

Научная статья

УДК 621.315.616.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-90-102

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ И ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ БИНАРНЫХ И ТРОЙНЫХ СМЕСЕЙ БНК–ТЭП, ВУЛКАНИЗОВАННЫХ ПЕРОКСИДОМ

А.С. Пушница¹, М.А. Венедиктова¹, Е.В. Куршев¹, С.Л. Лонский¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Исследованы микроструктурные особенности и термостабильность бинарных и тройных смесевых композиций на основе бутадиен-нитрильных каучуков и термоэластопластов (БНК–ТЭП), вулканизованных пероксидом. В результате комплексных микроструктурных и термических исследований бинарных и тройных смесевых композиций на основе каучука (БНКС-40АМН) и стирольных термоэластопластов (СБС-Р, СЭБС), вулканизованных органическим пероксидом, установлены ключевые закономерности, определяющие их морфологию и термостабильность.

Ключевые слова: бинарная смесь, тройная смесь, термоэластопласты, бутадиен-нитрильный каучук, морфология, микроструктура, параметр растворимости, термоокислительное старение

Для цитирования: Пушница А.С., Венедиктова М.А., Куршев Е.В., Лонский С.Л. Сравнительный анализ морфологии и термоокислительной стабильности бинарных и тройных смесей БНК–ТЭП, вулканизованных пероксидом // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 90–102. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-90-102.

Scientific article

COMPARATIVE ANALYSIS OF MORPHOLOGY AND THERMAL OXIDATIVE STABILITY OF BINARY AND TERNARY BNR–TPE BLENDS CURED WITH PEROXIDE

A.S. Pushnitsa¹, M.A. Venediktova¹, E.V. Kurshev¹, S.L. Lonskii¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The microstructural features and thermal stability of peroxide-cured binary and ternary blends based on butadiene-nitrile rubber and styrenic thermoplastic elastomers (BNR–TPE) have been investigated. As a result of comprehensive microstructural and thermal analysis of these blends comprising butadiene-nitrile rubber grade BNKS-40AMN and styrenic block copolymers (SBS-R, SEBS) vulcanized with an organic peroxide the principal factors determining their morphological evolution and thermostability were established.

Keywords: binary blends, ternary blends, thermoplastic elastomers, butadiene-nitrile rubber, morphology, microstructure, solubility parameter, thermo-oxidative aging

For citation: Pushnitsa A.S., Venediktova M.A., Kurshev E.V., Lonskii S.L. Comparative analysis of morphology and thermal oxidative stability of binary and ternary BNR–TPE blends cured with peroxide. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 90–102. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-90-102.

Введение

В современных условиях развития авиационной, нефтегазовой и автомобильной промышленности наблюдается устойчивая тенденция к ужесточению требований к эксплуатационным характеристикам эластомерных материалов. В связи с этим особую значимость приобретает необходимость разработки материалов, способных сохранять комплекс физико-механических свойств в широком интервале температур (от -60 до более $+100$ °C) и обладающих стойкостью к агрессивным (углеводородным) средам [1–6].

Наибольший интерес в качестве основы таких материалов представляют бутадиен-нитрильные каучуки (БНК), востребованные в резиновой промышленности благодаря доступности и уникальному сочетанию высокой масло-, бензо- и теплостойкости, обеспечиваемой высоким содержанием полярных нитрильных групп в макромолекулярной цепи [7]. Однако высокая полярность БНК ограничивает их применение в резинотехнических изделиях, работоспособных в условиях низких температур, а также усложняет совмещение с морозостойкими, чаще неполярными полимерами из-за термодинамической несовместимости [4, 8, 9].

Согласно работам [10, 11] и теории Флори–Хаггинса, основная причина несовместимости большинства полимеров заключается в значительном различии параметров растворимости Гильдебранда ($\Delta\delta$) и ограниченной энтропии смешения. Однако в работах [12, 13] отмечено, что формирование полимерных смесей может происходить в условиях отсутствия термодинамической совместимости. В этом случае поверхностные силы и тепловое движение искажают границу раздела, формируя переходный (межфазный) слой с взаимным проникновением сегментов полимеров, что и определяет явление сегментальной вынужденной совместимости [13–15]. Дальнейшим развитием представлений о межфазных явлениях стала теоретическая модель, описывающая состояние межфазной области термодинамически несовместимых полимеров на основе постулата о стремлении межмолекулярных сил разделить молекулы, исключая разрыв сплошной среды [16]. В работах [17, 18] показано, что в полимерных смесях с ограниченной совместимостью возможно образование взаимопроникающих или полувзаимопроникающих полимерных сеток [19].

Разработка эластомерных материалов, сочетающих стойкость к агрессивным средам и низкотемпературную эластичность, является актуальным направлением, требующим решения компромиссных задач. В настоящее время эффективным методом для достижения такого баланса свойств, в частности для повышения морозостойкости резин на основе полярных каучуков, является создание смесевых композиций, состоящих из полимеров с различной полярностью.

Особый интерес в этом направлении вызывает введение в смесевые композиции термоэластопластов (ТЭП) в качестве неполярных морозостойких полимеров. Как следует из классических представлений, трехблочные стирольные ТЭП состоят из эластомерного (алифатического) среднего блока и жестких стирольных концевых блоков [16, 20]. При температурах ниже температуры стеклования (T_g) стирольных блоков ТЭП проявляют свойства резин, а при нагревании выше T_g приобретают текучесть, свойственную термопластичным полимерам. Данное явление обусловлено образованием доменной структуры, в которой стирольные блоки являются полифункциональными узлами пространственной физической сетки, действуя аналогично мелкодисперсным активным наполнителям [11, 21, 22].

Важно отметить, что создание эластомерного материала с уникальными свойствами, которыми обладают БНК и стирольные ТЭП, представляет большой научно-практический интерес. Однако рецептурно-технологические особенности их совмещения

остаются недостаточно изученными, поскольку эффективность такого совмещения определяется характером межфазного взаимодействия. Для решения этой задачи необходимо проведение комплексных микроструктурных исследований.

Наряду с макроскопическими структурными особенностями значительный вклад в формирование конечных свойств смесевых композиций вносят межмолекулярные силы. В случае БНК с высоким содержанием полярных групп в результате диполь-дипольных взаимодействий между нитрильными группами возникают локальные электрические поля, способные упорядочивать макромолекулы в межфазном слое [23–25].

Для смесей, содержащих стирольные блок-сополимеры, эффективна вулканизация органическими пероксидами, что особенно важно для повышения упруго-деформационных характеристик эластомерных материалов [7, 25]. Использование пероксидных систем вулканизации позволяет инициировать радикальные реакции с образованием ковалентных (C–C) и полярных ковалентных (C–O–C) связей как в БНК, так и в ТЭП.

Цель работы – исследование микроструктурных особенностей бинарных и тройных смесей на основе БНК–ТЭП, вулканизованных органическим пероксидом, в том числе в условиях термоокислительного старения, а также изучение влияния пероксидной вулканизации на структуру и свойства несовместимых полимеров.

Материалы и методы

Исследованы вулканизаты на основе полярного каучука марки БНКС-40АМН. Вторым полимерным компонентом являлись стирольные ТЭП: стирол-бутадиен-стирольный (СБС-Р) и гидрированный стирол-этилен-бутен-стирольный (СЭБС) блок-сополимеры разветвленного и линейного строения соответственно. Содержание ТЭП (20 мас. ч. на 80 мас. ч. БНК) выбрано оптимальным на основании ранее проведенных исследований [26]. В качестве вулканизирующего агента использовали органический пероксид 1,4-ди-трет(бутилпероксиизопротил)бензол в количестве 5,0 мас. ч. [27]. Соотношения полимеров в исследованных композициях представлены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношение полимерных компонентов в смесевых композициях

Компонент	Содержание компонентов, мас. ч., в смесевых композициях			
	Б-20	Э-20	ЭБ-2	П (контроль)
Каучук БНКС-40АМН	80,0	80,0	80,0	100,0
Термоэластопласт СБС-Р	20,0	–	10,0	–
Термоэластопласт СЭБС	–	20,0	10,0	–

Смесевые композиции готовили путем смешения каучука и ТЭП в смесителе закрытого типа при температуре 120 ± 7 °С в течение 3–5 мин. Затем смесь охлаждали до температуры 90 ± 3 °С и вводили вулканизирующую систему. После этого смесь выгружали и вальцевали на лабораторных вальцах для формирования заготовок толщиной $2,0 \pm 0,2$ мм. Вулканизацию проводили в гидравлическом прессе при температуре 170 °С в течение 15 мин.

Для проведения микроструктурного анализа и оценки термостабильности бинарных и тройных смесей на основе БНК–ТЭП рассчитан параметр растворимости Гильдебранда и экспериментально определена температура стеклования смесевых вулканизатов.

Параметр растворимости Гильдебранда (δ) рассчитывали методами Смолла и Ван Кревелена на основе аддитивного вклада функциональных групп с использованием подхода, реализованного при вычислении плотности упаковки соединений [28]:

$$\delta = \rho \left(\varphi_1 \frac{\sum F_1}{M_1} + \varphi_2 \frac{\sum F_2}{M_2} + \varphi_3 \frac{\sum F_3}{M_3} + \dots + \varphi_i \frac{\sum F_i}{M_i} \right),$$

где ρ – плотность полимера; M_i – молярная масса повторяющегося звена; $\sum F_i$ – сумма констант молекулярного притяжения в i -й функциональной группе или мономерном звене; φ_i – доля i -й функциональной группы или мономерного звена в структуре молекулы.

Термический анализ методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) проводили в инертной среде азота в интервале температур от -100 до $+20$ °С, скорость потока газа составила 70 мл/мин. Исследованы образцы массой 8–12 мг. Температуру стеклования T_g определяли как температуру начала ступенчатого перехода на кривых ДСК в соответствии с ГОСТ Р 55135–2012.

Из полученных вулканизатов изготовлены низкотемпературные сколы в жидком азоте, которые приклеивали с помощью токопроводящего клея на основе углерода к держателям образцов и сушили на воздухе. После высыхания поверхности сколы подвергали ионно-плазменному травлению в вакуумной установке. Для предотвращения накопления электрического заряда при исследовании полимеров в сканирующем электронном микроскопе на поверхности образцов наносили тонкое проводящее покрытие методом магнетронного распыления в специализированной установке. Исследования проводили в режиме вторичных электронов при увеличениях $\times 10000$ и $\times 30000$ [29–31].

Подход, основанный на применении низкотемпературных сколов, рекомендован в работах [32–35] как наиболее информативный для изучения фазовой морфологии полимеров. Авторы показали, что при такой подготовке происходит хрупкое разрушение материала, без пластических деформаций, что позволяет сохранить исходную топологию фаз. Исследования, проведенные в данной работе, полностью согласуются с этим принципом.

Термоокислительное старение проводили при температуре 100 ± 2 °С в течение 72 ч на воздухе в соответствии с ГОСТ 9.024–74.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Для прогнозирования характера межфазного взаимодействия выполнен расчет параметра растворимости δ методами Смолла и Ван Кревелена. Данные для индивидуальных полимеров представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетный параметр растворимости каучука и термоэластопластов

Полимер	Параметр растворимости δ , $\sqrt{\text{кал/см}^3}$, рассчитанный методами	
	Смолла	Ван Кревелена
Каучук БНКС-40АМН	10,92	10,37
Термоэластопласт СБС-Р	8,38	8,48
Термоэластопласт СЭБС	8,41	8,35

Разность рассчитанных параметров растворимости ($\Delta\delta$) БНК и ТЭП составляет $1,9\text{--}2,5 \sqrt{\text{кал/см}^3}$, что существенно превышает эмпирический критерий взаимной растворимости ($\Delta\delta < 0,5\text{--}1,0 \sqrt{\text{кал/см}^3}$). Полученные результаты подтверждают термодинамическую несовместимость полимерных компонентов и указывают на неизбежность микрофазового разделения.

Однако, как предполагается, пероксидная вулканизация способствует образованию ковалентных связей в переходном слое. С целью подтверждения данного предположения определена температура стеклования методом ДСК, позволяющая оценить

степень участия пероксидной вулканизации в формировании микроструктуры смесевых вулканизатов. Для исследованных смесевых вулканизатов получены следующие значения T_c , определенные по точке перегиба на ДСК-кривых, °С:

Б-20	Э-20	ЭБ-2	П
-28,4	-29,6	-27,1	-22,3

Для всех вулканизатов в интервале температур от -100 до $+20$ °С зафиксировано одно значение T_c со сдвигом в область более низких температур по сравнению с контрольным образцом (П). Данный эффект, вероятно, объясняется образованием единой пространственной сетки в процессе вулканизации. В момент разложения 1,4-ди(третбутилпероксиизопропил)бензола при температуре вулканизации 170 ± 2 °С образуются свободные радикалы, которые реагируют с двойными связями БНК, а также реакционноспособными центрами в бутадиеновых блоках ТЭП СБС-Р и гидрированных блоках ТЭП СЭБС. Предположительно, в межфазной области формируется единая пространственная сетка посредством совулканизации, в которой эластомерные блоки ТЭП ковалентно (через связи С–С и С–О–С при участии кислорода воздуха) встраиваются в структуру вулканизата БНК.

В процессе совулканизации с БНК снижается энергетический барьер, что облегчает конформационную подвижность сегментов эластомерной матрицы, приводя к снижению значений T_c (до $-29,6$ °С для композиции Э-20). Кроме того, температура вулканизации значительно превышает значение T_c стирольных блоков, что обеспечивает их высокую сегментальную подвижность в момент образования радикалов и способствует эффективной совулканизации в межфазной области. Для оценки влияния совулканизации проведен сравнительный анализ микроструктуры низкотемпературных сколов ненаполненных вулканизатов бинарных и тройных смесей методом сканирующей электронной микроскопии до и после термоокислительного старения. Результаты представлены на рис. 1–3.

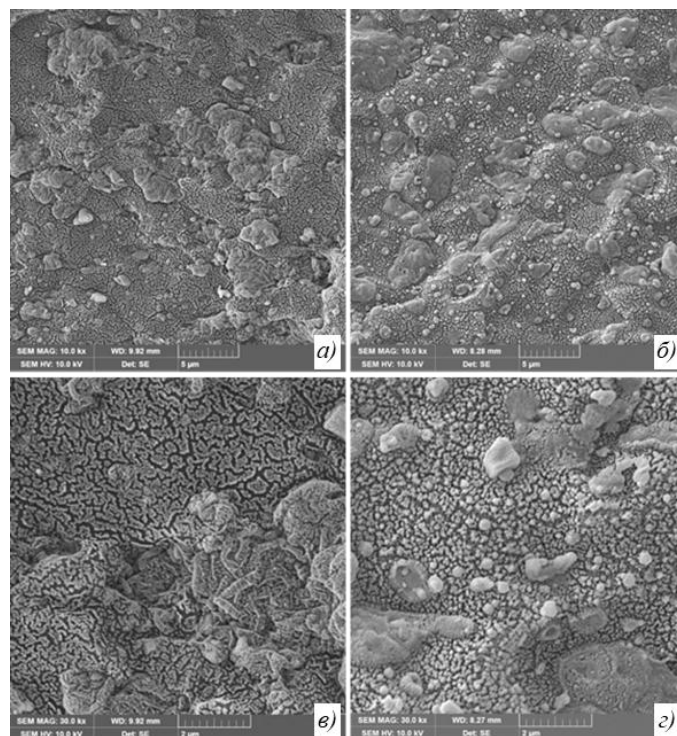


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 10000$ (а, б) и $\times 30000$ (в, г)) низкотемпературного скола образца из смесевой композиции Б-20 до (а, в) и после (б, г) термоокислительного старения при температуре 100 ± 2 °С в течение 72 ч

В бинарной смеси Б-20 до старения (рис. 1, *а, в*) наблюдается двухфазная структура. Каучуковая матрица является непрерывной фазой, а фаза ТЭП СБС-Р диспергирована в виде равномерных включений размером 2–5 мкм, имеющих округлую или слегка вытянутую форму. Отмечается тенденция к образованию взаимопроникающей фазовой структуры, в которой обе фазы занимают значительные объемы, однако четкое разделение на дисперсную и непрерывную фазы не всегда возможно [16, 18, 19].

В процессе термоокислительного старения происходит потеря дисперсности фазы ТЭП СБС-Р за счет укрупнения стирольных доменов (рис. 1, *б, г*). Исходные включения размером 2–5 мкм начинают сливаться, образуя агломераты, размер которых превышает исходные значения в 1,5–2 раза. Это связано с тем, что полибутадиеновый блок ТЭП СБС-Р содержит двойные связи, которые при температуре 100 °С активно вступают в радикальные реакции с кислородом. Процессы деструкции преобладают над структурированием, что приводит к разрыву первоначально образованных межфазных связей. Важно отметить, что, несмотря на частичное разрушение связей С–С, первоначально созданные ковалентные связи на границе фаз каучука БНКС-40АМН и ТЭП СБС-Р продолжают удерживать частицы ТЭП, однако их удерживающая способность снижается по мере накопления продуктов окисления. Наблюдаемая картина согласуется с концепцией композиционной неоднородности БНК, предложенной в работе [7], и иллюстрирует отсутствие эффекта «саморегулирования» структуры в бинарной системе с негидрированным ТЭП, в отличие от тройных композиций, где этот эффект проявляется за счет стабилизации межфазного слоя продуктов окисления ТЭП СБС-Р.

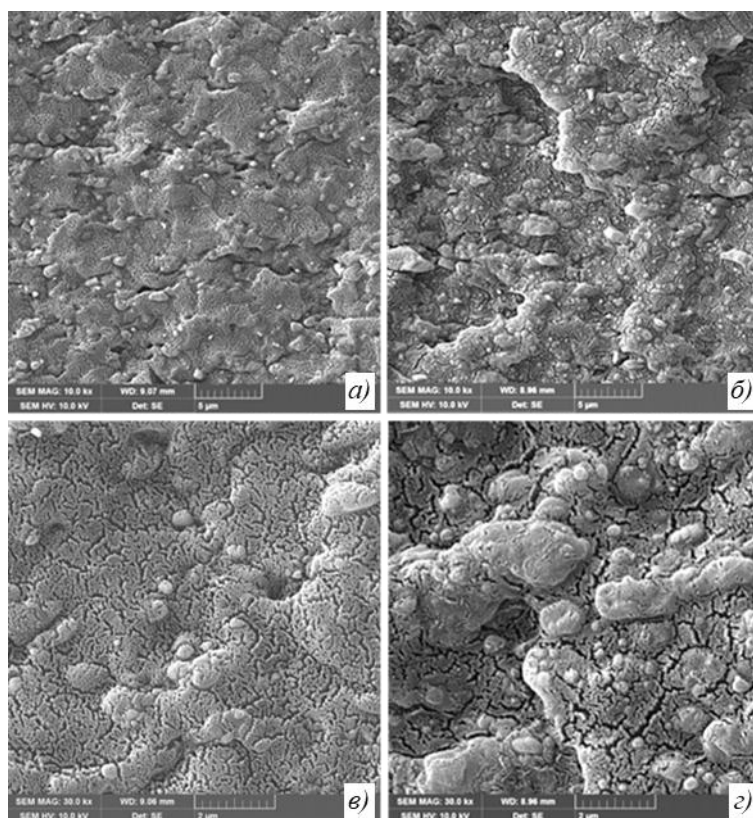


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 10000$ (*а, б*) и $\times 30000$ (*в, г*)) низкотемпературного скола образца из смеси композиции Э-20 до (*а, в*) и после (*б, г*) термоокислительного старения при температуре 100 ± 2 °С в течение 72 ч

Исходная морфология бинарной смеси Э-20 (рис. 2, *а, в*) демонстрирует более регулярное диспергирование ТЭП СЭБС по сравнению с ТЭП СБС-Р. Фаза ТЭП СЭБС представлена включениями размером от 2 до 5 мкм, что свидетельствует о лучшей технологической совместимости ТЭП СЭБС с каучуком БНКС-40АМН в процессе смешения в расплаве [20, 21]. Средний блок ТЭП СЭБС обладает иной растворимостью и поверхностным натяжением по сравнению с бутадиеновым блоком ТЭП СБС-Р, что способствует образованию более регулярной морфологии [15, 36].

После старения (рис. 2, *б, г*) морфология практически не изменяется: отсутствуют явная агрегация и разрывы на границе фаз. Это объясняется тем, что ТЭП СЭБС не содержит двойных связей. Вместо деструкции пероксидные радикалы инициируют структурирование с образованием новых связей С–С и С–О–С между сегментами ТЭП СЭБС и БНК [20]. Это обеспечивает термическую стабильность смеси Э-20, что подтверждается увеличением прочности при растяжении после старения [26].

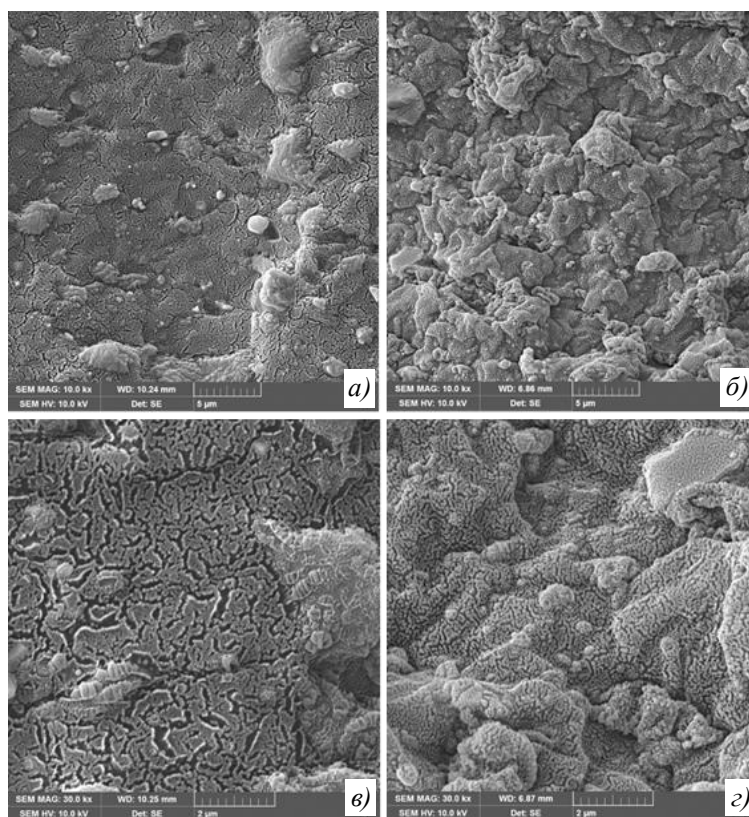


Рис. 3. Микроструктуры ($\times 10000$ (*а, б*) и $\times 30000$ (*в, г*)) низкотемпературного скола образца из смеси композиции ЭБ-2 до (*а, в*) и после (*б, г*) термоокислительного старения при температуре 100 ± 2 °C в течение 72 ч

В тройной смеси ЭБ-2 (рис. 3, *а, в*) наблюдается наиболее сложная морфология: дисперсная фаза ТЭП является неоднородной и представлена двумя типами включений. Крупные включения ТЭП СБС-Р имеют размеры 3–5 мкм и характеризуются вытянутой, слегка неровной формой, что связано с более высокой вязкостью и склонностью к агрегации. Мелкие включения ТЭП СЭБС имеют размеры < 2 мкм и правильную округлую форму, что свидетельствует о лучшей диспергируемости. Согласно данным научно-технической литературы, в таких системах блок-сополимеры могут выступать в качестве эмульгаторов, однако из-за термодинамической несовместимости всех трех пар этот эффект до старения выражен слабо [11, 14, 18].

После старения (рис. 3, б, г) наблюдается не слипание, как в композиции Б-20, а локальное разрыхление и перестройка морфологии. Этот эффект обусловлен конкуренцией двух механизмов: деструкция ТЭП СБС-Р локально разрушает химические связи, при этом продукты деструкции (макромолекулы с концевыми полярными группами, образовавшимися при окислении) не покидают систему, а локализуются на межфазной границе.

Согласно теории, изложенной в работах [12, 13], переходный слой состоит из растворов сегментов одного полимера в другом. В тройной смеси в процессе старения на границе раздела локализуются макромолекулы ТЭП СБС-Р, претерпевшие частичную окислительную деструкцию с образованием полярных кислородсодержащих групп (карбонильных). Эти модифицированные макромолекулы в результате сильного межмолекулярного взаимодействия с нитрильными группами БНК, вероятно, выступают в качестве *in situ* компатибилизаторов, снижая межфазное натяжение.

Предположительно, реализуется механизм капсулирования по типу «ядро–оболочка», где ядро – частицы ТЭП СБС-Р, частично утратившие структуру, а оболочка – стабильные макромолекулы ТЭП СЭБС и сегменты ТЭП СБС-Р, обогащенные полярными группами. За счет этого увеличивается объем переходного слоя, что соответствует модели сегментальной вынужденной совместимости [2, 13, 19] и обеспечивает сохранение целостности тройной смеси.

Таким образом, можно предположить, что в тройных смесевых композициях образуются два типа вулканизационных сеток: физическая, сформированная стирольными блоками ТЭП, и химическая (пространственно-сшитая), состоящая из ковалентных связей С–С и С–О–С. В физической сетке стирольные домены, выступая в качестве наполнителя, могут агломерировать, стремясь к снижению свободной энергии за счет уменьшения площади межфазной поверхности. Химическая сетка, в свою очередь, пронизывает обе фазы, удерживая макромолекулы каучука и ТЭП в межфазном слое, что подтверждается одним значением T_c в области низких температур. Высокая полярность каучука БНКС-40АМН создает электростатическое поле, усиливающее межмолекулярное взаимодействие с образовавшимися карбонильными группами в сегментах ТЭП в межфазном слое, формируя стабильный межфазный слой. В сочетании с химическими связями это создает армирующий эффект на границе раздела, недостижимый в классических неполярных смесях.

Согласно теоретическим представлениям о термоокислительном старении полимерных материалов, одновременно протекают два конкурирующих процесса – деструкция и структурирование полимеров [13, 36]. При этом на начальных стадиях окисления атаке подвергаются углерод-углеродные связи в ненасыщенных фрагментах (например, в полибутадиеновых блоках ТЭП СБС-Р), тогда как насыщенные полимеры (ТЭП СЭБС) более устойчивы к окислению [8, 13, 15, 36].

Сравнительный анализ двух типов ТЭП показывает, что гидрированные аналоги (СЭБС) обладают значительно большей стойкостью к окислению, ультрафиолетовому излучению и озону. Это объясняется отсутствием двойных связей в основной цепи, что делает их менее подверженными термоокислительной деструкции.

Заключения

В результате комплексных микроструктурных и термических исследований бинарных и тройных смесей на основе каучука БНКС-40АМН и ТЭП СБС-Р, СЭБС, вулканизованных органическим пероксидом, установлены ключевые закономерности, определяющие их морфологию и термостабильность.

Показано, что, несмотря на термодинамическую несовместимость компонентов, подтвержденную значениями $\Delta\delta > 1,9 \sqrt{\text{кал/см}^3}$, пероксидная вулканизация обеспечивает формирование единой гибридной пространственной сетки. Экспериментальным подтверждением этому служит наличие единственного значения T_c во всех вулканизатах, сдвинутого в область низких температур (до $-29,6^\circ\text{C}$). Данный эффект достигается за счет ковалентного встраивания эластомерных блоков ТЭП в сетку, что увеличивает свободный объем в матрице БНК и облегчает конформационную подвижность сегментов. Установлено, что природа среднего блока ТЭП в значительной степени определяет устойчивость структуры к термоокислительному старению смесевых вулканизатов. В бинарных системах с ТЭП СБС-Р преобладают процессы термоокислительной деструкции, приводящие к потере дисперсности и агрегации доменов. В бинарных системах с ТЭП СЭБС доминирует структурирование с образованием новых связей С–С и С–О–С, что обеспечивает сохранение тонкой дисперсности и морфологической целостности. В тройных композициях обнаружен эффект *in situ* компатибилизации, обусловленный локализацией полярных продуктов окисления ТЭП СБС-Р в межфазном слое. Кроме того, сохранение единственного значения T_c в тройных системах подтверждает, что даже в условиях старения гибридная сетка остается непрерывной, а эластомерные блоки ТЭП продолжают ковалентно встраиваться в структуру вулканизата БНК.

С практической точки зрения результаты работы подтверждают перспективность использования до 20 мас. ч. ТЭП СЭБС в бинарных смесевых композициях на основе каучука БНК-40АМН, вулканизованных органическим пероксидом, для создания эластомерных материалов с расширенным температурным диапазоном эксплуатации и повышенной термостабильностью. Применение ТЭП СБС-Р в условиях теплового воздействия нецелесообразно из-за необратимых структурных изменений, приводящих к снижению эластичности материала. В связи с неоднозначностью полученных результатов тройные смесевые композиции, несмотря на эффект компатибилизации, требуют дополнительного изучения. Данные о перестройке межфазного слоя на микроуровне свидетельствуют о возможности придания уникальных свойств эластомерным материалам на основе смесей каучука с ТЭП.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Чайкун А.М., Сергеев А.В., Правада Е.С. Эластомерно-тканевые материалы для изделий специальной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). С. 25–37. URL: <https://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.08.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-25-37.
3. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <https://www.journal.ru> (дата обращения: 05.08.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Вахрушева Я.А., Юмашев О.Б., Чайкун А.М. Современные тенденции в области морозостойких резин на основе полярных и неполярных каучуков (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). С. 77–87. URL: <https://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.08.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-77-87.
5. Елисеев О.А., Краснов Л.Л., Зайцева Е.И., Савенкова А.В. Разработка и модифицирование эластомерных материалов для применения во всеклиматических условиях // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 309–314.

6. Правада Е.С., Вахрушева Я.А., Герасимов Д.М., Чайкун А.М. Каучуки для герметизирующих материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). С. 14–26. URL: <https://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.08.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-14-26.
7. Данковцев В.А. Композиционная неоднородность бутадиен-нитрильных каучуков и способы уменьшения ее влияния на свойства резин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1999. С. 20.
8. Budrugaec P. Accelerated thermal aging of NBR and other materials under air or oxygen pressures // Die Angewandte Makromolekulare Chemie: Applied Macromolecular Chemistry and Physics. 1997. Vol. 247. No. 1. P. 19–30.
9. Mostafa A., Abouel-Kasem A., Bayoumi M.R., El-Sebaie M.G. The influence of CB loading on thermal aging resistance of SBR and NBR rubber compounds under different aging temperature // Materials & Design. 2009. Vol. 30. No. 3. P. 791–795.
10. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Научный мир, 2007. С. 348.
11. Лебедев Е.В. Физико-химия многокомпонентных полимерных систем: в 2 т. Киев: Наукова думка, 1986. Т. 2. С. 46.
12. Кулезнев В.Н., Крохина Л.С. Структура и свойства смесей полимеров в растворе // Успехи химии. 1973. Т. 42. № 7. С. 1278–1309.
13. Кулезнев В.Н., Кандырин Л.Б. Смеси олигомеров: реология, структура, свойства // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2008. Т. 50. № 7. С. 1180–1190.
14. Кахраманлы Ю.Н. Несовместимые полимерные смеси и композиционные материалы на их основе. Баку: Элм, 2013. С. 13.
15. Robeson L. Historical perspective of advances in the science and technology of polymer blends // Polymers. 2014. Vol. 6. No. 5. P. 1251–1265.
16. Helfand E., Tagami Y. Theory of the interface between immiscible polymers // Journal of chemical physics. 1972. Vol. 57. No. 4. P. 1812–1822. DOI: 10.1063/1.1678379.
17. Липатов Ю.С., Сергеева Л.М. Взаимопроникающие полимерные сетки. Киев: Наукова думка, 1979. 128 с.
18. Алексеенко В.И. К вопросу о совместимости полимеров // Высокомолекулярные соединения. 1960. Т. 2. № 10. С. 1449–1455.
19. Полимерные смеси: в 2 т. Пер. с англ. под ред. Д. Пола, С. Ньюмена. М.: Мир, 1981. Т. 1. С. 540.
20. Maji P., Naskar K. Styrenic block copolymer-based thermoplastic elastomers in smart applications: Advances in synthesis, microstructure, and structure–property relationships // Journal of Applied Polymer Science. 2022. Vol. 139. No. 39. P. 52942.
21. Ахметов С.Н., Мясоедова В.В., Грачев А.В. Бесхлорные полимерные композиции на основе бутадиен-акрилонитрильного каучука и сополимера стирола // Химическая безопасность. 2020. Т. 4. № 1. С. 183–196.
22. Tian B., Wang W., Liu P., Zhang X. The effects of rubber nanoparticles with different polarities on thermal properties and foaming performance of polypropylene blends // RSC Advances. 2020. Vol. 10. No. 52. P. 31355–31362.
23. Zedler L., Colom X., Canavate J., Formela K. GTR/NBR/silica composites performance properties as a function of curing system: Sulfur versus peroxides // Materials. 2021. Vol. 14. No. 18. P. 5345.
24. Mohammady S.Z., Mansour A.A., Knoll K., Stoll B. Detection of the glass relaxation process of the PS-phase in block copolymers // Polymer. 2002. Vol. 43. No. 8. P. 2467–2478.
25. Ellul M.D., Patel J., Tinker A.J. Crosslink densities and phase morphologies in dynamically vulcanized TPEs // Rubber Chemistry and Technology. 1995. Vol. 68. No. 4. P. 573–582.
26. Пушница А.С., Венедиктова М.А., Большаков В.А., Власов В.В. Влияние стирольных термоэластопластов на структуру и свойства пероксидных вулканизатов бутадиен-нитрильного каучука // Каучук и резина. 2026. Т. 85. № 2. С. 86–93. DOI: 10.47664/0022-9466-2026-85-2-86-93.

27. Soloviev M.E., Pushnitsa A.S., Vlasov V.V. Modeling of Vulcanization Kinetics and Deformation–Strength Properties of Peroxide Vulcanizates of Nitrile–Butadiene Rubbers // *Polymer Science, Series B*. 2024. Vol. 66. No. 6. P. 798–807.
28. Ворончихин В.Д. Научно-практические основы модификации эластомерных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2024. 350 с
29. Куршев Е.В., Лонский С.Л., Деев И.С. Применение метода сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа для исследования неметаллических композиционных материалов // *Мат. VIII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Исследование конструкционных материалов и функциональных покрытий методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, методами рентгеноструктурного и рентгеноспектрального микроанализа»*: в 2 ч. М.: ВИАМ, 2016. Ч. 2. С. 1–13.
30. Wenjing L., Wolfgang B. Imaging of CNTs in a polymer matrix at low accelerating voltages using a SEM // *Carbon*. 2011. Vol. 49 (12). P. 3891–3898. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.04.017.
31. Butler H.J., Joy D.C., Bradley G.F., Krause S.J. Low-voltage scanning electron microscopy of polymers // *Polymer*. 1995. Vol. 36 (9). P. 1781–1790. DOI: 10.1016/0032-3869(94)00373-V.
32. Шитов Р.О., Китаева Н.С., Ширякина Ю.М., Куршев Е.В. Исследование влияния модифицирующих добавок различной природы на термоокислительную устойчивость модельного кремнийорганического связующего // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). С. 19–28. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-19-28.
33. Ткачук А.И., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Любимова А.С. Модификация эпоксидных связующих многостенными углеродными нанотрубками // *Труды ВИАМ*. 2023. № 2 (120). С. 63–76. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.08.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-63-76.
34. Деев И.С., Кобец Л.П. Структурообразование в наполненных термореактивных полимерах // *Коллоидный журнал*. 1999. Т. 61. № 5. С. 650–660.
35. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных полимеров и композитных материалов на их основе // *Материаловедение*. 2010. № 5. С. 8–16.
36. Grassie N., Heaney A. Thermal degradation of polybutadiene // *Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition*. 1974. Vol. 12. No. 2. P. 89–94.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New-Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. Chaykun A.M., Sergeyev A.V., Pravada E.S. Elastomeric-fabric materials for products of special equipment (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), pp. 25–37. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 04, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-25-37.
3. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 05, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Vahrusheva Ja.A., Yumashev O.B., Chaikun A.M. The basic principles of creation of formula cold-resistant rubbers stock for the products maintained in the conditions of the arctic climate (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), pp. 77–97. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-77-87.
5. Eliseev O.A., Krasnov L.L., Zajceva E.I., Savenkova A.V. Development and modifying of elastomeric materials for application in all weather conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 309–314.
6. Pravada E.S., Vahrusheva Ya.A., Gerasimov D.M., Chaikun A.M. Rubber-based sealants (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), pp. 14–26. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-14-26.

7. Dankovtsev V.A. *Compositional heterogeneity of butadiene-nitrile rubbers and methods for reducing its effect on rubber properties*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Voronezh, 1999, p. 20.
8. Budrugaec P. Accelerated thermal aging of NBR and other materials under air or oxygen pressures. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie: Applied Macromolecular Chemistry and Physics*, 1997, vol. 247, no. 1, pp. 19–30.
9. Mostafa A., Abouel-Kasem A., Bayoumi M.R., El-Sebaie M.G. The influence of CB loading on thermal aging resistance of SBR and NBR rubber compounds under different aging temperature. *Materials & Design*, 2009, vol. 30, no. 3, pp. 791–795.
10. Tager A.A. *Physical Chemistry of Polymers*. 4th ed., rev. and add. Moscow: Nauchnyi Mir, 2007, p. 348.
11. Lebedev E.V. *Physical Chemistry of Multicomponent Polymer Systems*: in 2 vols. Kyiv: Naukova Dumka, 1986, vol. 2, p. 46.
12. Kuleznev V.N., Krokhnina L.S. Structure and properties of polymer blends in solution. *Uspekhi khimii*, 1973, vol. 42, no. 7, pp. 1278–1309.
13. Kuleznev V.N., Kandyrin L.B. Oligomer blends: rheology, structure, properties. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya*, 2008, vol. 50, no. 7, pp. 1180–1190.
14. Kakhramanly Yu.N. *Incompatible Polymer Blends and Composite Materials Based on Them*. Baku: Elm, 2013, p. 13.
15. Robeson L. Historical perspective of advances in the science and technology of polymer blends. *Polymers*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 1251–1265.
16. Helfand E., Tagami Y. Theory of the interface between immiscible polymers. *Journal of chemical physics*, 1972, vol. 57, no. 4, pp. 1812–1822. DOI: 10.1063/1.1678379.
17. Lipatov Yu.S., Sergeeva L.M. *Interpenetrating Polymer Networks*. Kyiv: Naukova Dumka, 1979, 128 p.
18. Alekseenko V.I. On the question of polymer compatibility. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya*, 1960, vol. 2, no. 10, pp. 1449–1455.
19. *Polymer Blends*: in 2 vols. Trans. from Engl. Ed. D. Paul and S. Newman. Moscow: Mir, 1981, vol. 1, p. 540.
20. Maji P., Naskar K. Styrenic block copolymer-based thermoplastic elastomers in smart applications: Advances in synthesis, microstructure, and structure–property relationships. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, vol. 139, no. 39, p. 52942.
21. Akhmetov S.N., Myasoedova V.V., Grachev A.V. Chlorine-free polymer compositions based on butadiene-acrylonitrile rubber and styrene copolymer. *Khimicheskaya bezopasnost*, 2020, vol. 4, no. 1, pp. 183–196.
22. Tian B., Wang W., Liu P., Zhang X. The effects of rubber nanoparticles with different polarities on thermal properties and foaming performance of polypropylene blends. *RSC Advances*, 2020, vol. 10, no. 52, pp. 31355–31362.
23. Zedler L., Colom X., Canavate J., Formela K. GTR/NBR/silica composites performance properties as a function of curing system: Sulfur versus peroxides. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 18, p. 5345.
24. Mohammady S.Z., Mansour A.A., Knoll K., Stoll B. Detection of the glass relaxation process of the PS-phase in block copolymers. *Polymer*, 2002, vol. 43, no. 8, pp. 2467–2478.
25. Ellul M.D., Patel J., Tinker A.J. Crosslink densities and phase morphologies in dynamically vulcanized TPEs. *Rubber Chemistry and Technology*, 1995, vol. 68, no. 4, pp. 573–582.
26. Pushnitsa A.S., Venediktova M.A., Bolshakov V.A., Vlasov V.V. The influence of styrene thermoplastic elastomers on the structure and properties of peroxide vulcanizates of nitrile butadiene rubber. *Kauchuk i rezina*, 2026, vol. 85, no. 2, pp. 86–93. DOI: 10.47664/0022-9466-2026-85-2-86-93.
27. Soloviev M.E., Pushnitsa A.S., Vlasov V.V. Modeling of Vulcanization Kinetics and Deformation–Strength Properties of Peroxide Vulcanizates of Nitrile–Butadiene Rubbers. *Polymer Science, Series B*, 2024, vol. 66, no. 6, pp. 798–807.
28. Voronchikhin V.D. *Scientific and practical foundations for the modification of elastomeric materials*: thesis, Dr Sc. (Tech.). Voronezh, 2024, 350 p.

29. Kurshev E.V., Lonsky S.L., Deev I.S. Application of scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis for the investigation of non-metallic composite materials. *Proc. VIII All-Rus. Conf. on Testing and Investigation of Material Properties «TestMat» on Theme «Investigation of structural materials and functional coatings using optical, scanning, and transmission electron microscopy, as well as X-ray diffraction and X-ray spectral microanalysis methods»*: in 2 parts. Moscow: VIAM, 2016, part 2, pp. 1–13.
30. Wenjing L., Wolfgang B. Imaging of CNTs in a polymer matrix at low accelerating voltages using a SEM. *Carbon*, 2011, vol. 49 (12), pp. 3891–3898. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.04.017.
31. Butler H.J., Joy D.C., Bradley G.F., Krause S.J. Low-voltage scanning electron microscopy of polymers. *Polymer*, 1995, vol. 36 (9), pp. 1781–1790. DOI: 10.1016/0032-3869(94)00373-V.
32. Shitov R.O., Kitaeva N.S., Shiryakina Yu.M., Kurshev E.V. Research of influence of modifiers of varied nature on the thermo-oxidative stability of a model silicone binder. *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), pp. 19–28. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-19-28.
33. Tkachuk A.I., Kurshev E.V., Lonskii S.L., Lyubimova A.S. Modification of epoxy binders with multi-walled carbon nanotubes. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), pp. 63–76. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 04, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-63-76.
34. Deev I.S., Kobets L.P. Structure formation in filled thermosetting polymers. *Kolloidnyy zhurnal*, 1999, vol. 61, no. 5, pp. 650–660.
35. Deev I.S., Kobets L.P. Investigation of the microstructure and fracture characteristics of epoxy polymers and composite materials based on them. *Materialovedenie*, 2010, no. 5, pp. 8–16.
36. Grassie N., Heaney A. Thermal degradation of polybutadiene. *Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition*, 1974, vol. 12, no. 2, pp. 89–94.

Информация об авторах

Пушница Анна Сергеевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Венедиктова Мария Анатольевна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куршев Евгений Васильевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лонский Станислав Леонардович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anna S. Pushnitsa, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria A. Venediktova, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeniy V. Kurshev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav L. Lonskii, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.10.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.10.2026.
The article was submitted 01.10.2026; approved and accepted for publication after reviewing 08.10.2026.