Радиационная и терморадиационная сшивка эластомерных композитов: формирование структуры и управление свойствами

Э. Н. Ахмедов[a,*], С. В. Рзаева[a], Г. М. Керимли[b]

[a]*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, 1010, Азербайджан*
[b]*Университет Игдира, г. Игдир, 76000, Турция*
[*]*e-mail: sona.rzayeva@asoiu.edu.az*

Поступила в редакцию 06.02.2026
После доработки 30.04.2026
Принята к публикации 24.05.2026

Исследовано влияние дозы γ-облучения, волокнистого армирования и сенсибилизирующих добавок на формирование пространственной сетки и эксплуатационные характеристики эластомерных композитов на основе натурального каучука и смесей типа SEP–BNR. Показано, что увеличение дозы облучения приводит к росту гель-фракции и плотности сшивки, сопровождающемуся повышением жесткости, прочности и вязкости по Муни при одновременном снижении пластичности. Армирование углеродными волокнами и применение сенсибилизаторов повышают эффективность сшивки и термическую устойчивость материалов. Установлены оптимальные режимы радиационной обработки, обеспечивающие рациональное сочетание прочностных и деформационных свойств композитов. Полученные результаты подтверждают возможность целенаправленного управления структурой и свойствами эластомерных материалов методами радиационной модификации.

Ключевые слова: радиационная вулканизация, терморадиационная обработка, эластомеры, γ-облучение, гель-фракция, плотность сшивки, вязкость по Муни, углеродные волокна, композиты

УДК 678.4:539.12.04:620.17
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.3.01

ВВЕДЕНИЕ

Радиационная обработка полимерных материалов в последние десятилетия рассматривается как эффективный физический метод направленного изменения их структуры и эксплуатационных характеристик [1]. В отличие от традиционных химических способов вулканизации, основанных на использовании серных или пероксидных систем, ионизирующее излучение обеспечивает инициирование процессов сшивки непосредственно в объеме материала без введения значительного количества низкомолекулярных реагентов и побочных продуктов. Это позволяет получать более однородную пространственную сетку, повышать чистоту материала и реализовывать тонкую регулировку физико-механических свойств за счет изменения дозы облучения и состава композиции [2–4].

Известно, что под действием γ-излучения в макромолекулах эластомеров происходят радиолиз и образование активных радикалов, которые инициируют реакции межмолекулярного сшивания, разветвления или деструкции цепей. Соотношение этих процессов определяется химической природой полимера, присутствием наполнителей, сенсибилизаторов, температурой и величиной поглощенной дозы. Для гибкоцепных каучуков, таких как натуральный каучук и сополимеры на основе этиленпропиленовых и бутадиен-нитрильных систем, доминирующим процессом, как правило, является радиационно-индуцированная сшивка, сопровождающаяся ростом плотности пространственной сетки, увеличением модуля упругости, твердости и термостойкости [5].

Особый интерес представляет применение радиационной и терморадиационной вулканизации для получения эластомерных композиционных материалов [6–9]. Введение волокнистых и дисперсных наполнителей, в частности углеродных волокон, способствует повышению жесткости, прочности и теплостойкости, а также влияет на процессы формирования межфазной границы и распределение напряжений в матрице. В то же время использование сенсибилизаторов и ускорителей сшивки (например, производных малеимида) позволяет интенсифицировать образование радикалов, снижать требуемую дозу излучения и обеспечивать более равномерное формирование сетчатой структуры. Однако комплексное влияние этих факторов на взаимосвязь «структура–свойства» остается недостаточно изученным.

Анализ литературных данных показывает, что большинство работ посвящено либо исследованию отдельных каучуковых систем, либо изучению только механических характеристик без детального рассмотрения параметров пространственной сетки, таких как гель-фракция, степень набухания и плотность сшивки. В то же время для практического применения эластомерных материалов важно одновременное понимание реологических, механических, термических и структурных изменений, происходящих при радиационном воздействии. Недостаточно освещенным остается также вопрос сопоставления различных подходов к радиационной модификации – прямого γ-облучения наполненных натуральных каучуков и терморадиационной вулканизации синтетических эластомерных смесей с использованием сенсибилизаторов и ускорителей.

В связи с этим актуальной задачей является систематическое исследование закономерностей формирования структуры и эксплуатационных свойств эластомерных композитов при радиационной и терморадиационной обработке, а также выявление роли дозы излучения, наполнителей и химических добавок в процессах сшивки.

Целью настоящей работы является установление взаимосвязи между дозой γ-облучения, параметрами пространственной сетки и физико-механическими характеристиками эластомерных композитов на основе натурального каучука, армированного короткими углеродными волокнами, и терморадиационно-вулканизованных систем типа SEP–BNR, содержащих сенсибилизаторы и малеимидные ускорители. Для достижения поставленной цели проведен комплексный анализ механических, реологических, термических и морфологических свойств, а также определены гель-фракция и плотность сшивки, что позволило выявить оптимальные режимы радиационной обработки и обосновать механизмы модификации структуры исследуемых материалов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Несмотря на широкое применение радиационной и терморадиационной обработки для модификации эластомерных материалов, вопросы формирования пространственной структуры и ее влияния на комплекс физико-механических и реологических свойств остаются недостаточно изученными. В литературе, как правило, рассматриваются отдельные аспекты радиационной сшивки – либо механические характеристики вулканизатов, либо изменения химической структуры и степени сшивания [9, 10]. При этом отсутствует комплексный анализ взаимосвязи между дозой γ-облучения, параметрами сетчатой структуры (гель-фракция, плотность сшивки, степень набухания), реологическими характеристиками и эксплуатационными свойствами эластомерных композитов.

Кроме того, требует уточнения влияние различных факторов модификации, таких как армирование углеродными волокнами, применение сенсибилизаторов и малеимидных ускорителей, а также использование терморадиационных режимов вулканизации, на процессы образования поперечных связей и формирование межфазной границы «матрица–наполнитель». Недостаточно исследованы также оптимальные диапазоны доз облучения, обеспечивающие рациональное сочетание прочностных и эластических характеристик без развития радиационной деструкции материала [1, 5].

В связи с этим возникает необходимость систематического сопоставительного исследования различных эластомерных систем, модифицируемых γ-излучением, с целью выявления общих закономерностей формирования структуры и установления корреляции между параметрами пространственной сетки и эксплуатационными свойствами.

Целью работы является установление закономерностей формирования структуры и свойств радиационно- и терморадиационно-модифицированных эластомерных композитов и определение влияния дозы γ-облучения, волокнистого наполнения и сенсибилизирующих добавок на их механические, реологические и термические характеристики [7, 8].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– исследовать влияние дозы γ-облучения на гель-фракцию, степень набухания и плотность сшивки эластомерных систем;

– определить изменения механических характеристик (прочность при растяжении, модуль упругости, твердость, относительное удлинение, пластичность) в зависимости от условий обработки;

– изучить реологические свойства материалов (вязкость по Муни) как индикатор формирования пространственной сетки;

– оценить влияние армирования короткими углеродными волокнами и введения сенсибилизаторов и малеимидных ускорителей на эффективность радиационной сшивки;

– исследовать термическую устойчивость и морфологические особенности композитов методами термогравиметрического анализа и микроструктурных исследований;

– установить оптимальные режимы радиационной и терморадиационной обработки, обеспечивающие требуемое сочетание прочности и эластичности материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве эластомерных матриц использовали два типа каучуковых систем.

Первая система представляла собой композиции на основе натурального каучука (NR) марки SMR-20. В качестве армирующего наполнителя применяли короткие углеродные волокна длиной около 4 мм. Для вулканизации использовали традиционную серную систему, включающую оксид цинка, стеариновую кислоту, тетраметилтиурамдисульфид (TMTD), 2-меркаптобензотиазол (MBT), серу и антиоксидант. Содержание углеродных волокон варьировали в диапазоне 0–20 phr (частей на 100 частей каучука).

Вторая система представляла собой смеси на основе сополимера типа SEP–BNR (этилен-пропилен-бутадиен-нитрильный каучук), предназначенные для терморадиационной вулканизации. В качестве сенсибилизатора использовали диацетофенон-стирольную добавку (DAFST) в количестве 3 мас. %, а в качестве ускорителя сшивки – малеимидное соединение DTBFM. Указанные добавки способствовали интенсификации процессов радиационно-индуцированного образования поперечных связей.

Смешение компонентов проводили на лабораторных вальцах при комнатной температуре. Каучук предварительно пластифицировали, после чего последовательно вводили наполнители, вулканизующие агенты и функциональные добавки до получения однородной композиции.

Для системы на основе натурального каучука полученные смеси формовали в листы толщиной около 2 мм и подвергали предварительной термической вулканизации в гидравлическом прессе при температуре (150–155)°C под давлением.

Смеси на основе SEP–BNR формовали в пластины толщиной около 0,3 мм методом прессования. Перед радиационной обработкой образцы подвергали предварительному термическому воздействию при температуре 453 K в течение 40 мин для инициирования начальной стадии сшивки.

Облучение проводили γ-излучением от источника ^60Co в воздушной среде при комнатной температуре.

Для композиций на основе натурального каучука использовали дозы 10, 20, 30 и 40 кГр.

Для терморадиационно-вулканизованных систем на основе SEP–BNR применяли более широкий диапазон доз – 100–500 кГр.

Изменение дозы облучения позволяло варьировать степень радиационной сшивки и формировать пространственную сетку различной плотности.

Механические свойства определяли на универсальной разрывной машине при скорости перемещения захватов 500 мм/мин. Испытания проводили на образцах типа «двойная лопатка». Определяли:

– предел прочности при растяжении;
– относительное удлинение при разрыве;
– модуль упругости;
– твердость.

Реологические характеристики оценивали по вязкости по Муни, измеряемой при заданной температуре в соответствии со стандартной методикой. Полученные значения использовали как косвенный показатель степени сшивки и подвижности макромолекулярных цепей.

Для оценки степени сшивания и структуры сетки определяли содержание гель-фракции, степень набухания и плотность сшивки.

Гель-фракцию определяли экстракцией растворимых компонентов в органическом растворителе с последующим высушиванием образцов до постоянной массы. Доля нерастворимого остатка характеризовала степень образования трехмерной сетки.

Степень набухания определяли выдержкой образцов в растворителе до достижения равновесия.

Плотность сшивки рассчитывали по уравнению Флори–Ренера на основе данных о набухании, что позволяло количественно оценить концентрацию поперечных связей в материале.

Термическую стабильность исследовали методом термогравиметрического анализа (ТГА) в атмосфере азота при скорости нагрева 20 °C/мин в диапазоне температур от комнатной до 600 °C. По результатам анализа определяли температуру начала деструкции и характер разложения материалов.

Морфологию поверхности разрушения композитов изучали методом сканирующей электронной микроскопии. Полученные микрофотографии использовали для оценки распределения наполнителя, качества межфазной адгезии и особенностей разрушения матрицы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование пространственной сетчатой структуры является ключевым процессом, опре-

деляющим изменение эксплуатационных характеристик эластомерных материалов при радиационной и терморадиационной обработке. Под действием γ-излучения в макромолекулах каучуков происходит радиолитическое образование свободных радикалов, инициирующих реакции межцепного сшивания и формирование трехмерной пространственной сетки.

Степень сшивания количественно оценивали по содержанию гель-фракции, степени набухания и расчетной плотности поперечных связей. Значения указанных параметров определяли экспериментально для каждой дозы облучения [6, 9]. На основе полученных результатов построены зависимости гель-фракции и плотности сшивки от поглощенной дозы γ-излучения, представленные на рис. 1 и 2.

Как видно из рис. 1, для композиций на основе натурального каучука, армированных углеродными волокнами, с увеличением дозы до 30–40 кГр наблюдается существенный рост доли нерастворимого остатка, что свидетельствует об интенсивном формировании пространственной сетки. Для систем SEP–BNR увеличение гель-фракции выражено еще более значительно и продолжается во всем диапазоне 100–500 кГр, что связано с повышенной радиационной чувствительностью материала и присутствием сенсибилизирующих добавок.

Результаты расчета плотности сшивки по уравнению Флори–Ренера приведены на рис. 2. С ростом дозы наблюдается монотонное увеличение концентрации поперечных связей, что указывает на уменьшение среднего расстояния между узлами сетки и формирование более жесткой структуры. При этом для терморадиационно-вулканизованных систем значения плотности сшивки оказываются выше, чем для композитов на основе натурального каучука, что подтверждает эффективность совместного действия тепловой и радиационной активации.

Таким образом, представленные на рис. 1 и 2 экспериментальные зависимости однозначно подтверждают, что увеличение дозы γ-облучения приводит к последовательному росту гель-фракции и плотности сшивки, что определяет переход материала в высокосшитое состояние. Полученные структурные изменения являются определяющими для формирования механических и реологических свойств композитов, рассмотренных далее.

Параметры пространственной сетки (рост гель-фракции и плотности сшивки на рис. 1 и 2) напрямую определяют механические и реологические характеристики эластомерных композитов. По мере увеличения числа поперечных связей снижается подвижность макромолекулярных цепей, возрастает доля «упруго-сетчатого» отклика и изменяется механизм разрушения: от преимущественно вязко-эластичного поведения к более жесткому и ограниченно деформируемому состоянию [9, 10].

Для композитов на основе натурального каучука, армированных короткими углеродными волокнами, характерна дозозависимая эволюция прочностных характеристик. Установлено, что предел прочности при растяжении возрастает с увеличением дозы γ-облучения до ~30 кГр, после чего при 40 кГр наблюдается снижение прочности, что указывает на появление вклада радиационной деструкции/«пересшивки» и дефектов структуры при повышенных дозах. Такая картина согласуется с данными о том, что при дозах порядка 30 кГр достигается наиболее благоприятный баланс между интенсификацией сшивки и началом деградационных процессов.

Модуль упругости в значительной степени определяется армированием и межфазным взаимодействием. Для NR/CF-систем модуль возрастает при увеличении содержания волокон, тогда как влияние дозы в диапазоне до 40 кГр выражено значительно слабее. Это указывает на то, что вклад наполнителя (ориентация/распределение волокон и адгезия «матрица–волокно») в жесткость композита сопоставим или превышает вклад изменения плотности сетки в указанном диапазоне доз.

Деформативные свойства (относительное удлинение при разрыве) демонстрируют типичный для сшивающихся эластомеров характер: при малых дозах возможно кратковременное увеличение удлинения (за счет частичного структурирования без существенного ограничения сегментальной подвижности), однако при дальнейшем росте дозы удлинение уменьшается вследствие уплотнения сетки; при этом увеличение содержания волокон дополнительно снижает деформативность из-за ограничения ориентации цепей и концентрации напряжений вблизи наполнителя.

Твердость для NR/CF-композитов, согласно наблюдаемым закономерностям, определяется главным образом концентрацией волокон и существенно возрастает при росте армирования, тогда как влияние дозы облучения выражено слабее.

Таким образом, для NR/CF-композитов механический отклик формируется совместным действием двух факторов: радиационно-индуцированной сшивки матрицы (с максимумом эффективности в области ~ 30 кГр) и армирующего эффекта углеродных волокон и межфазной адгезии.

Для терморадиационно-вулканизованных смесей SEP–BNR рост дозы γ-облучения

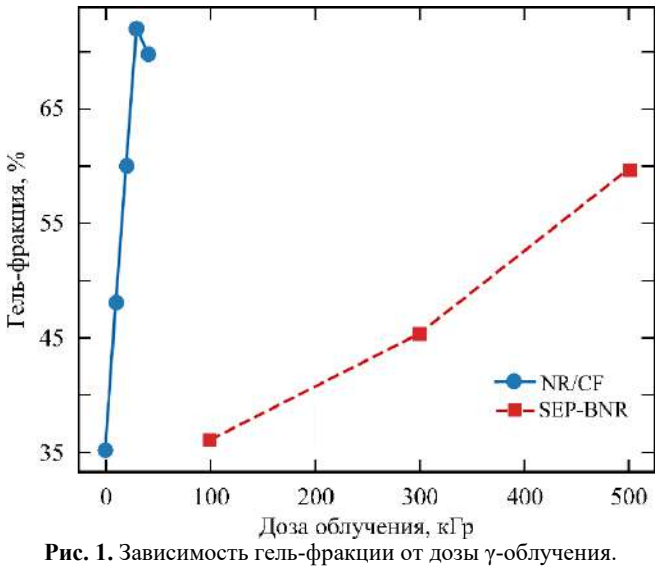
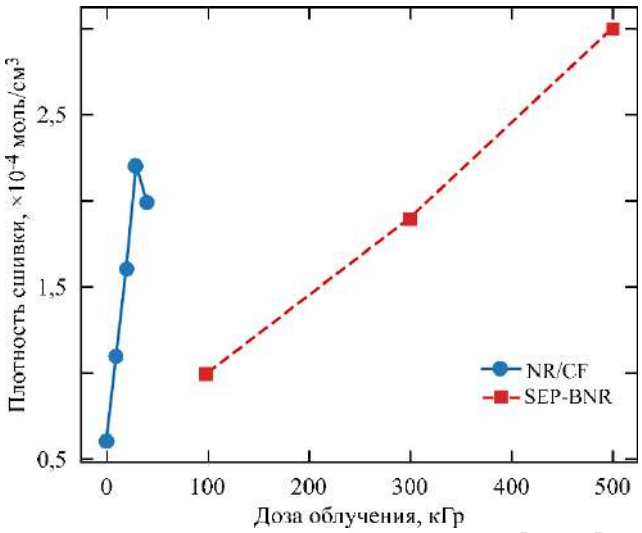


Рис. 1. Зависимость гель-фракции от дозы γ-облучения.



2. Зависимость плотности сшивки, рассчитанной по уравнению Флори–Ренера, от дозы γ-облучения.

приводит к существенным изменениям реологических и механических характеристик материала, что обусловлено формированием более плотной и равномерной пространственной сетки.

Рост вязкости по Муни с увеличением дозы облучения отчетливо прослеживается на рис. 3. Повышение данного параметра свидетельствует об увеличении сопротивления течению и снижении подвижности макромолекулярных сегментов вследствие образования дополнительных поперечных связей. Установлено, что при увеличении дозы от 100 до 500 кГр вязкость по Муни возрастает с 48,2 до 68,3 усл. ед., что указывает на существенное уплотнение структуры вулканизата.

Одновременно наблюдается снижение пластичности и твердости (рис. 4), что связано с уплотнением пространственной сетки и ограничением подвижности макромолекул. Пластичность уменьшается с 0,57 до 0,40 усл. ед., а твердость – с 1500 до 1100 гс, что свидетельствует о переходе материала к более жесткому и менее деформируемому состоянию.

Следует отметить, что применение сенсибилизаторов и малеимидных ускорителей способствует снижению пороговой дозы формирования геля и обеспечивает более равномерное распределение поперечных связей по объему, что повышает эффективность терморадиационной вулканизации и стабильность свойств.

Сопоставление двух исследованных систем показывает, что основным «управляющим параметром» является степень сеткообразования: рост гель-фракции и плотности сшивки (рис. 1 и 2) приводит к увеличению жесткости и сопротивления течению/деформации (рост модуля и вязкости по Муни), но одновременно ограничивает деформативность (снижение удлинения и пластичности). При этом для NR/CF-композитов максимизация прочности достигается в области доз, где сшивка еще преобладает над деструкцией (около 30 кГр), тогда как для SEP–BNR-систем ключевым становится подбор дозы, обеспечи-

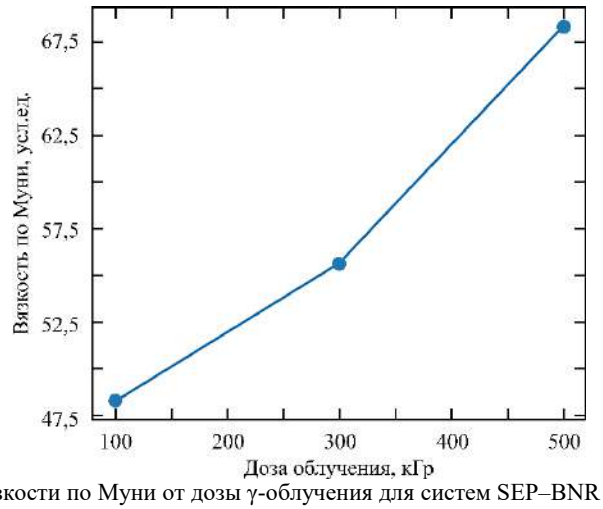


Рис. 3. Зависимость вязкости по Муни от дозы γ-облучения для систем SEP–BNR (экспериментальные данные).

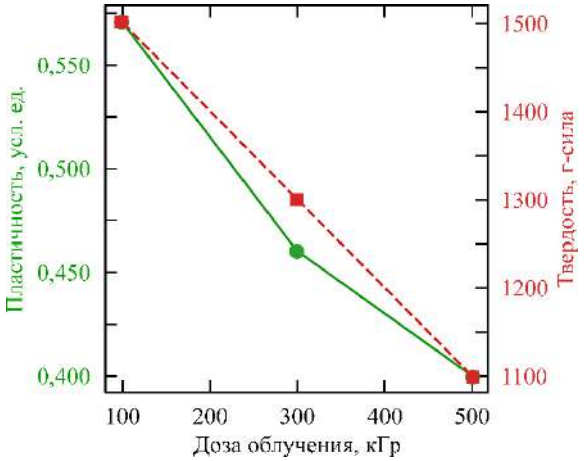


Рис. 4. Зависимость пластичности и твердости от дозы γ-облучения для систем SEP–BNR.

Образец	T_{max}, °C	T_{20}, °C	T_{40}, °C	Остаточная масса при 600 °C, %
NR	347	332	349	6
NR + CF 10 phr	364	343	366	14
NR + CF 15 phr	371	350	369	16

вающей требуемый компромисс между ростом вязкости (как индикатора сеткообразования) и допустимым снижением пластичности/твердости.

Термическая стабильность эластомерных композитов оценивалась методом термогравиметрического анализа [6, 9]. По результатам ТГА определялись температура максимальной скорости разложения (T_{max}), температуры, соответствующие 20 и 40% потери массы (T20 и T40), а также остаточная масса при 600 °C. Полученные параметры приведены в таблице.

Анализ данных показывает, что введение углеродных волокон вызывает заметное повышение термостабильности материалов. Для армированных композитов наблюдается смещение температур начала интенсивной деструкции в область более высоких значений, а также увеличение остаточной массы. Так, при содержании 15 phr углеродных волокон T_{max} возрастает с 347 до 371 °C, а остаточная масса увеличивается более чем в 2 раза.

Повышение термической устойчивости обусловлено двумя факторами. Во-первых, углеродные волокна обладают высокой собственной термостойкостью и выполняют барьерную функцию, затрудняя перенос тепла и диффузию летучих продуктов разложения. Во-вторых, рост плотности пространственной сетки ограничивает подвижность макромолекулярных цепей и повышает энергетический барьер термодеструкции.

Таким образом, радиационная модификация и армирование углеродными волокнами обеспечивают комплексное повышение не только механических, но и термических характеристик композитов, что расширяет область их практического применения в условиях повышенных температур.

Полученные экспериментальные результаты позволяют установить взаимосвязь между радиационно-индуцированным формированием пространственной сетки и изменением комплекса физико-механических и термических характеристик эластомерных композитов [11–12].

Под действием γ-излучения в макромолекулах каучуков образуются свободные радикалы, инициирующие межцепное сшивание и формирование трехмерной сетчатой структуры. Рост гель-фракции и плотности сшивки (рис. 1, 2) свидетельствует о последовательном увеличении числа поперечных связей и уменьшении средней длины подвижных сегментов между узлами сетки.

Ограничение сегментальной подвижности макромолекул приводит к увеличению сопротивления деформации, что проявляется в росте модуля упругости и вязкости по Муни, а также в повышении прочности при растяжении. Одновременно наблюдается снижение пластичности и относительного удлинения, что обусловлено уменьшением способности цепей к ориентации и перераспределению напряжений.

Дополнительное сопоставление полученных результатов с современными литературными данными показывает их хорошее согласование с установленными закономерностями радиационной модификации эластомерных систем. В частности, в работах [6–10] отмечается, что увеличение дозы γ-облучения приводит к росту плотности поперечных связей, повышению модуля упругости и вязкости при одновременном снижении деформативных характеристик, что полностью подтверждается результатами настоящего исследования. Аналогично в [9, 10] показано, что при достижении определенного порогового уровня дозы возможно проявление процессов радиационной деструкции, приводящих к снижению прочности, что согласуется с выявленным максимумом прочностных характеристик для NR/CF-композитов в области ~ 30 кГр. Кроме того, влияние наполнителей и сенсибилизирующих добавок на эффективность формирования пространственной сетки и термостабильность материалов, установленное в данной работе, соответствует современным представлениям о роли межфазного взаимодействия и радиационно-химических процессов в эластомерных композициях [6–8]. Таким образом, полученные экспериментальные данные не только подтверждают известные теоретические положения, но и расширяют их применительно к исследуемым системам.

Таким образом, совокупность полученных данных подтверждает, что радиационная и терморадиационная модификация обеспечивает управляемое изменение структуры эластомерных композитов и позволяет целенаправленно регулировать их механические, реологические и термические свойства за счет контроля плотности пространственной сетки и состава композиции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено комплексное исследование закономерностей формирования структуры и свойств радиационно- и терморадиационно-модифицированных эластомерных композитов на основе натурального каучука, армированного короткими углеродными волокнами, и смесей типа SEP–BNR, содержащих сенсибилизаторы и малеимидные ускорители. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что γ-облучение инициирует интенсивные процессы межцепного сшивания эластомерных матриц, что приводит к росту гель-фракции и плотности пространственной сетки. Увеличение дозы сопровождается последовательным переходом материала от линейной к высокосшитой структуре.

2. Для композитов на основе натурального каучука максимальные прочностные характеристики достигаются при дозах порядка 30–40 кГр, что соответствует оптимальному соотношению процессов сшивки и радиационной деструкции.

3. Рост плотности сшивки вызывает повышение модуля упругости, жесткости и вязкости по Муни, тогда как пластичность и относительное удлинение уменьшаются вследствие ограничения подвижности макромолекулярных сегментов.

4. Армирование короткими углеродными волокнами обеспечивает дополнительное упрочнение композитов, повышение модуля упругости и увеличение термической устойчивости за счет эффективной передачи напряжений и барьерного эффекта наполнителя.

5. В системах SEP–BNR применение сенсибилизаторов и малеимидных ускорителей повышает эффективность терморадиационной вулканизации, снижает пороговую дозу формирования сетки и способствует образованию более однородной структуры.

6. Термогравиметрический анализ показал смещение температур начала деструкции в область более высоких значений и увеличение остаточной массы для армированных и радиационно-сшитых образцов, что подтверждает повышение термостабильности композитов.

7. В целом как радиационная, так и терморадиационная обработка являются эффективными методами управляемой модификации эластомерных материалов и позволяют целенаправленно регулировать их механические, реологические и термические свойства для практических инженерных применений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hassan, M.M., El-Nemr, K.F., and El-Megeed, A.A.A., Effect of gamma radiation on physico-mechanical properties of vulcanized natural rubber/carbon fiber composites, *Journal of Elastomers & Plastics*, 2016, vol. 48, no. 8, p. 677.
2. Alarifi, I.M., A comprehensive review on advancements of elastomers for engineering applications, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2023, vol.6, no. 4, p. 451.
   https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.05.001
3. Yang, L., Ou, Z., and Jiang, G., Research progress of elastomer materials and application of elastomers in drilling fluid, *Polymers*, 2023, vol. 15, p. 918.
   https://doi.org/10.3390/polym15040918
4. Burelo, M., Martínez, A., Hernández-Varela, J.D., et al., Recent developments in synthesis, properties, applications and recycling of bio-based elastomers, *Molecules*, 2024, vol. 29, p. 387.
   https://doi.org/10.3390/molecules29020387
5. Lipińska, M., and Imiela, M., Morphology, rheology and curing of EPDM/HNBR blends reinforced by POSS and organoclay, *Polymer Testing*, 2019, vol. 75, p. 26.
   https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.020
6. Zaharescu, T., and Dumitru, A., Radiation crosslinking and degradation of elastomers: recent advances, *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, vol. no. 182, art. ID 109379.
   https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109379
7. Clough, R.L., High-energy radiation and polymers: a review of modification mechanisms, *Progress in Polymer Science*, 2020, vol. 101, art. ID 101198.
   https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.101198
8. Chapiro, A., Radiation chemistry of polymeric systems and crosslinking processes, *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, vol. 169, art. ID 107962.
   https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.107962
9. Bhatnagar, A., et al., Gamma radiation effects on mechanical and thermal properties of rubber composites, *Polymer Testing*, 2022, vol. 108, art. ID 107489.
   https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107489
10. Kwon, S.J., and Lee, J., Structure–property relationships in radiation-cured elastomers, *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, vol. 140, art ID e53721.
    https://doi.org/10.1002/app.53721
11. Mammadov, Sh.M., Rzaeva, S.V., Guliev, A.M., Akberov O.H., et al., Structural parameters and dynamical properties of the radiative and peroxide vulcanizates based on EPM participation, *American Journal of Polymer Science*, 2016, vol. 6, no. 1, p. 12.
    https://doi: 10.5923/j.ajps.20160601.02
12. Mamedov, Ş.M., Ahmedov, E.N., and Rzayeva, S.V., Modified ethylene-propylene rubbers with unsaturated rubbers and low-molecular reactive compounds, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2024, vol. 60, no. 6, p. 883.
    https://doi: 10.3103/S1068375524700492

Summary

Radiation and thermoradiation treatments are effective physical methods to controll the structure and properties of elastomeric materials without the use of conventional chemical vulcanization systems. This study investigates the effects of the γ-radiation dose, fiber reinforcement, and sensitizing additives on the formation of the spatial network and the performance characteristics of elastomeric composites based on natural rubber and SEP–BNR-type blends. It is shown that increasing the irradiation dose leads to an increase in the gel fraction and crosslink density, accompanied by an improved stiffness, strength, and Mooney viscosity, along with a decrease in plasticity. Reinforcement with carbon fibers and the use of sensitizers enhance the crosslinking efficiency and thermal stability of the materials. Optimal radiation processing conditions have been identified, ensuring a balanced combination of strength and deformation properties of the composites. The obtained results confirm the feasibility of a targeted control of the structure and properties of elastomeric materials through radiation modification methods.

Keywords: radiation vulcanization, thermoradiation treatment, elastomers, γ-radiation, gel fraction, crosslink density, Mooney viscosity, carbon fibers, composites