяжения 500 мм/мин. Данная машина оборудована термокамерой, позволяющей проводить тесты в условиях повышенных температур.

Твердость композиций оценивали согласно ASTM D2240 при помощи дюрометра типа А при комнатной температуре.

В соответствии со стандартом ISO 188:2013, испытания на ускоренное тепловое старение образцов ДТЭП проводились в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ (Россия). Согласно ГОСТ 9.024-74 были выбраны параметры испытаний: температура 100 °С, продолжительность 72 часа. После извлечения из шкафа образцы выдерживались при комнатной температуре в течение 24 часов, а затем оценивалось изменение условной прочности при растяжении.

Стойкость к воздействию сред оценивали по изменению массы образцов размером 10 x 10 x 2 мм в дистиллированной воде, бензине автомобильном марки ЭКТО-92 (АИ-92-К5) ГОСТ 32513-2013 (нефтебаза ООО «Тольяттиннефтепродукт Сервис»), нефти (ПАО «Транснефть») и индустриальном масле марки И-40А ГОСТ 20799-88 (компания смазочных материалов ООО «ЛЛК-ИНТЕРНЭШЛ») в течение 7 суток при комнатной температуре согласно ГОСТ 12020-2018.

Повторную промышленную переработку моделировали путем измельчения и гомогенизации образцов в микросмесителе при температуре 175 °С, скорости 40 об/мин в течение 5 минут.

Результаты и обсуждение

В результате проведенной работы были получены композиции, в которых соотношение эластомерной и термопластичной фаз составляло 50:50 (по массе). Дозировка перекиси составляла 0,0; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75 м.ч. на 100 м.ч. каучука.

Известно [41, 42], что для получения ДТЭП необходимо обеспечить обращение фаз: термопласт должен сформировать сплошную матрицу, а сшитый эластомер диспергирован в виде частиц. Образование непрерывной термопластичной фазы позволяет материалу размягчаться при нагреве и многократно перерабатываться, в то время как диспергированные сшитые частицы каучука ответственны за высокое упругое восстановление и низкую остаточную деформацию. Для оценки структуры полученных образцов использовали ИК-Фурье спектроскопию. На рисунке 2 представлены ИК-спектры полученных композиций. Данные спектры являются спектрами НПВО, поэтому характеризуют только поверхность исследуемых образцов.

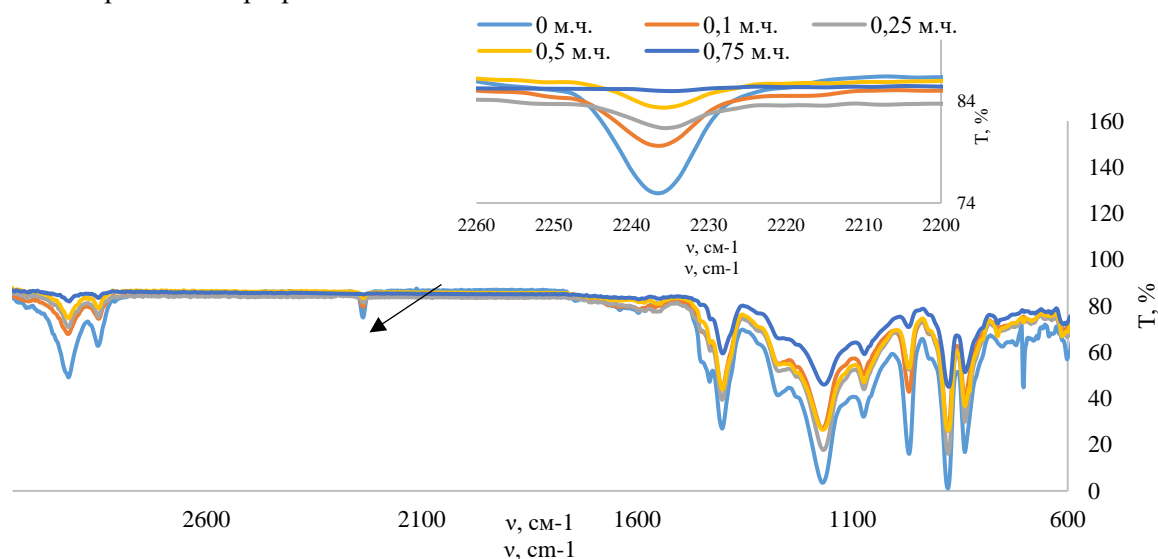


Рисунок 2. ИК-спектры исследуемых образцов с различным содержанием перекиси
Figure 2. IR-spectra of the studied samples with different peroxide content

На представленных ИК-спектрах наблюдается характерный для бутадиен-нитрильных каучуков пик при 2237 см^{-1} , соответствующий валентным колебаниям CN-групп. Интенсивность данного пика ослабевает по мере увеличения содержания вулканизирующего агента, и при 0,75 м.ч. перекиси происходит полное исчезновение полосы поглощения при 2237 см^{-1} , что может свидетельствовать о том, что сплошную фазу образует термопласт – ПВДФ. Т.е. для образцов, содержащих 0,75 м.ч. перекиси формируется целевая структура ДТЭП.

Неизменность структуры ПВДФ в процессе динамической вулканизации подтверждали методом ДСК по данным о температуре плавления и степени кристалличности, т. к. любые превращения (например, сшивка термопластичной фазы) неизбежно нарушают кристаллическую структуру, что влечет за собой изменение указанных параметров. Кривые ДСК для исследуемых образцов, а также данные о температуре плавления и степени кристалличности представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

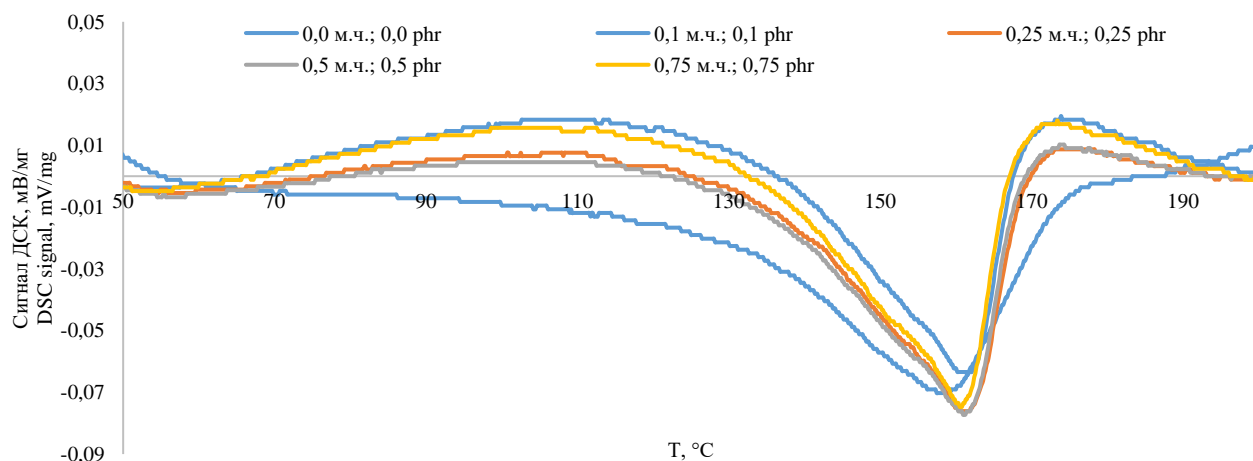


Рисунок 3. Кривые ДСК исследуемых образцов

Figure 3. DSC curves of the studied samples

Таблица 1.

Характеристики термопластичной и эластомерной фаз исследуемых образцов

Table 1.

Characteristics of thermoplastic and elastomer phases of the studied samples

Показатель Index		Содержание перекиси, м.ч. на 100 м.ч. каучука Peroxide dosage, phr.				
		0	0,1	0,25	0,5	0,75
Термопластичная фаза Thermoplastic phase	Температура плавления, $T_m, ^\circ\text{C}$ Melting temperature, $T_m, ^\circ\text{C}$	157,95	161,31	161,33	161,25	160,64
	Степень кристалличности, $\chi_c, \%$ Crystallinity degree, $\chi_c, \%$	12,4	10,7	11,4	10,8	11,5
Эластомерная фаза Elastomeric phase	Плотность поперечного сшивания, $\nu \cdot 10^4, \text{ моль/см}^3$ Cross-linking density, $\nu \cdot 10^4, \text{ mol/cm}^3$	1,3	1,5	3,3	6,1	6,2
	Средняя молекулярная масса отрезка цепи, заключенного между двумя поперечными связями, $M_c, \text{ г/моль}$ The average molecular weight of a chain segment located between two cross-links, $M_c, \text{ g/mol}$	7418	6560	2973	1624	1609
	Концентрация поперечных связей, $n \times 10^{-19}, \text{ см}^{-3}$ Cross-link concentration, $n \times 10^{-19}, \text{ cm}^{-3}$	4,0	4,6	10,0	18,0	19,0

При увеличении содержания вулканизирующего агента в исследуемых образцах температура плавления и степень кристалличности практически не изменяются. Чуть большая степень кристалличности у образца без вулканизирующего агента может быть связана с тем, что протекание динамической вулканизации замедляет процесс кристаллизации. Полученные данные подтверждают, что структура ПВДФ осталась без существенных изменений. Это однозначно свидетельствует о том, что перекись инициировала сшивку только молекул БНКС, не затронув ПВДФ.

Увеличение количества вулканизирующего агента приводит к ожидаемому увеличению плотности поперечной сшивки, то есть увеличению степени вулканизации, в то время как средняя молекулярная масса между двумя соседними сшивками закономерно снижается.

Физико-механические характеристики при температуре $23 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, коэффициенты изменения условной прочности при $+100\text{ }^\circ\text{C}$, стойкость к воздействию агрессивных сред полученных образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Свойства исследуемых образцов с различным содержанием перекиси

Table 2.

Properties of the studied samples with different peroxide contents

Показатель Index	Содержание перекиси, м.ч. на 100 м.ч. каучука Peroxide dosage, phr					
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	
Условная прочность при растяжении, f_t , МПа Tensile strength, f_t , MPa	4,2	5,3	5,5	8,5	8,6	
Напряжение при 100 % удлинении, f_{100} , МПа Stress at 100 % strain, f_{100} , MPa	3,9	5,2	-	7,6	7,2	
Удлинение при разрыве, ϵ , % Elongation at break, ϵ , %	165	135	95	175	217	
Твердость по Шор А, ед. Hardness (shore A), units	84	89	95	95	95	
Коэффициент изменения условной прочности при +100 °С, $K_{100^\circ\text{C}}$ Coefficient of change in tensile strength at 100 °C, $K_{100^\circ\text{C}}$	0,29	0,30	0,35	0,42	0,44	
Изменение массы образцов в различных средах, % Change of weight in different environments, %	Вода Water	<1				
	Бензин Motor gasoline	23,5	13,7	13,4	11,7	10,2
	Нефть Petroleum	1,4	1,4	1,4	1,4	<1
	Масло Industrial oil	3,2	1,2			<1

С увеличением содержания перекиси в составе образцов отмечается рост физико-механических показателей полученных композиций. Наибольшие значения условной прочности при растяжении и удлинения при разрыве наблюдались у композиций, содержащих 0,5 и 0,75 м.ч. перекиси. С ростом содержания перекиси увеличивается стойкость к воздействию бензина, нефти и масла. При этом полученные образцы по шкале в соответствии с ГОСТ 12020–2018 имеют «отличную» стойкость к воде, нефти и маслу и «хорошую-удовлетворительную» к воздействию бензина.

Таким образом на основании комплексного исследования установлено, что для образцов с содержанием перекиси 0,75 м.ч. на 100 м.ч. каучука формируется целевая структура ДТЭП и наблюдается оптимальный комплекс характеристик.

В связи с этим для данной композиции была оценена стойкость к тепловому старению и сохранение упруго-прочностных свойств после повторной переработки. Полученные данные представлены в таблице 3. Необходимо отметить увеличение напряжения при 100 % удлинении (+6 %) и условной прочности (+8 %), обусловленное, предположительно, дополнительным структурированием ДТЭП. Данный процесс может протекать как вследствие термоокисления по 1,2 – структурам бутадиеновых звеньев бутадиен-нитрильного каучука, так и в результате поствулканизации каучуковой фазы, что характерно для динамически вулканизованных термоэластопластов. [43]. Однако в целом данные изменения незначительны.

Таблица 3.

Свойства образцов после ускоренного теплового старения и повторной переработки

Table 3.

Properties of samples after thermal aging and recycling

Показатель Index	Значение Value
Содержание перекиси, м.ч. на 100 м.ч. каучука Peroxide dosage, phr	0,75
Изменение свойств после старения при 100 °С за 72 ч, % Change in properties after thermal aging at 100 °C for 72 h, %	
условная прочность tensile strength	+8
относительное удлинение при разрыве elongation at break	+9
напряжение при 100 % удлинении stress at 100 % strain	+6
Изменение свойств после повторной переработки, % Change in properties after recycling, %	
условная прочность tensile strength	0
относительное удлинение при разрыве elongation at break	+4
напряжение при 100 % удлинении stress at 100 % strain	+6

Как уже отмечалось ранее, ключевым преимуществом ТЭП по сравнению с резинами, является возможность их повторной переработки, что, снижает количество отходов производства и потребления. Выявлено (таблица 3),

что после цикла повторной переработки изменение ключевых эксплуатационных характеристик не превышают 10 %, что свидетельствует о высокой стабильности свойств.

Заключение

В результате проведенной работы установлено, что на основе каучука БНКС-40 АМН и ПВДФ может быть получен ДТЭП, стойкий к воде, бензину, маслу и нефти, который может быть переработан традиционными методами переработки расплавов полимеров. Методами ИК-Фурье спектроскопии и ДСК доказано, что при содержании перекиси 0,75 м.ч. формируется целевая морфология, при которой сшитые частицы эластомера диспергированы в непрерывной матрице термопласта, при этом кристаллическая структура ПВДФ остается неизменной. Установлено, что увеличение степени вулканизации

эластомерной фазы приводит к значительному улучшению комплекса эксплуатационных характеристик. Подтверждена возможность повторной переработки полученного материала с сохранением комплекса значимых характеристик. Проведенные испытания подтвердили его практическую ценность. Полученный ДТЭП по комплексу свойств соответствует требованиям, предъявляемым к маслобензостойким резинам, и может рассматриваться в качестве перспективного материала для замены традиционных резин, сочетая при этом преимущества термопластичности с эксплуатационной долговечностью.

Литература

- 1 Le Hel C., Bounor-Legaré V., Catherin M., Lucas A. et al. TPV: A new insight on the rubber morphology and mechanic/elastic properties // *Polymers*. 2020. V. 12. № 10. doi: 10.3390/polym12102315
- 2 Вострякова Н.В. Свойства и применение термоэластопластов. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1979. 50 с.
- 3 Пол Д., Ньюмен С. Полимерные смеси / пер. с англ. под ред. Ю.К. Годовского. М.: Мир, 1981. Т. 2. С. 312–338.
- 4 Марк Дж., Эрман Б., Эйрич Ф. Каучук и резина. Наука и технология / пер. с англ. под ред. А.А. Берлина, Ю.Л. Морозова. М.: Интеллект, 2011. 767 с.
- 5 Koral P. Termoplastike vulkanizaty // *Kozar strei*. 1984. V. 34. № 8. P. 211–213.
- 6 Вольфсон С.И. Динамически вулканизированные термоэластопласты: получение, переработка, свойства. М.: Наука, 2004. 170 с.
- 7 Вольфсон С.И., Охотина Н.А., Нигматуллина А.И. Основные тенденции развития мирового и российского рынков нанотехнологий и нанокompозитных материалов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 7. С. 100–101.
- 8 Ning N., Li S., Wu H. et al. Preparation, microstructure, and microstructure-properties relationship of thermoplastic vulcanizates (TPVs): a review // *Progress in Polymer Science*. 2018. № 79. P. 61–97. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2017.11.003
- 9 Gessler A.M., Haslett W.H. Process for preparing a vulcanised blend of crystalline polypropylene and chlorinated butyl rubber. Пат. США № 3037954. 1962.
- 10 Fisher W.K. Thermoplastic blend of partially cured monoolefin copolymer rubber and polyolefin plastic. Пат. США № 3862106. 1973.
- 11 Cui Y., Li X., Ni H. et al. Sustainable, Processable, and Oil-Resistant Biodegradable Thermoplastic Elastomer via Dynamic Vulcanization // *Macromolecules*. 2025. V. 58. № 14. P. 7445–7456. doi: 10.1021/acs.macromol.5c00345
- 12 Li S., Tian H., Hu G.H., Ning N. et al. Effects of shear during injection molding on the anisotropic microstructure and properties of EPDM/PP TPV containing rubber nanoparticle agglomerates // *Polymer*. 2021. V. 229. P. 124008. doi: 10.1016/j.polymer.2021.124008
- 13 Kao-ian P., Banerjee S.S., Yudha S.S., Salaeh S. Strengthened Poly(vinylidene fluoride)/Epoxidized Natural Rubber Blend by a Reactive Compatibilizer Based on an Amino Acid-Modified Fluorocarbon Elastomer // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024. V. 63. № 15. P. 6615–6631. doi: 10.1021/acs.iecr.3c04672
- 14 Li Q., Tang J. Reactive compatibilization of zinc dimethacrylate on dynamically vulcanized thermoplastic polyurethane/silicone rubber blends // *Polymer Engineering and Science*. 2025. V. 65. № 2. P. 539–549. doi: 10.1002/pen.27023
- 15 Wang Y., Gong Z., Xu C., Chen Y. Poly(vinylidene fluoride)/fluororubber/silicone rubber thermoplastic vulcanizates prepared through core-shell dynamic vulcanization: Formation of different rubber/plastic interfaces via controlling the core from "soft" to "hard" // *Materials Chemistry and Physics*. 2017. V. 195. P. 123–131. doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.04.016
- 16 Maghamirad G., Ghorbanzadeh Ahangari M., Karimi M., Hassani Niaki M. Effect of compatibilizer and polyhedral oligomeric silsesquioxane on mechanical, thermal, and morphological properties of polyamide6/poly(ethylene-co-vinyl acetate) composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2025. V. 44. № 17-18. P. 1036–1046. doi: 10.1177/07316844241235438
- 17 Huang J., Wu H., Wang X., Yu H. et al. Facile preparation of SAN/NBR TPV with balanced stiffness-toughness via metal-ligand coordination-induced dynamic vulcanization and in situ interfacial compatibilization // *Polymer*. 2024. V. 297. P. 126852. doi: 10.1016/j.polymer.2024.126852
- 18 Salaeh S., Das A., Wießner S. Design and fabrication of thermoplastic elastomer with ionic network: A strategy for good performance and shape memory capability // *Polymer*. 2021. V. 223. P. 123699. doi: 10.1016/j.polymer.2021.123699
- 19 Cui Z., Jing Y., Liu Y., Du A. Investigation on selective distribution of carbon nanotubes in thermoplastic vulcanizate (TPV) nanocomposites based on HNBR/TPEE and property optimization: road to functionalized applications // *Polymer*. 2025. V. 328. P. 128469. doi: 10.1016/j.polymer.2025.128469
- 20 Weijin S., Wentong L., Hao T. et al. Preparation and properties of silicone thermoplastic elastomer and its molecular dynamics study // *Polymer Bulletin*. 2024. V. 81. № 12. P. 11315–11338. doi: 10.1007/s00289-024-05218-9
- 21 Guo Y., Tian H., Li X., Han J. et al. Preparation of FKM/EFEP thermoplastic vulcanizate with excellent heat and oil resistance, gas barrier property and recyclability // *Polymer*. 2022. V. 262. P. 125429. doi: 10.1016/j.polymer.2022.125429
- 22 Peng T., Lv F., Gong Z., Cao L. et al. Design of PP/EPDM/NBR TPVs with tunable mechanical properties via regulating the core-shell structure // *Polymer Testing*. 2020. V. 90. P. 106767. doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106767
- 23 Hou J., Zhong M., Pan X., Chen L. et al. Fabricating 3D printable BIIR/PP TPV via masterbatch and interfacial compatibilization // *Composites Part B*. 2020. V. 199. P. 108220. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108220

- 24 Вольфсон С.И., Хасанова А.Д., Казаков Ю.М., Хусаинов А.Д. и др. Структура и свойства маслобензостойких термопластичных вулканизатов, содержащих модифицированный технический углерод // *Механика композитных материалов*. 2021. Т. 57. № 4. С. 751–766. doi: 10.22364/mkm.57.4.10
- 25 Saleh S., Thitithammawong A., Banerjee S.S. A new strategy applying ternary blends of modified natural rubber with fluoroplastic and fluorocarbon elastomer for high-performance thermoplastic vulcanizate // *Polymer Testing*. 2024. V. 140. P. 108594. doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108594
- 26 Chen Y., Fan J., Wang W., Wang Y. et al. Influence of size reduction of crosslinked rubber particles on phase interface in dynamically vulcanized poly(vinylidene fluoride)/silicone rubber blends // *Polymer Testing*. 2017. V. 63. P. 263–274. doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.08.021
- 27 Chatterjee T., Basu D., Das A., Wiessner S. et al. Super thermoplastic vulcanizates based on carboxylated acrylonitrile butadiene rubber (XNBR) and polyamide (PA12) // *European Polymer Journal*. 2016. V. 78. P. 235–252. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2016.03.027
- 28 Ismail S.M.R.S., Chatterjee T., Naskar K. Superior heat-resistant and oil-resistant blends based on dynamically vulcanized hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber and polyamide 12 // *Polymers for Advanced Technologies*. 2016. V. 28. P. 665–678. doi: 10.1002/pat.3966
- 29 Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика. М.: Техинформ, 2012. 744 с.
- 30 Дик Дж.С. Технология резины: Рецептуростроение и испытания / пер. с англ. под ред. В.А. Шершнева. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
- 31 Охотина Н.А., Кузнецова О.А., Кашшапов Б.Ф., Новикова Е.В. Динамически вулканизированные термоэластопласты на основе поливинилхлорида и бутадиен-нитрильного каучука // *Вестник Казанского технологического университета*. 2023. Т. 16. № 8. С. 162–164.
- 32 Quliyev A.J., Kakhramanov N.T., Koseva N.S., Arzumanova N.B. Rheological properties of mixtures of random polypropylene with butadiene-nitrile rubber and vulcanizates based on them // *Azerbaijan Chemical Journal*. 2021. № 1. P. 23–29. doi: 10.32737/0005-2531-2021-1-23-29
- 33 Шадрин Н.В., Гоголев В.Д., Исакова Т.А. Влияние химически модифицированного сверхвысокомолекулярного полиэтилена на свойства бутадиен-нитрильного каучука // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2021. Т. 14. № 4. С. 424–432.
- 34 Cui Z., Li X., Feng W., Wei L. et al. Effect of crosslinking agent dosage on the morphology and properties of thermoplastic vulcanizates based on hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber and thermoplastic polyester elastomer // *Polymer*. 2023. V. 287. P. 126420. doi: 10.1016/j.polymer.2023.126420
- 35 Singha N., Jana S. *Advances in Thermoplastic Elastomers*. Elsevier, 2023. 432 p. doi: 10.1016/C2021-0-01031-2
- 36 Прогноз научно-технического развития Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 3 янв. 2014 г. URL: https://www.researchgate.net/publication/293792988_Prognoz_nauchno-technologicheskogo_razvitiya_Rossii_2030 (дата обращения: 19.01.2026).
- 37 Zhang X., Lang W.Z., Xu H.P. Improved performances of PVDF/PFSA/O-MWNTs hollow fiber membranes and the synergism effects of two additives // *Journal of Membrane Science*. 2014. V. 469. P. 458–470. doi: 10.1016/j.memsci.2014.07.009
- 38 Yang S., Wu C., Ji D. et al. Preparation and characterization of fiber braided tube reinforced polyethylene hollow fiber membranes via thermally induced phase separation // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023. V. 11. № 2. P. 109375. doi: 10.1016/j.jece.2023.109375
- 39 Тарер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Химия, 1968. 536 с.
- 40 Аверко-Антонович И.Ю., Бикмуллин Р.Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.
- 41 Lohrasbi P., Yeganeh J.K. Synergistic toughening of poly(lactic acid)/poly(ethylene vinyl acetate) (PLA/EVA) by dynamic vulcanization and presence of hydrophobic nanoparticles // *Polymers for Advanced Technologies*. 2021. V. 32. № 11. P. 4326–4339. doi: 10.1002/pat.5435
- 42 Banerjee S.S., Bhowmick A.K. High-temperature thermoplastic elastomers from rubber-plastic blends: a state-of-the-art review // *Rubber Chemistry and Technology*. 2017. V. 90. № 1. P. 1–36. doi: 10.5254/rct.16.83786
- 43 Холден Д., Крихельдорф Х.Р., Куирк Р.П. Термоэластопласты / пер. с англ. 3-го изд. под ред. Б.Л. Смирнова. СПб.: Профессия, 2011. 720 с.

References

- 1 Le Hel C., Bounor-Legaré V., Catherin M., Lucas A. et al. TPV: A new insight on the rubber morphology and mechanic/elastic properties. *Polymers*. 2020. vol. 12. no. 10. article 2315. doi: 10.3390/polym12102315.
- 2 Vostryakova N.V. *Properties and Application of Thermoplastic Elastomers*. Moscow: TsNIITEnftekhim, 1979. 50 p. (in Russian).
- 3 Paul D., Newman S. *Polymer Blends*. Translated from English. Ed. by Yu.K. Godovsky. Moscow: Mir, 1981. vol. 2. pp. 312–338. (in Russian).
- 4 Mark J., Erman B., Eirich F. *Rubber and Rubber*. Science and Technology. Translated from English. Ed. by A.A. Berlin, Yu.L. Morozov. Moscow: Intellekt, 2011. 767 p. (in Russian).
- 5 Koral P. *Termoplastike vulkanizaty*. Kozar strei. 1984. vol. 34. no. 8. pp. 211–213.
- 6 Wolfson S.I. *Dynamically Vulcanized Thermoplastic Elastomers: Production, Processing, Properties*. Moscow: Nauka, 2004. 170 p. (in Russian).
- 7 Wolfson S.I., Okhotina N.A., Nigmatullina A.I. Main Trends in the Development of Global and Russian Markets for Nanotechnologies and Nanocomposite Materials. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013. vol. 16. no. 7. pp. 100–101. (in Russian).
- 8 Ning N., Li S., Wu H. et al. Preparation, microstructure, and microstructure-properties relationship of thermoplastic vulcanizates (TPVs): a review. *Progress in Polymer Science*. 2018. no. 79. pp. 61–97. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2017.11.003.
- 9 Gessler A.M., Haslett W.H. Process for preparing a vulcanised blend of crystalline polypropylene and chlorinated butyl rubber. US Patent no. 3037954. 1962.
- 10 Fisher W.K. Thermoplastic blend of partially cured monoolefin copolymer rubber and polyolefin plastic. US Patent no. 3862106. 1973.
- 11 Cui Y., Li X., Ni H. et al. Sustainable, Processable, and Oil-Resistant Biodegradable Thermoplastic Elastomer via Dynamic Vulcanization. *Macromolecules*. 2025. vol. 58. no. 14. pp. 7445–7456. doi: 10.1021/acs.macromol.5c00345.

- 12 Li S., Tian H., Hu G.H., Ning N. et al. Effects of shear during injection molding on the anisotropic microstructure and properties of EPDM/PP TPV containing rubber nanoparticle agglomerates. *Polymer*. 2021. vol. 229. article 124008. doi: 10.1016/j.polymer.2021.124008.
- 13 Kao-ian P., Banerjee S.S., Yudha S.S., Salaeh S. Strengthened Poly(vinylidene fluoride)/Epoxidized Natural Rubber Blend by a Reactive Compatibilizer Based on an Amino Acid-Modified Fluorocarbon Elastomer. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024. vol. 63. no. 15. pp. 6615–6631. doi: 10.1021/acs.iecr.3c04672.
- 14 Li Q., Tang J. Reactive compatibilization of zinc dimethacrylate on dynamically vulcanized thermoplastic polyurethane/silicone rubber blends. *Polymer Engineering and Science*. 2025. vol. 65. no. 2. pp. 539–549. doi: 10.1002/pen.27023.
- 15 Wang Y., Gong Z., Xu C., Chen Y. Poly(vinylidene fluoride)/fluororubber/silicone rubber thermoplastic vulcanizates prepared through core-shell dynamic vulcanization: Formation of different rubber/plastic interfaces via controlling the core from "soft" to "hard". *Materials Chemistry and Physics*. 2017. vol. 195. pp. 123–131. doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.04.016.
- 16 Maghamirad G., Ghorbanzadeh Ahangari M., Karimi M., Hassani Niaki M. Effect of compatibilizer and polyhedral oligomeric silsesquioxane on mechanical, thermal, and morphological properties of polyamide6/poly(ethylene-co-vinyl acetate) composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2025. vol. 44. no. 17–18. pp. 1036–1046. doi: 10.1177/07316844241235438.
- 17 Huang J., Wu H., Wang X., Yu H. et al. Facile preparation of SAN/NBR TPV with balanced stiffness-toughness via metal-ligand coordination-induced dynamic vulcanization and in situ interfacial compatibilization. *Polymer*. 2024. vol. 297. article 126852. doi: 10.1016/j.polymer.2024.126852.
- 18 Salaeh S., Das A., Wießner S. Design and fabrication of thermoplastic elastomer with ionic network: A strategy for good performance and shape memory capability. *Polymer*. 2021. vol. 223. article 123699. doi: 10.1016/j.polymer.2021.123699.
- 19 Cui Z., Jing Y., Liu Y., Du A. Investigation on selective distribution of carbon nanotubes in thermoplastic vulcanizate (TPV) nanocomposites based on HNBR/TPEE and property optimization: road to functionalized applications. *Polymer*. 2025. vol. 328. article 128469. doi: 10.1016/j.polymer.2025.128469.
- 20 Weijin S., Wentong L., Hao T. et al. Preparation and properties of silicone thermoplastic elastomer and its molecular dynamics study. *Polymer Bulletin*. 2024. vol. 81. no. 12. pp. 11315–11338. doi: 10.1007/s00289-024-05218-9.
- 21 Guo Y., Tian H., Li X., Han J. et al. Preparation of FKM/EFEP thermoplastic vulcanizate with excellent heat and oil resistance, gas barrier property and recyclability. *Polymer*. 2022. vol. 262. article 125429. doi: 10.1016/j.polymer.2022.125429.
- 22 Peng T., Lv F., Gong Z., Cao L. et al. Design of PP/EPDM/NBR TPVs with tunable mechanical properties via regulating the core-shell structure. *Polymer Testing*. 2020. vol. 90. article 106767. doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106767.
- 23 Hou J., Zhong M., Pan X., Chen L. et al. Fabricating 3D printable BIIR/PP TPV via masterbatch and interfacial compatibilization. *Composites Part B*. 2020. vol. 199. article 108220. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108220.
- 24 Wolfson S.I., Khasanova A.D., Kazakov Yu.M., Khusainov A.D. et al. Structure and Properties of Oil-Resistant Thermoplastic Vulcanizates Containing Modified Carbon Black. *Mechanics of Composite Materials*. 2021. vol. 57. no. 4. pp. 751–766. doi: 10.22364/mkm.57.4.10 (in Russian).
- 25 Salaeh S., Thitithammawong A., Banerjee S.S. A new strategy applying ternary blends of modified natural rubber with fluoroplastic and fluorocarbon elastomer for high-performance thermoplastic vulcanizate. *Polymer Testing*. 2024. vol. 140. article 108594. doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108594.
- 26 Chen Y., Fan J., Wang W., Wang Y. et al. Influence of size reduction of crosslinked rubber particles on phase interface in dynamically vulcanized poly(vinylidene fluoride)/silicone rubber blends. *Polymer Testing*. 2017. vol. 63. pp. 263–274. doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.08.021.
- 27 Chatterjee T., Basu D., Das A., Wiessner S. et al. Super thermoplastic vulcanizates based on carboxylated acrylonitrile butadiene rubber (XNBR) and polyamide (PA12). *European Polymer Journal*. 2016. vol. 78. pp. 235–252. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2016.03.027.
- 28 Ismail S.M.R.S., Chatterjee T., Naskar K. Superior heat-resistant and oil-resistant blends based on dynamically vulcanized hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber and polyamide 12. *Polymers for Advanced Technologies*. 2016. vol. 28. pp. 665–678. doi: 10.1002/pat.3966.
- 29 Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. *Large Rubber Worker's Handbook*. Moscow: Tekhinform, 2012. 744 p. (in Russian).
- 30 Dick J.S. *Rubber Technology: Formulation and Testing*. Translated from English. Ed. by V.A. Shershnev. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2010. 620 p. (in Russian).
- 31 Okhotina N.A., Kuznetsova O.A., Kashshapov B.F., Novikova E.V. Dynamically Vulcanized Thermoplastic Elastomers Based on Polyvinyl Chloride and Butadiene-Nitrile Rubber. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2023. vol. 16. no. 8. pp. 162–164. (in Russian).
- 32 Quliyev A.J., Kakhramanov N.T., Koseva N.S., Arzumanova N.B. Rheological properties of mixtures of random polypropylene with butadiene-nitrile rubber and vulcanizates based on them. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2021. no. 1. pp. 23–29. doi: 10.32737/0005-2531-2021-1-23-29.
- 33 Shadrinov N.V., Gogolev V.D., Isakova T.A. Influence of Chemically Modified Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene on the Properties of Butadiene-Nitrile Rubber. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2021. vol. 14. no. 4. pp. 424–432. (in Russian).
- 34 Cui Z., Li X., Feng W., Wei L. et al. Effect of crosslinking agent dosage on the morphology and properties of thermoplastic vulcanizates based on hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber and thermoplastic polyester elastomer. *Polymer*. 2023. vol. 287. article 126420. doi: 10.1016/j.polymer.2023.126420.
- 35 Singha N., Jana S. *Advances in Thermoplastic Elastomers*. Elsevier, 2023. 432 p. doi: 10.1016/C2021-0-01031-2.
- 36 Forecast of Scientific and Technological Development of the Russian Federation for the Period up to 2030: Approved by Order of the Government of the Russian Federation dated January 3, 2014. Available at: https://www.researchgate.net/publication/293792988_Prognoz_naucno-tehnologiceskogo_razvitiia_Rossii_2030 (accessed: 19.01.2026) (in Russian).
- 37 Zhang X., Lang W.Z., Xu H.P. Improved performances of PVDF/PFSA/O-MWNTs hollow fiber membranes and the synergism effects of two additives. *Journal of Membrane Science*. 2014. vol. 469. pp. 458–470. doi: 10.1016/j.memsci.2014.07.009.
- 38 Yang S., Wu C., Ji D. et al. Preparation and characterization of fiber braided tube reinforced polyethylene hollow fiber membranes via thermally induced phase separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023. vol. 11. no. 2. article 109375. doi: 10.1016/j.jece.2023.109375.
- 39 Tager A.A. *Physical Chemistry of Polymers*. Moscow: Khimiya, 1968. 536 p. (in Russian).
- 40 Averko-Antonovich I.Yu., Bikmullin R.T. *Methods for Studying the Structure and Properties of Polymers*. Kazan: KSTU, 2002. 604 p. (in Russian).


41 Lohrasbi P., Yeganeh J.K. Synergistic toughening of poly(lactic acid)/poly(ethylene vinyl acetate) (PLA/EVA) by dynamic vulcanization and presence of hydrophobic nanoparticles. *Polymers for Advanced Technologies*. 2021. vol. 32. no. 11. pp. 4326–4339. doi: 10.1002/pat.5435.

42 Banerjee S.S., Bhowmick A.K. High-temperature thermoplastic elastomers from rubber-plastic blends: a state-of-the-art review. *Rubber Chemistry and Technology*. 2017. vol. 90. no. 1. pp. 1–36. doi: 10.5254/rct.16.83786.


43 Holden D., Kricheldorf H.R., Quirk R.P. *Thermoplastic Elastomers*. Translated from English. 3rd ed. Ed. by B.L. Smirnov. St. Petersburg: Professiya, 2011. 720 p. (in Russian).

Сведения об авторах


Виктория А. Черепанова, инженер, центр компетенций «Полимерные материалы», Вятский государственный университет, ул Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия, usr21806@vyatsu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0592-796X>

Евгения С. Широкова к.х.н., доцент, кафедра химии и технологии переработки полимеров, Вятский государственный университет, ул Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия, usr06779@vyatsu.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5735-3489>

Сергей В. Фомин к.т.н., проректор, отдел международной деятельности, Вятский государственный университет, ул Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия, rubber_zerg@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0393-5613>

Вклад авторов

Виктория А. Черепанова, выполнение экспериментальной части исследования, обработка и визуальное представление результатов исследования, подготовка текста статьи

Евгения С. Широкова формулировка исходной концепции и целей исследования, разработка и постановка экспериментальной методики, выполнение практических исследований, подготовка текста статьи


Сергей В. Фомин координация проекта, обеспечение материально-технической базы, интерпретация полученных данных

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors


Viktoriya A. Cherepanova engineer, Competence Center "Polymer Materials", Vyatka State University, Moskovskaya st., 36, Kirov, 610000, Russia, usr21806@vyatsu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0592-796X>

Evgenia S. Shirokova Cand. Sci. (Chem.), associate professor, Department of Chemistry and Technology of Polymer Processing, Vyatka State University, Moskovskaya st., 36, Kirov, 610000, Russia, usr06779@vyatsu.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5735-3489>

Sergey V. Fomin Cand. Sci. (Engin.), vice-rector, Department of International Activities, Vyatka State University, Moskovskaya st., 36, Kirov, 610000, Russia, rubber_zerg@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0393-5613>

Contribution

Viktoriya A. Cherepanova implementation of the experimental part of the research, processing and visual presentation of research results, preparation of the article text

Evgenia S. Shirokova formulation of the research concept and objectives, development and implementation of experimental methodology, conducting practical research, preparation of the article text

Sergey V. Fomin project coordination, provision of material and technical base, interpretation of the obtained data

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 24/12/2025	После редакции 18/01/2025	Принята в печать 02/02/2026
Received 24/12/2025	Accepted in revised 18/01/2025	Accepted 02/02/2026