

МРНТИ 31.25.19

Химия

Обзор

Радиационная сшивка первичных и вторичных полимеров: эффективность и возможности радиационной сшивки полимеров

Лязат Толымбекова, Айымжан Казбекова, Айша Бақтыбек, Гайни Сейтенова, Арайлым Турсынова

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; tolymbekova_lb@enu.kz, aiymzhanr2502@gmail.com, aishabaktybek1@gmail.com, seitenova_gzh@enu.kz, tursynova_ak@enu.kz

*Корреспонденция: aiymzhanr2502@gmail.com

Аннотация: Статья посвящена обзору радиационной сшивки первичных и вторичных полимеров как перспективному направлению модификации макромолекулярных материалов. Рассматриваются физико-химические основы процесса сшивки под воздействием ионизирующего излучения, в том числе γ -излучения, электронного пучка и ультрафиолета, с акцентом на механизмы образования поперечных связей в структуре полимеров. Особое внимание уделяется сравнительному анализу поведения первичных и вторичных полимеров при радиационном воздействии, включая влияние примесей, остаточных стабилизаторов и степени деградации. Обобщены результаты современных научных исследований, демонстрирующих изменения в механических и термических свойствах полимеров после сшивки. Значительная часть статьи посвящена практическому применению радиационно-сшитых материалов в различных отраслях: в энергетике (изоляция кабелей), в медицине (одноразовые изделия), в строительстве (трубы и плёнки), а также в переработке и утилизации пластиковых отходов. В работе затрагиваются экономические аспекты рассматриваемого метода, при этом отмечается, что при переходе к массовому производству радиационная сшивка характеризуется рядом технологических особенностей, потенциально влияющих на экономические показатели процесса. К ним относятся высокая производительность, высокий уровень автоматизации и отсутствие необходимости в применении химических инициаторов. Отмечены экологические преимущества, включая отсутствие токсичных побочных продуктов и возможность глубокой переработки вторичных полимеров. Сделан вывод о высокой актуальности и потенциале радиационной сшивки в контексте устойчивого развития и перехода к циркулярной экономике.

Цитирование: Толымбекова, Л., Казбекова, А., Бақтыбек, А., Сейтенова, Г., Турсынова, А. (2026). Радиационная сшивка первичных и вторичных полимеров: эффективность и возможности радиационной сшивки полимеров. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия Химия. География. 154(1), 75-99. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-75-99>

Академический редактор:
Э.Е. Копишев

Поступила: 15.09.2025

Исправлена: 28.01.2026

Принята: 29.01.2026

Опубликована: 31.03.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Ключевые слова: радиационная сшивка; ионизирующее излучение; первичные полимеры; вторичные полимеры; полиэтилен; модификация полимеров; экологичность; полимерные отходы; циркулярная экономика

1. Введение

В условиях устойчивого роста производства и потребления полимерных материалов одной из приоритетных задач современной химической и материаловедческой науки становится повышение эксплуатационных характеристик полимеров, а также разработка эффективных подходов к переработке и повторному использованию полимерных отходов. Особую актуальность данные вопросы приобретают в контексте перехода к принципам устойчивого развития и циркулярной экономики, предполагающим снижение экологической нагрузки и рациональное использование ресурсов. В этом аспекте радиационная сшивка рассматривается как перспективный физико-химический метод модификации полимерных материалов, позволяющий улучшать их механические, термические и химические свойства без применения химических реагентов и растворителей. Особенно значимым является применение данной технологии к вторичным полимерам, что открывает возможности не только для утилизации пластиковых отходов, но и получения материалов с повышенными эксплуатационными и технико-экономическими показателями (Azevedo et al., 2025; Ahmed et al., 2024).

Настоящая работа представляет собой обзор современных научных исследований, посвящённых радиационной сшивке первичных и вторичных полимеров. В статье выполнено обобщение и аналитическое сопоставление литературных данных с акцентом на влияние типа полимера, вида ионизирующего излучения, диапазона поглощённых доз и условий облучения на формирование пространственной структуры и изменение эксплуатационных свойств материалов. Рассмотренные исследования систематизированы с целью выявления общих закономерностей радиационного воздействия, а также различий в поведении первичных и вторичных полимеров, что позволяет оценить потенциал и ограничения радиационной сшивки для практического применения и экологически ориентированных технологий переработки.

Радиационная сшивка является одной из ключевых технологий физико-химической модификации полимерных материалов, основанной на воздействии ионизирующего излучения высокой энергии на макромолекулярную структуру. В результате облучения в полимерной матрице инициируются свободнорадикальные процессы, приводящие к образованию поперечных ковалентных связей между макромолекулярными цепями и формированию трёхмерной пространственной сетки. Одним из существенных преимуществ данного метода является отсутствие необходимости в химических инициаторах или катализаторах, а также возможность проведения процесса при относительно низких температурах. В промышленных и исследовательских условиях для радиационной сшивки применяются γ -излучение, пучки ускоренных электронов и рентгеновское излучение, выбор которых определяется требуемой глубиной проникновения, дозовыми характеристиками и геометрией обрабатываемых изделий (Makarov & Krivchenko, 2020; Krieguer et al., 2024).

С точки зрения молекулярной механики под действием ионизирующего излучения происходит ионизация и возбуждение молекул полимера, что приводит к образованию активных центров - макрорадикалов. Их последующая миграция и рекомбинация инициируют формирование поперечных связей между цепями. Общий механизм радиационной сшивки включает образование первичных радикалов в результате отрыва атомов водорода или разрыва C–C-связей, развитие цепных радикальных процессов и их завершение с образованием пространственной сетки. В результате данных процессов наблюдается повышение теплостойкости, химической инертности, устойчивости к деформации и растрескиванию полимерных материалов (Gheysari & Behjat, 2001; Glauser et al., 2000). Наиболее эффективно радиационная сшивка реализуется в полимерах с насыщенной углеродной цепью, таких как полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и этиленвинилацетат, что определяет их широкое применение в промышленности и технологиях переработки (Maharaj et al., 2018).

2. Радиационная сшивка первичных и вторичных полимеров: истоки, индустриализация и тренды

Исследования в области радиационной химии полимеров начались в 1950-х годах с фундаментальных работ авторов (Charapiro et al., 1962), заложивших основы понимания кинетики радиационных процессов в органических материалах. Были получены первые сведения о дозозависимости процессов сшивки и деструкции, а также о влиянии структуры полимера, кристалличности, наличия стабилизаторов и внешней атмосферы на направление радиационного воздействия. Уже в 1970-х годах радиационная технология была внедрена в промышленность: сначала в производстве теплоусаживаемых труб и изоляционных материалов, а затем в упаковочной и автомобильной промышленности (Mendizabal et al., 1996). Классическим примером применения радиационной сшивки является модификация полиэтилена высокой плотности (HDPE), который после облучения приобретает свойства, аналогичные сшитым терморезистивным полимерам - термостойкость до 200°C, высокая прочность на разрыв и стойкость к растрескиванию под нагрузкой (Lapshin & Voronkova, 2015).

В отчёте Международного агентства по атомной энергии (IAEA) «1st RCM Report for CRP F23035: Radiation Effects on Polymer Materials Commonly Used in Medical Devices» (2021) обобщены результаты международного координированного проекта по оценке влияния ионизирующего излучения на широко применяемые в медицинских изделиях первичные полимерные материалы. В работе анализируются технологические режимы γ -излучения (источники $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$), электронно-лучевой обработки и рентгеновских источников, релевантные прежде всего радиационной стерилизации медицинских изделий, а также более высокодозовым воздействиям, приводящим к изменениям структуры и свойств полимеров. Рассматриваются конкурирующие процессы радиационной сшивки и цепного расщепления, влияние кислорода, скорости дозы и температуры, а также эффекты пост-облучательного старения материалов при различных режимах облучения (International Atomic Energy Agency, 2021).

Современный этап исследований акцентирует внимание на возможности тонкой настройки свойств полимеров путём варьирования дозы облучения, температуры, наличия сенсбилизаторов (например, триаллилизоцианурата - ТАИС, дивинилбензола - DVB) и условий среды (вакуум, воздух, инертная атмосфера). Кроме того, особое значение приобретают работы по созданию композитов и нанокомпозитов на основе радиационно-сшитых матриц, позволяющих получить материалы с направленными функциональными свойствами - барьерными, электроизоляционными, механическими (Zenkiewicz et al., 2015; Manaila et al., 2012).

Историческое развитие методов радиационной сшивки показало устойчивый интерес научного сообщества к использованию ионизирующего излучения как инструмента для улучшения свойств полимерных материалов. Однако эффективность такого воздействия во многом определяется изначальной структурой и физико-химическими характеристиками самих полимеров. Для понимания масштабов и перспектив радиационной модификации необходимо рассмотреть основные различия между первичными и вторичными полимерами, а также особенности их физико-химических и механических свойств, определяющих реакцию материала на облучение (Charlesby, 1960; Woods et al., 1994; Ferry et al., 2020).

Физико-химические и механические характеристики полимерных материалов определяют их пригодность к использованию в различных технических и промышленных областях. Первичные полимеры, полученные непосредственно в результате синтеза мономеров, обладают высокой степенью молекулярной регулярности, однородной кристалличностью, отсутствием дефектов в цепях, а также строго контролируруемыми молекулярно-массовыми распределениями (Smith et al., 2018). Это обеспечивает их высокую прочность на разрыв, устойчивость к термическим и химическим воздействиям, стабильность во времени и при длительной эксплуатации. Такие полимеры широко применяются в

медицине, электронике, строительстве, упаковке и других сферах, где важны стабильность свойств и соответствие строгим требованиям (Thiher et al., 2020; Schneider et al., 2019).

Вторичные полимеры напротив, представляют собой переработанные или повторно использованные материалы, полученные в результате рециклинга промышленных или бытовых пластиков. В процессе переработки исходный полимер подвергается ряду воздействий – термическому старению, окислению, механическому разрушению и воздействию ультрафиолета. Эти процессы приводят к образованию короткоцепочечных фрагментов, снижению молекулярной массы, увеличению количества кислородсодержащих групп (карбонильных, гидроксильных), ухудшению морфологии и снижению степени кристалличности. Соответственно, механические свойства вторичных полимеров – прочность, ударная вязкость, модуль упругости – резко снижаются. Также ухудшается адгезия, снижается термостойкость и устойчивость к химическим реагентам (Al-Gahtany et al., 2018; Kimura et al., 2020).

Для восстановления утраченных свойств и продления срока службы вторичных полимеров используется ряд технологий модификации, одной из наиболее эффективных из которых является радиационная сшивка. Этот процесс позволяет улучшить структуру материала за счёт образования поперечных ковалентных связей между макромолекулами, повышая прочность, термостабильность и химическую инертность (Basfar et al., 2015; Alavarse et al., 2022). При этом важно учитывать начальные свойства материала: полимеры с изначально высокой кристалличностью или большим содержанием дефектов могут по-разному реагировать на облучение. Например, полиэтилен низкой плотности (LDPE) обладает хорошей податливостью к радиационной сшивке благодаря своей аморфной структуре, тогда как полипропилен или полиэтилентерефталат (PET) могут требовать введения сшивающих агентов или подбора особых условий облучения (Sharif et al., 2000; Al Lafi et al., 2015). Кроме того, структура и физико-химические свойства полимера определяют выбор дозы ионизирующего излучения. При слишком низкой дозе может не достигаться необходимая степень сшивки, тогда как при высоких дозах начинается деструкция, особенно в случае вторичных полимеров с уже повреждённой цепной структурой (Silva et al., 2021; Podhornaya et al., 2020).

В работах (Chen et al., 2006) показано, при облучении вторичного полиэтилена в диапазоне доз 100–250 кГр наблюдается значительное повышение прочностных характеристик – до 60% по сравнению с необлучённым материалом, а также улучшение тепловой деформационной стойкости и устойчивости к растрескиванию. В то же время, при превышении дозы 300 кГр происходит деградация цепей, выражающаяся в снижении эластичности и появлении хрупкости. Это подтверждает необходимость оптимизации режимов облучения в зависимости от истории переработки и примесного состава вторичных полимеров (International Atomic Energy Agency, 2020).

Для оценки эффективности радиационной сшивки полимеров широко используется анализ зависимости степени сшивки (гель-фракции) от поглощённой дозы ионизирующего излучения. На рисунке 1 представлена обобщённая типичная кривая зависимости степени сшивки (%) от дозы облучения (кГр) для полиэтилена, построенная на основе данных экспериментальных исследований, представленных в литературе (Makarov & Krivchenko, 2020; Cataldo et al., 2007). Кривая иллюстрирует характерный рост степени сшивки с увеличением дозы до достижения максимума, за которым при дальнейшем облучении начинает доминировать цепное расщепление.

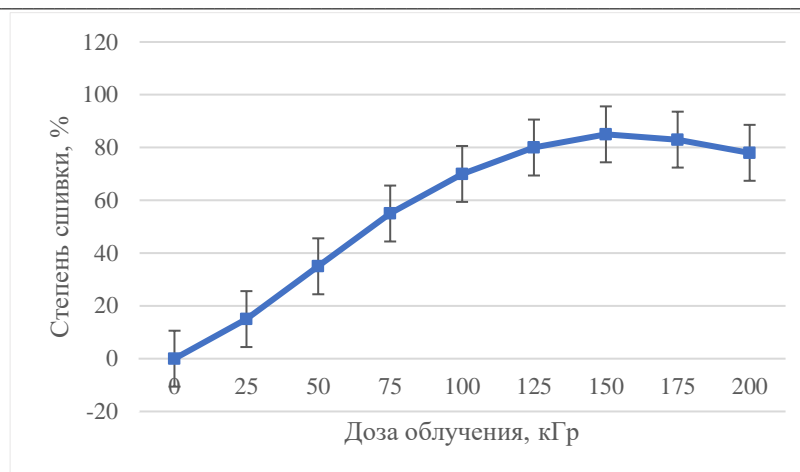


Рисунок 1. Обобщённая зависимость степени сшивки полиэтилена от дозы ионизирующего излучения

Как видно из графика, при увеличении дозы облучения до 150 кГр наблюдается практически линейный рост степени сшивки, достигающий пика (около 88–90%). Это указывает на активное формирование поперечных связей между макромолекулами. Однако при дальнейшем увеличении дозы (свыше 150–175 кГр) степень сшивки начинает снижаться, что объясняется началом процессов деструкции и разрушения полимерной цепи из-за переоблучения. Таким образом, для получения оптимальных характеристик радиационно-сшитого материала необходимо строго контролировать дозу облучения, ориентируясь на максимум кривой сшивки (Elbarbary et al., 2017; Ashfaq et al., 2021).

Особое внимание уделяется влиянию остаточных стабилизаторов (Cleland et al., 2003; Gao et al., 2020), пигментов и наполнителей на эффективность сшивки (Lenfeld et al., 2020). Авторами работы (Naikwadi et al., 2022; Khalil, 2023) показано, что предварительная очистка и дегазация вторичных полимеров существенно повышают степень образования гелевой фракции и снижают долю деструктивных процессов. Кроме того, в ходе радиационного воздействия происходит частичная деструкция низкомолекулярных загрязнений, что способствует улучшению однородности материала и снижению запаха, что важно при использовании вторичных полимеров в потребительской сфере (Ahmed et al., 2024; Calina et al., 2025).

Необходимо отметить, что исследования радиационной сшивки не ограничиваются термопластами. В настоящее время усиливается интерес к модификации термопластичных эластомеров, полимерных сплавов, биоразлагаемых полимеров – полилактидов (PLA) и полигидроксиалканоатов (PHA), а также материалов на основе возобновляемого сырья. Эти направления находят применение в упаковке, медицине, электронике и биоинженерии, где требуется высокоточная настройка свойств материала при минимальном воздействии посторонних реагентов (Kalapakdee, 2013; Coqueret, 2024).

В последние годы опубликовано значительное количество исследований, демонстрирующих, что радиационная сшивка первичных и вторичных полимеров при корректной настройке параметров облучения (тип излучения, доза, скорость дозы, атмосферные условия, температура) и использовании коагентов (например, ТАИС) представляет собой эффективный метод направленной модификации эксплуатационных характеристик полимерных материалов (Manas et al., 2018). Наиболее отчетливо фиксируются такие эффекты, как повышение модуля упругости и термостойкости, снижение коэффициента трения и удельного износа, стабилизация межфазных взаимодействий (матрица – наполнители/фазы) и увеличение долговечности. Вместе с тем наблюдается характерный компромисс в виде снижения относительного удлинения при разрыве на высоких степенях сшивки (Kurbanova et al., 2023; Mo et al., 2013). Для вторичных полимеров радиационная

обработка дополнительно выполняет функцию выравнивания изменяющихся свойств рециклатов и расширяет возможности их практического применения (Hara, 2022; Darwis et al., 2015).

Ряд экспериментальных исследований демонстрирует, что эффект радиационной сшивки существенно зависит от типа полимера, условий облучения и состава системы. Так, Kurbanova и соавт. (2023) показали, что электронно-лучевая обработка листов полиэфирэфиркетона (PEEK) в диапазоне доз 50–400 кГр приводит к снижению коэффициента трения (минимум при ~100 кГр), уменьшению удельной скорости изнашивания и росту микротвёрдости при более высоких дозах, что указывает на формирование более жёсткой и износостойкой поверхностной структуры.

Для полиолефинов наблюдаются иные закономерности. Gheysari и соавт. (2024) установили, что γ -облучение LDPE в диапазоне 40–120 кГр сопровождается ростом степени сшивки (гель-фракции) и прочности при растяжении при одновременном снижении относительного удлинения, тогда как термические параметры плавления и кристаллизации изменяются незначительно. Кроме того, отмечено улучшение эффекта памяти формы при умеренных дозах облучения (Fujisato et al., 1999; Lee et al., 2021).

В системах полимерных смесей радиационная обработка может способствовать укреплению межфазного взаимодействия. Rahaman и соавт. (2023) показали, что электронно-лучевая обработка смесей линейного полиэтилена низкой плотности (LLDPE) с полидиметилсилоксаном (PDMS) в диапазоне 50–250 кГр приводит к формированию прочной адгезии между силиконовой фазой и полиэтиленовой матрицей, сопровождаемой изменением морфологии и улучшением диэлектрических свойств, релевантных для кабельной изоляции. Аналогично, Rekel и соавт. (2022) показали, что электронно-лучевая сшивка смесей HDPE с полиуретаном приводит к повышению термостабильности и прочности при одновременном снижении удлинения при разрыве, что отражает характерный компромисс между жёсткостью и пластичностью.

Для полипропилена эффективная сшивка часто требует введения коагентов. Так, Ovsík и соавторы (2023) показали, что добавление триаллилизотиоцианурата (ТАИС) и последующее электронное облучение инициируют формирование пространственной сетки в полипропилене (PP), что приводит к улучшению микромеханических характеристик формованных образцов. Ряд исследований посвящённых нанокомпозитам на основе полиэтиленвинилацетат (PEVA) и LDPE, подтвердил, что γ -облучение, в том числе в сочетании с функциональными добавками, обеспечивает улучшение комплекса структурных, термических и электрических характеристик (Nature, 2023; RSC, 2024). В обобщённом виде можно заключить, что для полиолефинов и инженерных термопластов (PEEK, PP) радиационная сшивка в диапазоне доз ~50–300 кГр приводит к росту модуля упругости, износостойкости и термостойкости при сопутствующем снижении относительного удлинения и ударной вязкости. Для систем с низкой склонностью к сшиванию (PP, PA) ключевую роль играют коагенты (ТАИС и др.), что согласуется с современными обзорными публикациями по модификации термопластов ионизирующим излучением (MDPI, 2023; PMS, 2024).

Аналогичные тенденции наблюдаются и для вторичных полимерных материалов. Так, Lee и соавторы (2023) сопоставили γ -облучение первичного и переработанного полиамида-6 (PA-6) и выявили существенные различия в перерабатываемости и реологических характеристиках, включая вязкость расплава, что имеет принципиальное значение для подбора дозового диапазона и стабилизации свойств рециклатов. Zhou и соавт. (2012) установили, что электронно-лучевая модификация отходов акрилонитрил-бутадиен-стирола (wABS) с использованием 1,3-фенилен-бис-оксазолина (1,3-PBO) приводит к усилению межмолекулярных взаимодействий (IMI), улучшению прочностных и ударных характеристик и изменению морфологии разрушения, что подтверждает перспективность вторичного использования ABS-отходов. В работе Ashfaq и соавт. (2021) установлено, что γ -индуцированная сшивка вторичного LLDPE в диапазоне доз 0–90 кГр позволяет получать

материалы с улучшенными сорбционными характеристиками по отношению к органическим загрязнителям, при этом микроструктурные и механические изменения коррелируют с функциональными свойствами адсорбции.

Таким образом, радиационная сшивка вторичных полимеров может существенно повысить их эксплуатационный и функциональный потенциал при корректном подборе режимов обработки. Однако допустимый дозовый диапазон для рециклатов, как правило, оказывается более узким и в большей степени зависит от степени деградации и уровня загрязнения исходного материала. В ряде случаев требуется применение коагентов (ТАИС, 1,3-РВО и др.), а также строгий контроль дозиметрических и атмосферных условий обработки. Для полиолефинов в типичных условиях оптимальный диапазон доз часто лежит в пределах порядка 50–200(300) кГр, при которых достигается благоприятное сочетание роста модуля упругости, прочности и износостойкости. При превышении этих значений или при проведении процесса в окислительной атмосфере возрастает вероятность деструкции, сопровождаемой снижением относительного удлинения.

По данным морфологических исследований, выполненных методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), радиационная обработка приводит к упрочнению межфазных границ и более устойчивому удержанию дисперсных фаз в полимерной матрице. Эти выводы согласуются с обобщающими обзорами по воздействию ионизирующего излучения на термопласты (Billiet et al., 2013; Covas et al., 2011).

2.1. Области применения радиационной сшивки

Современные области применения радиационной сшивки охватывают широкий спектр отраслей, включая электротехнику, строительство, автомобилестроение, упаковочную промышленность, медицину и экологически ориентированные технологии переработки пластмасс. В первую очередь технология была адаптирована к первичным термопластичным полимерам, таким как полиэтилен низкой и высокой плотности (LDPE и HDPE), полипропилен (PP), поливинилхлорид (PVC), этиленвинилацетат (EVA), политетрафторэтилен (PTFE), а также их сополимеры (Ishihara et al., 2020; Khodkar et al., 2011). В этом случае основной задачей радиационной сшивки является повышение эксплуатационных характеристик – термостойкости, стойкости к механическому износу, сопротивления трещинообразованию под нагрузкой, а также улучшение барьерных и электроизоляционных свойств. Одним из характерных примеров является производство термоусаживаемых труб и муфт из радиационно-сшитого полиэтилена, используемых в системах горячего водоснабжения и отопления, где требуется сочетание гибкости и устойчивости к температурам до 200 °С (Krieguer et al., 2024; Jabbari & Nozari, 2000).

В электротехнической промышленности радиационно-сшитые полиолефины широко используются в качестве кабельной изоляции, особенно в условиях повышенных температур и влажности. Например, LDPE, подвергнутый электронно-лучевой обработке в диапазоне доз порядка 150–200 кГр, демонстрирует снижение поляризуемости и токов утечки, а также повышенную устойчивость к электрическому пробое. В упаковочной промышленности технология применяется для получения тонких, прочных и термостабильных плёнок на основе этиленвинилацетата (EVA) и полиолефинов, используемых для упаковки пищевых продуктов, медицинских изделий и электроники (Khosroshahi et al., 2025; Jaganathan et al., 2015).

В медицинских применениях радиационно-сшитые материалы используются при изготовлении имплантатов, катетеров и мембран, где требуется стабильность свойств при последующей радиационной стерилизации и химическая инертность по отношению к биологическим средам. Следует подчеркнуть, что в данном случае радиационная сшивка и стерилизация представляют собой разные технологические стадии с различными дозовыми окнами (Hasan et al., 2024; Gluszewski et al., 2018).

С развитием концепции устойчивого производства радиационная сшивка всё шире применяется и в отношении вторичных полимеров. Учитывая ухудшение механических и оптических свойств в результате термической и механической переработки, задача восстановления структуры и повышения эксплуатационного потенциала рециклатов выходит на первый план. Наибольшее внимание уделяется вторичному полиэтилену и полипропилену, которые составляют основную долю твёрдых бытовых пластиковых отходов. При корректном подборе дозы облучения (типично в диапазоне 100–250 кГр для полиолефинов) возможно частичное восстановление прочности, повышение стойкости к термоокислению и термической деформации, а также снижение водопоглощения. В строительной индустрии вторично сшитый полиэтилен применяется для изготовления технических плит, гидроизоляционных покрытий и трубных соединений, сопоставимых по характеристикам с изделиями из первичного сырья (Krzeminski et al., 2010; Leisen et al., 2015). В сельском хозяйстве радиационно-модифицированные полимеры используются в дренажных системах, парниковых укрытиях и мульчирующих материалах с повышенной стойкостью к ультрафиолетовому излучению (Choi et al., 2009; Mendizabal et al., 1996).

Кроме того, метод радиационной сшивки применяется при создании композитных материалов и полимерных сплавов, где требуется сочетание жёсткости, эластичности и химической инертности. Радиационно-модифицированные полиолефины демонстрируют повышенную совместимость с наполнителями (талък, графит, микрокальцит), что позволяет получать армированные материалы для автомобильной и авиационной промышленности. Перспективным направлением является также радиационная модификация биоразлагаемых и возобновляемых полимеров, включая полилактид (PLA), полигидроксиалканоаты (PHA) и термопластичный крахмал, где низкодозовое облучение может способствовать структурной стабилизации и улучшению эксплуатационной надёжности (Stephen et al., 2006).

Инновационным направлением остаётся разработка радиационно-сшитых мембран и ионообменных материалов для электрохимических приложений, включая топливные элементы, аккумуляторы и системы водоочистки. Применение радиационной технологии позволяет варьировать пористость, смачиваемость и электропроводность мембранной структуры (Voit et al., 2010; Novikov et al., 2019).

Таким образом, радиационно-сшитые полимеры находят применение в широком спектре отраслей – от электроники и медицины до строительства и переработки отходов. Их использование обеспечивает технологические преимущества по сравнению с традиционными материалами, особенно в условиях растущих требований к долговечности, надёжности и экологической безопасности продукции (Tsai et al., 2021; Ovsík et al., 2019).

2.2. Механические свойства первичных и вторичных полимеров после радиационной сшивки

Радиационная сшивка формирует в полимерной матрице пространственную сеть, что приводит к перераспределению нагрузки между макромолекулярными цепями и ограничению их относительного скольжения. На макроуровне это, как правило, проявляется ростом модуля упругости и твёрдости, снижением ползучести и скорости релаксации напряжений, а также повышением размерной стабильности при длительном нагружении. Одновременно вследствие уменьшения подвижности цепей и укорочения путей деформации уменьшается предельное удлинение при разрыве; изменения прочности при растяжении и ударной вязкости носят, как правило, нелинейный характер и зависят от дозы облучения и химической природы полимера (Manas et al., 2018; Rellve et al., 2021).

Реологический и механический отклик во многих полимерных системах носит колоколообразный характер: при низких дозах облучения преобладают процессы сшивки, что сопровождается упрочнением материала (увеличение модуля хранения E' по данным динамического механического анализа (DMA), рост прочности и предела текучести, снижение ползучести). При превышении оптимального дозового окна возрастает вклад процессов цепного расщепления, что может приводить к охрупчиванию материала и снижению ударной

вязкости. Существенное влияние оказывают атмосфера облучения (присутствие кислорода стимулирует радиационное окисление и трещинообразование), скорость дозы, температура и наличие коагентов, смещающих баланс между сшивкой и деструкцией (Touati et al., 2007; Ramaraj, 2007).

Радиационная сшивка преимущественно протекает в аморфных областях полимера, «фиксируя» подвижность межламеллярных связей и усиливая роль связующих молекулярных фрагментов между кристаллитами. Для LDPE и EVA это проявляется в выраженном повышении сопротивления ползучести и термомеханической стабильности; в HDPE эффект особенно заметен при длительном нагружении, где подавляется вторичная ползучесть. В случае полипропилена конкуренция процессов сшивки и деструкции выражена сильнее, и достижение прироста прочности и ударной вязкости возможно лишь в узких дозовых окнах и/или при использовании коагентов. Для PET и других полиэфилов при γ - и электронно-лучевом облучении чаще доминирует цепное расщепление, поэтому необходима аккуратная настройка доз и модификация состава (компатибилизация, стабилизация) для предотвращения охрупчивания (Ping et al., 2011; Ortega et al., 2023).

Для вторичных полимеров наблюдаются в целом сходные закономерности изменения свойств под действием радиационной сшивки, однако оптимальные дозовые диапазоны, как правило, оказываются более узкими и в большей степени зависят от степени деградации, загрязнённости и истории переработки исходного материала (Clough, 2001).

Для первичных полиолефинов, прежде всего полиэтилена (LDPE, LLDPE, HDPE), радиационная сшивка обычно сопровождается ростом начального модуля упругости, снижением деформации ползучести и повышением стойкости к растрескиванию под напряжением (ESCR), при относительно умеренных изменениях прочности при разрыве и снижении относительного удлинения. В случае полипропилена (ударопрочного PP) возможно увеличение модуля и температуры тепловой деформации (HDT), однако без применения коагентов и антиоксидантов возрастает риск охрупчивания, проявляющегося в снижении удлинения при разрыве и ударной вязкости. Сополимеры типа EVA и полиолефиновые эластомеры характеризуются высокой склонностью к сшивке; для них типичен рост упругой составляющей деформации и повышение стойкости к циклическим нагрузкам, тогда как баланс между прочностью и эластичностью определяется содержанием винилацетатных фрагментов и дозой облучения. Для полиамидов и полиэфилов радиационная обработка вызывает дозозависимые изменения, при которых возможен прирост модуля упругости при одновременном риске снижения ударной вязкости; в этих системах особенно критичны условия облучения (влажность, присутствие кислорода) и применение стабилизаторов.

Для вторичных полимеров характерны более широкое распределение молекулярных масс, наличие остаточных окислительных дефектов, загрязнений и ухудшенная межфазная адгезия в смесях, что определяет их повышенную чувствительность к режимам облучения. В этих системах радиационная сшивка используется, во-первых, для реологической стабилизации – ограничения роста показателя текучести расплава при повторных переработках и снижения чувствительности к термоокислительной деградации, и, во-вторых, для частичного восстановления механических свойств за счёт повышения модуля упругости, ползучестойкости и локального «сшивания» межфазных областей в смесях типа PE/PP (Ogul, 2022).

При этом относительное удлинение при разрыве у рециклатов, как правило, снижается быстрее, чем у первичных аналогов, что отражает накопление дефектов цепной структуры. Поэтому для смесей вторичных полиолефинов целесообразно применение компатибилизаторов и коагентов, а также антиоксидантной защиты и дегазации для минимизации пост-облучательного окисления и деструкции (Rimdisit et al., 2012).

Данные динамического механического анализа (DMA) показывают, что после радиационной сшивки модуль хранения E' в температурной области выше температуры стеклования (T_g) возрастает, тогда как амплитуда пика $\tan \delta$ уменьшается, что отражает

ограничение подвижности макромолекулярных цепей и снижение внутренних потерь. Эти изменения коррелируют с ростом усталостной долговечности и уменьшением гистерезисных потерь. В режиме малоциклового усталости наблюдается увеличение числа циклов до зарождения трещины, а в многоциклового усталости – смещение кривых S-N в область более высоких напряжений, что указывает на повышение сопротивления усталостному разрушению. Эффект наиболее выражен для полиолефинов с развитой аморфной фазой (Novikov et al., 2018).

Изменения ударной вязкости носят нелинейный характер. При умеренных степенях сшивки возможен её рост за счёт подавления микроползучести и стабилизации морфологии, тогда как при переоблучении наблюдается снижение вследствие охрупчивания аморфной фазы и накопления дефектов цепной структуры. Для полипропилена и полиэтилентерефталата существенны скорость дозы и атмосфера облучения, тогда как для EVA и LDPE чаще наблюдается сохранение или улучшение ударной вязкости в оптимальных дозовых диапазонах (Oshima et al., 1997).

Анализ литературы позволяет сформулировать ряд практических соображений. Подбор дозового окна целесообразно осуществлять для каждого конкретного полимера или смеси с учётом целевых эксплуатационных свойств и допустимого уровня охрупчивания. Для вторичных полимеров рекомендуется предусматривать стабилизацию антиоксидантами, применение коагентов и компатибилизаторов в смесях, а также контроль показателя текучести расплава и летучих продуктов деградации. В ряде работ подчёркивается важность пост-облучательного контроля свойств через 1–4 недели для учёта эффектов послеоблучательного окисления и дополнительного формирования сетки, а также оценки трибологических и ударных характеристик при температурах и скоростях деформации, релевантных условиям эксплуатации изделия (Pirvu et al., 2024; Svoboda, 2016).

В целом радиационная сшивка позволяет повысить жёсткость, ползучесть и термомеханическую стабильность как первичных, так и вторичных полимеров при корректном подборе дозы облучения и состава материала. Возможным компромиссом при этом является уменьшение относительного удлинения и частичная утрата термопластичных свойств, что необходимо учитывать при последующей переработке. Для вторичных полимеров корректно настроенная радиационная сшивка может служить эффективным инструментом восстановления эксплуатационных характеристик и поддержания качества материала при многократной переработке (Svarcova et al., 2025; Haji-Saeid et al., 2005).

В качестве иллюстрации экспериментальной реализации следует привести работу Kurbanova и соавт. (2023), в которой исследовано влияние электронно-лучевого облучения (энергия электронов 2,7 МэВ; суммарные дозы 50–400 кГр) на механические и трибологические свойства листов полиэфирэфиркетона (PEEK). Показано, что коэффициент трения уменьшается и достигает минимума порядка 0,18 при дозе около 100 кГр, тогда как удельная скорость изнашивания снижается более чем втрое – с $\sim (13,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$ до $\sim (4,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$ мм³·Н⁻¹·м⁻¹ при дозе 200 кГр. Микротвёрдость возрастает с 0,191 до 0,222 ГПа при дозе 300 кГр. Структурный анализ выявил уширение рентгеновских дифракционных пиков при сохранении кристаллической решётки, а данные дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) и термогравиметрического анализа (TGA) указывают на незначительный сдвиг температуры плавления и сохранение температуры термической деградации в пределах экспериментальной погрешности, за исключением образцов, обработанных при максимальной дозе 400 кГр.

На рисунке 2 представлены значения твёрдости по Мартенсу (НМ) образцов PEEK до и после электронно-лучевой обработки. Данные заимствованы и адаптированы из работы Kurbanova и соавт. (2023). Облучение приводит к росту микротвёрдости всех образцов по сравнению с исходным материалом; максимальное значение ($\approx 0,222$ ГПа) наблюдается для образца PEEK-5, соответствующего дозе 300 кГр, тогда как для необлучённого PEEK микротвёрдость составляет 0,191 ГПа.

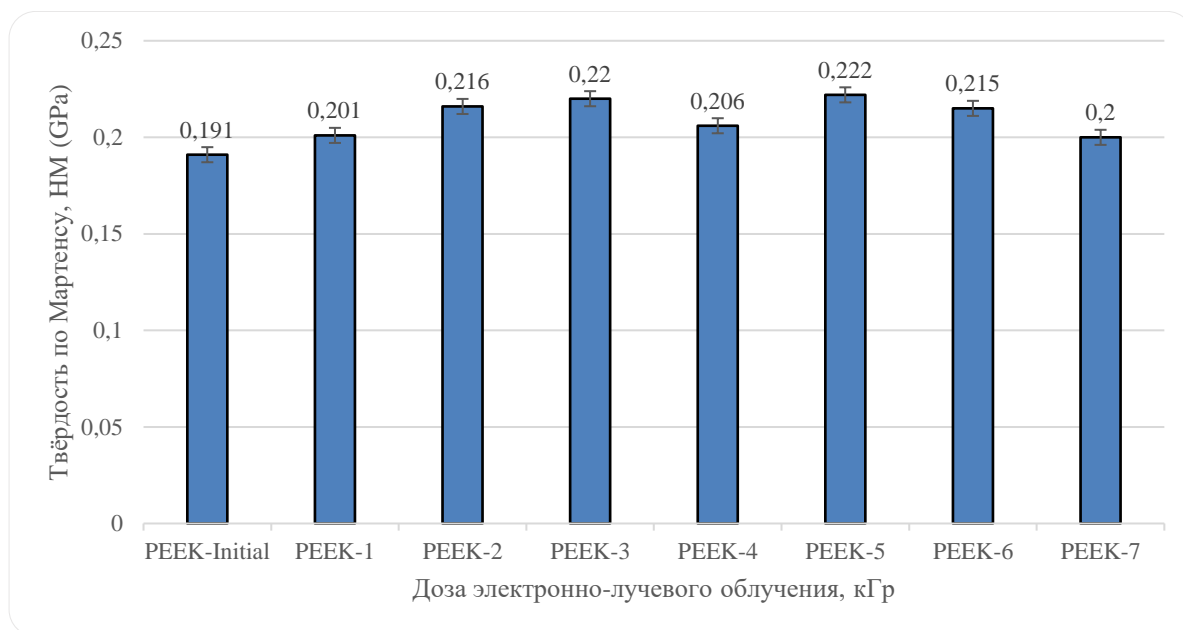


Рисунок 2. Изменение твёрдости по Мартенсу (НМ) РЕЕК в зависимости от дозы электронно-лучевого облучения

В работе Schneider и соавт. (2024) исследовано влияние электронно-лучевой обработки (порядка 50–300 кГр) на морфологию и свойства смесей линейного полиэтилена низкой плотности (LLDPE) и полидиметилсилоксана (PDMS), а также нанокомпозитов на их основе. После облучения, в оптимальном дозовом диапазоне, наблюдается рост гелевой фракции и усиление межфазной адгезии, сопровождаемые увеличением прочности при разрыве и модуля упругости при одновременном снижении относительного удлинения. По данным динамического механического анализа, возрастает модуль хранения, тогда как положения термических переходов изменяются незначительно, что согласуется с переходом от двухфазной морфологии к более связной, эффективно однофазной структуре.

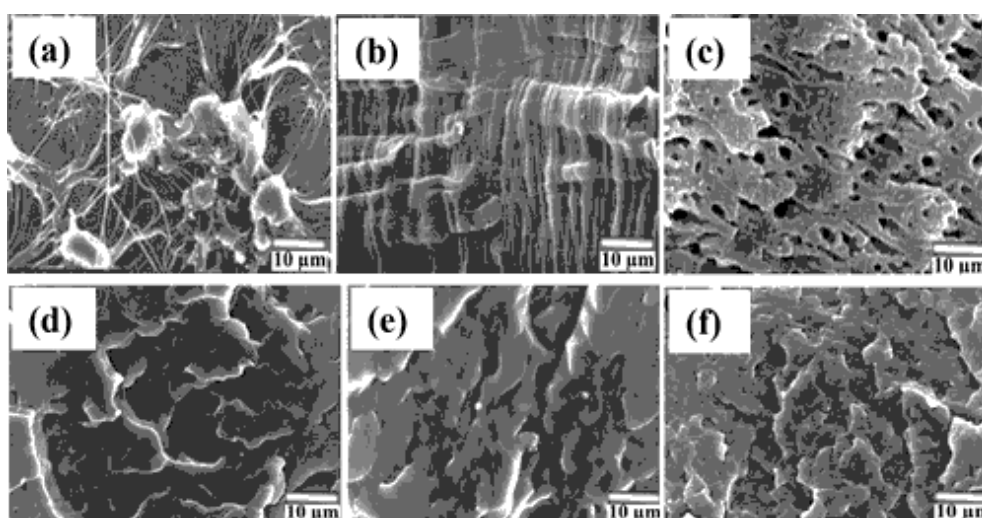


Рисунок 3. СЭМ-изображения (a) LL100, (b) PD100, (c) LL50 до облучения электронным пучком и (d) LL100, (e) PD100 и (f) LL50 после облучения электронным пучком при 100 кГр

Морфологические изменения иллюстрируются на рисунке 3, где показаны СЭМ-изображения чистого LLDPE, PDMS и их смеси до и после электронно-лучевого облучения. До обработки наблюдается отчётливо выраженная двухфазная структура с дисперсными доменами силиконового каучука в полиэтиленовой матрице, тогда как после облучения и последующего селективного травления домены PDMS сохраняются и не удаляются растворителем, что указывает на их сшивку и прочное прикрепление к матрице LLDPE. В результате формируется более однородная морфология с повышенной межфазной связностью, что коррелирует с ростом механических и реологических характеристик материала.

В таблице 1 представлены сравнительные данные по влиянию радиационной сшивки на механические свойства первичных и вторичных полимерных материалов на основе обобщения литературных источников.

Таблица 1. Сравнительные данные по механическим свойствам первичных и вторичных полимеров после радиационной сшивки

Полимер/система	Диапазон доз (кГр)	Основные эффекты	Компромиссы	Источник
PEEK	50–400	↓коэф. трения (~0.18 при 100 кГр), ↑твёрдость, ↑износостойкость	Оптимум 200–300 кГр; при 400 кГр – деградация	Kurbanova et al., 2023 (Polymers)
LDPE	40–120	↑ σ_b (+51% при 120 кГр), ↓ ϵ_r , улучшение <i>shape-memory</i>	Рост свойств до 120 кГр, затем охрупчивание	Wang et al., 2013 (Journal of Applied Polymer Science)
HDPE/PU	50–250	↑прочность, ↑термостабильность, ↓ ϵ_r	Компромисс «жёсткость–растяжимость»	Jeong et al., 2022 (Polymers)
LLDPE/PDMS	50–300	↑адгезия фаз, ↑ σ_b и модуль, ↓ ϵ_r , стабильность морфологии	Увеличение жёсткости при падении эластичности	Rahaman et al., 2023 (ACS Omega)
PP+TAIC	50–200	Формирование сетки, ↑микромеханика	Требуется TAIC; без него охрупчивание	Ovsik et al., 2021 (Materials)
PA-6 (virgin/recyc.)	50–200	Стабилизация реологии, ↑перерабатываемость	Зависит от исходного состояния рециклата	Zhao et al., 2003 (Carbohydrate Polymers)
wABS + 1,3-PBO	50–250	↑прочность, ↑ударная вязкость, укрепление межцепных связей	Оптимум ~100–200 кГр	Steleescu et al., 2018 (Polymers)
rLLDPE	0–90	Образование геля, ↑адсорбция органических веществ	Узкое дозовое окно, при превышении охрупчивание	Sutekin et al., 2019 Applied Radiation and Isotopes

Как следует из приведённых данных, для первичных полимеров радиационная сшивка, как правило, приводит к увеличению модуля упругости и твёрдости, снижению ползучести и повышению усталостной и износостойкости. Для вторичных материалов дополнительным эффектом является укрепление межфазных границ и стабилизация реологических характеристик, что способствует повышению механической надёжности композиций на основе PE/PP при повторной переработке. Максимальный эффект достигается в оптимальном дозовом диапазоне; при этом возможным компромиссом является снижение относительного

удлинения и перерабатываемости, что требует подбора дозы и условий облучения с учётом целевых свойств материала (Ghobashy et al., 2016; Gao et al., 2017).

2.3. Техничко-экономическая эффективность и преимущества радиационной сшивки

Радиационная сшивка рассматривается в литературе как один из промышленных методов модификации полимерных материалов, который может обеспечивать технологические и потенциальные экономические преимущества по сравнению с химическими способами сшивки в ряде прикладных областей. К ключевым особенностям метода относится возможность регулирования степени сшивки за счёт параметров облучения (доза, мощность пучка, время воздействия) без применения химических инициаторов, растворителей и побочных реагентов. Это снижает потребность в последующей очистке продукции и обращении с отходами и делает технологию потенциально применимой в областях с жёсткими санитарными и экологическими требованиями, включая медицинские изделия и материалы для пищевой упаковки (Tretinnikov et al., 1998; Schneider et al., 2019).

Дополнительным технологическим преимуществом является возможность проведения радиационной обработки при комнатной температуре, что отличает её от термохимических методов, где сшивка обычно осуществляется при повышенных температурах (порядка 150–200 °С и выше). Вместе с тем энергетическая и экономическая эффективность радиационной обработки существенно зависят от типа оборудования, требуемой дозы, геометрии изделий и коэффициента загрузки линии, что ограничивает универсальность количественных оценок и требует явного указания допущений (Berejka, 2010).

В литературе экономические показатели электронно-лучевой обработки (e-beam), включая стерилизацию и радиационную модификацию полимеров, как правило, приводятся в виде диапазонов оценок при заданных условиях эксплуатации. По данным обзорных работ и отчётов Международного агентства по атомной энергии (IAEA), удельная стоимость e-beam-обработки пластиковых изделий может варьироваться в пределах приблизительно 1–5 USD/кг в зависимости от требуемой дозы (типично 10–25 кГр для стерилизации и десятки–сотни кГр для радиационной сшивки термопластов), производительности линии (десятки–сотни кг/ч), формы и толщины изделий, а также коэффициента загрузки оборудования и логистики процесса (IAEA, 2015). Важно подчеркнуть, что стерилизационные дозы (обычно 15–25 кГр) и дозы радиационной сшивки термопластов относятся к разным технологическим задачам и не должны рассматриваться в одном экономическом контексте.

Капитальные и эксплуатационные затраты электронно-лучевых установок. Капитальные затраты (CAPEX) на создание электронно-лучевой линии включают стоимость ускорителя, радиационной защиты, систем транспортировки, дозиметрии и сопутствующей инфраструктуры. По данным технических обзоров и отраслевых публикаций, стоимость промышленного электронного ускорителя мощностью порядка 50–100 кВт с необходимой инфраструктурой оценивается ориентировочно в диапазоне ≈1,5–3,0 млн USD, при этом конкретные значения зависят от конфигурации линии, требований к радиационной безопасности и региональных условий.

Эксплуатационные затраты (OPEX) включают расходы на электроэнергию, персонал, техническое обслуживание, дозиметрический контроль и амортизацию оборудования. При типичных тарифах на электроэнергию (≈0,05–0,10 USD/кВт·ч) энергозатраты для ускорителя мощностью 50–100 кВт могут составлять порядка (0,1–0,3) млн USD в год, однако итоговая себестоимость обработки существенно зависит от фактической загрузки оборудования, режима работы и организации производственного процесса (Berejka, 2010; IAEA, 2015).

Энергоэффективность и экологические аспекты. Сравнительные оценки энергопотребления показывают, что электронно-лучевые процессы в ряде случаев обладают более высокой энергоэффективностью по сравнению с некоторыми традиционными термохимическими технологиями, особенно в процессах поверхностной модификации, отверждения покрытий и текстильной обработки. В частности, в обзорах указывается, что e-

beam-методы могут обеспечивать снижение удельного энергопотребления и связанных с ним выбросов CO₂ по сравнению с растворными или термическими процессами, однако такие сравнения корректны только при сопоставимых функциональных результатах и строго заданных условиях процесса (Wach et al., 2003; Lee et al., 2023). В этом контексте радиационная обработка часто рассматривается как потенциально «зелёная» технология, поскольку она не требует использования растворителей и может быть интегрирована в замкнутые производственные циклы. Вместе с тем количественные оценки сокращения выбросов CO₂ и энергозатрат остаются чувствительными к методике расчёта и принятым допущениям, что подчёркивается в современных обзорах (Krieguer, 2024).

Применение к первичным и вторичным полимерам. В отношении первичных термопластов радиационная сшивка используется для расширения температурного и эксплуатационного диапазона изделий. Так, радиационно-сшитый полиэтилен (PEX) способен сохранять механическую стабильность при температурах до ~200 °С, тогда как обычный полиэтилен размягчается при ~90–110 °С. Это позволяет применять более тонкостенные конструкции и повышать надёжность изделий, что в ряде случаев компенсирует более высокую стоимость обработки (Yamashita et al., 2016; Zhao et al., 2021).

Для вторичных полимеров радиационная сшивка рассматривается как один из инструментов компенсации деградации структуры, возникающей при повторной переработке. Экспериментальные исследования показывают, что при оптимизированных дозах (порядка 100–250 кГр, в зависимости от полимера) возможно формирование пространственной сетки без выраженной деструкции, что делает метод сопоставимым по эффективности с использованием химических модификаторов (Kaminskaya et al., 2008). Однако экономическая целесообразность такого подхода требует индивидуальной оценки с учётом стоимости энергии, оборудования и альтернативных технологий модификации.

Сравнение радиационной сшивки с химическими методами (например, пероксидной сшивкой) показывает, что радиационный подход обеспечивает более гибкое управление степенью сшивки за счёт изменения параметров облучения. Вместе с тем утверждения о безусловном экономическом преимуществе радиационной технологии по сравнению с химическими методами не являются универсальными и зависят от масштаба производства, типа полимера и требований к конечному продукту. В литературе подчёркивается, что корректное технико-экономическое сравнение возможно только при анализе конкретных производственных сценариев (Svarcova et al., 2025; Calina et al., 2025).

В целом радиационная сшивка рассматривается как перспективная технологическая платформа для модификации как первичных, так и вторичных полимеров. Её применение может быть оправдано при соответствующем масштабе производства и строгом учёте эксплуатационных и экологических требований. В условиях ужесточения экологического регулирования и роста интереса к циркулярной экономике значимость таких технологий, вероятно, будет возрастать (Zhang, 2022; Zhou, 2012).

3. Ограничения и риски радиационной сшивки

Несмотря на продемонстрированные технологические и эксплуатационные преимущества радиационной сшивки полимеров, её практическое применение требует учёта ряда ограничений и потенциальных рисков, связанных как с физико-химической природой радиационного воздействия, так и с особенностями переработки и эксплуатации получаемых материалов.

Радиационное окисление (роль O₂)

При радиационной сшивке полимеров в присутствии кислорода значительную роль играют процессы радиационно-индуцированного окисления, обусловленные реакциями макрорадикалов с молекулярным O₂. Образующиеся пероксидные и гидропероксидные группы (-OO•, -OOH) инициируют вторичные цепные реакции, приводящие к частичной

деструкции макромолекулярных цепей и изменению структуры полимерной сетки (Singh et al., 2014).

В таблице 2 приведено влияние атмосферы облучения на характер радиационно-индуцированных процессов и эксплуатационные свойства радиационно-сшитых полимеров, включая доминирующие механизмы окисления и связанные с ними изменения механических характеристик.

Таблица 2. Влияние кислорода на свойства радиационно-сшитых полимеров

Условия облучения	Доминирующие процессы	Изменение свойств
Воздух	Пероксирадикалы, окисление	↓ ϵ_r , ↑ хрупкость, трещины
Азот	Сшивка преобладает	Более стабильная механика
Вакуум	Максимум сшивки	Минимум деградации
Воздух + АО	Частичное подавление окисления	Ограниченный эффект при высоких дозах

Образующиеся в присутствии O_2 пероксидные и гидропероксидные структуры сохраняют химическую активность и после завершения радиационного воздействия, что приводит к развитию пост-облучательных процессов и обуславливает временную нестабильность свойств радиационно-сшитых материалов.

Пост-облучательное старение

Пост-облучательное старение радиационно-сшитых полимеров связано с наличием долгоживущих макрорадикалов и продуктов радиационного окисления, способных инициировать вторичные цепные реакции в период хранения. Экспериментально установлено, что для полиолефинов (PE, PP) концентрация активных радикальных центров может сохраняться в течение 10^2 – 10^3 часов, что сопровождается постепенными изменениями механических, реологических и термомеханических характеристик в течение нескольких недель и месяцев после обработки.

В указанный период для полиэтилена и этиленвинилацетата наблюдается снижение относительного удлинения при разрыве на 15–40 % при сравнительно малых изменениях прочности, тогда как для полипропилена пост-облучательные эффекты выражены сильнее и могут сопровождаться дополнительным снижением ударной вязкости на 20–50 %. Реологические параметры также изменяются во времени: показатель текучести расплава, как правило, снижается на 10–30 % в течение первых 1–3 недель после облучения вследствие продолжающегося роста гелевой фракции и уплотнения пространственной сетки.

Выраженность пост-облучательного старения определяется условиями облучения и хранения и существенно усиливается при обработке и хранении в присутствии кислорода. Облучение в инертной атмосфере, применение антиоксидантов и снижение времени контакта материала с кислородом приводят к уменьшению амплитуды временных изменений свойств и более быстрой стабилизации характеристик радиационно-сшитых полимеров (Relleve et al., 1997).

Перерабатываемость сшитых материалов

Увеличение степени радиационной сшивки приводит к росту гелевой фракции и резкому снижению текучести расплава, что является одним из ключевых технологических ограничений данной методики. При достижении гелевой фракции порядка 20–30 % наблюдается значительное снижение показателя текучести расплава, затрудняющее переработку методом экструзии, а при значениях выше 40–50 % материал фактически утрачивает термопластичное поведение и способность к повторному плавлению. В этих условиях переработка стандартными методами экструзии, литья под давлением и термоформования становится

технологически невозможной, поскольку материал не переходит в вязкотекучее состояние и не способен к формированию однородного расплава.

Данное ограничение приобретает особую значимость для вторичных полимеров и многокомпонентных систем, где наличие остаточных примесей, продуктов предшествующей термоокислительной деградации и неоднородное распределение молекулярной массы приводят к сужению допустимого дозового окна радиационной обработки. В таких системах даже умеренное увеличение дозы может сопровождаться непропорционально быстрым ростом гелевой фракции и потерей перерабатываемости, что существенно осложняет промышленную реализацию технологии и снижает потенциал последующего механического рециклинга.

4. Радиационная сшивка полимеров в Казахстане

Радиационная обработка полимеров в Республике Казахстан осуществляется на ограниченном числе специализированных площадок, оснащённых промышленными ускорителями и инфраструктурой радиационной безопасности. Ведущей организацией в данной области является Республиканское государственное предприятие «Институт ядерной физики» (ИЯФ, Алматы), оснащённое электронно-лучевыми установками, системами дозиметрического контроля и сертифицированной системой менеджмента качества, соответствующей международным стандартам, в том числе ISO 11137, и обладающее инфраструктурой для радиационной модификации полимерных материалов. Важно подчеркнуть, что в рамках радиационной обработки на данных площадках реализуются два принципиально различных класса процессов: радиационная стерилизация и радиационная модификация (включая сшивку) полимеров. Радиационная стерилизация направлена на снижение биологической нагрузки и достижение заданного уровня стерильности (Sterility Assurance Level, SAL) и осуществляется, как правило, при дозах порядка 15–25 кГр в соответствии с международными стандартами (ISO 11137, ISO/ASTM 51649). Напротив, радиационная модификация и сшивка полимеров преследуют цель изменения структуры и эксплуатационных свойств материала и требуют существенно более высоких доз, обычно в диапазоне десятков–сотен кГр, в зависимости от типа полимера, наличия соагентов, атмосферы облучения и требуемой степени сшивки.

На базе ИЯФ в настоящее время промышленно реализуется радиационная стерилизация медицинских изделий, а также пилотные и контрактные проекты по радиационной модификации полимерных материалов, включая сшивку гидрогелей и отдельных термопластов. Реализация указанных направлений подтверждается официальной документацией института и материалами региональных программ МАГАТЭ (Международного агентства по атомной энергии), ориентированных на эксплуатацию электронно-лучевых установок, дозиметрическое сопровождение и внедрение систем качества.

Дополнительной площадкой является АО «Парк ядерных технологий» (Курчатов), где функционируют электронно-лучевые установки, используемые для стерилизации медицинской продукции и радиационной модификации полимерных изделий в опытно-промышленном и контрактном форматах.

Отдельно следует отметить ускорительный комплекс DC-60 (филиал ИЯФ, Астана), представляющий собой тяжёло-ионный циклотрон, применяемый преимущественно для формирования ионных треков в полимерных плёнках (например, PET) с последующим химическим травлением и получением трек-травлённых мембран. Данная технология относится к ионно-лучевой модификации и не является электронно-лучевой сшивкой термопластов в промышленном применении.

Как следует из таблицы 3, на практике в Республике Казахстан реализуются три основных направления применения радиационных технологий в отношении полимеров. Первое направление связано с электронно-лучевой сшивкой гидрогелей и других гидрофильных матриц с целью управления гелевой фракцией и степенью набухания при одновременном обеспечении стерильности изделий. Второе направление включает

электронно-лучевую модификацию и сшивку термопластов (PE, PP, EVA, PET), направленную на повышение термо- и износостойкости, снижение ползучести и реологическую стабилизацию, в том числе для вторичных полимерных материалов. Третье направление представлено ионно-лучевой модификацией плёнок PET с формированием ионных треков и их последующим проявлением методом селективного химического растворения, что позволяет получать трек-травлённые мембраны и функциональные композитные системы.

В таблице 3 приведён обзор основных площадок и характерных режимов радиационной сшивки полимеров в Республике Казахстан на основе открытых официальных источников и опубликованных данных.

Таблица 3. Площадки и режимы радиационной сшивки полимеров в Республике Казахстан

Площадка	Тип излучения	Полимерные системы	Типичные дозы сшивки (кГр)	Условия процесса
Алматы, РГП «Институт ядерной физики»	Электронный пучок	Гидрогели; PE, PP, EVA, PET	Гидрогели: 0,1–10; термопласты: 50–250	Воздух/ инертная атмосфера; возможно применение соагентов
Курчатов, АО «Парк ядерных технологий»	Электронный пучок	PE, PP, РЕЕК, функциональные композиты	50–300	Контролируемая атмосфера; серийная дозиметрия
Астана, филиал ИЯФ (DC-60)	Тяжёлые ионы	PET (Track-Etched Membrane)	-	Формирование треков и химическая обработка

Перспективы развития данной области связаны с интеграцией электронно-лучевых модулей в технологические линии экструзии и каландрирования, расширением номенклатуры полимерных материалов и изделий (включая кабельную изоляцию, геоматериалы и функциональную упаковку), а также с развитием и тиражированием стандартизированных процедур дозиметрии, контроля качества и межлабораторной калибровки дозиметрических систем.

5. Заключение

В настоящей обзорной работе рассмотрены физико-химические основы радиационной сшивки полимеров, её влияние на структуру и свойства различных полимерных систем, а также области применения и ограничения данного метода. Показано, что ионизирующее излучение инициирует образование активных радикалов в полимерной матрице, что при соответствующих условиях приводит к формированию пространственной сетки и сопровождается увеличением термостойкости, механической прочности и устойчивости материалов к внешним воздействиям.

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что радиационная сшивка может быть эффективно применена как к первичным, так и к вторичным полимерам, что делает её перспективным инструментом для повышения эксплуатационных характеристик материалов и продления жизненного цикла полимерных изделий. Вместе с тем достигаемые эффекты существенно зависят от типа полимера, дозы ионизирующего излучения, атмосферы облучения и состава материала, что требует тщательной оптимизации режимов обработки.

Показано, что радиационно-сшитые материалы находят применение в широком спектре отраслей – от кабельной и трубной продукции до медицины и машиностроения. Экономические и экологические аспекты использования данного метода указывают на его потенциальную конкурентоспособность по сравнению с химическими способами сшивки в

ряде прикладных контекстов, особенно в условиях ужесточения требований к экологической безопасности и устойчивому производству.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация – Л.Т., Г.С.; методология – Л.Т., А.К.; программное обеспечение – А.К., А.Б.; валидация – Г.С., А.Т.; формальный анализ – С.Г., А.Т.; исследование – Л.Т., А.К., А.Б.; ресурсы – Г.С.; курирование данных – Л.Т.; написание – подготовка оригинального черновика – Л.Т., А.К., А.Б.; написание – рецензирование и редактирование – Л.Т., Г.С.; визуализация – Г.С., А.Т.; руководство – Л.Т.; администрирование проекта – Г.С.; получение финансирования – Г.С. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Толымбекова, Лязат – кандидат технических наук, старший преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; tolymbekova_lb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3785-7943>

Казбекова, Айымжан – магистрант образовательной программы «М089-Химия», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; aiymzhanr2502@gmail.com

Бактыбек, Айша – магистрант образовательной программы «М089-Химия», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; aishabaktybek1@gmail.com

Сейтенова, Гайни – кандидат химических наук, доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; seitenova_gzh@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Турсынова, Арайлым – кандидат химических наук, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; tursynova_ak@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8957-039X>

9. Финансирование: BR24992883 «Создание научно-технологического парка нефтехимии и полимерных материалов для предоставления услуг и внедрения прикладных результатов НИР в приоритетные сектора экономики страны».

10. Благодарность: авторы выражают благодарность АО «Парк ядерных технологий». г. Курчатов.

11. Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Спонсоры не принимали участия в разработке исследования, сборе, анализе или интерпретации данных, написании рукописи или принятии решения о публикации результатов.

12. Список литературы

1. Ahmed, M. S., Zhang, Y., Chen, R., & Zhou, Y. (2024). A comprehensive review of radiation-induced hydrogels and crosslinked systems: methods, properties, and biomedical/industrial applications. *Gels*, 10(6), 381. <https://doi.org/10.3390/gels10060381>
2. Al Lafi, A. G., Parker, D., & Hay, J. N. (2015). The crosslinking of poly (ether ether ketone): Thermally and by irradiation. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(48), 41999. <https://doi.org/10.1002/app.41999>

3. Al-Gahtany, S. A., & Shokr, F. S. (2018). Synthesis and characterization of radiation crosslinked nano silver–polyvinyl alcohol/polyethylene oxide composites. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 57, 701–714. <https://doi.org/10.1080/00222348.2018.1516340>
4. Alavarse, A., Frachini, E., da Silva, R. C., Lima, V. H., Shavandi, A., & Petri, D. F. S. (2022). Crosslinkers for polysaccharides and proteins: synthesis conditions, mechanisms, and crosslinking efficiency: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 201, 459–475. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.029>
5. Ashfaq, A., Clochard, M. C., Coqueret, X., Dispenza, C., Driscoll, M. S., Ulański, P., & Al-Sheikhly, M. (2020). Polymerization reactions and modifications of polymers by ionizing radiation. *Polymers*, 12(12), 2877. <https://doi.org/10.3390/polym12122877>
6. Ashfaq, A., An, J., Ulański, P., & Al-Sheikhly, M. (2021). On the mechanism and kinetics of synthesizing polymer nanogels by ionizing radiation-induced intramolecular crosslinking of macromolecules. *Pharmaceutics*, 13(11), 1765. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13111765>
7. Azevedo, A. M., da Silveira, P. H. P. M., Lopes, T. J., da Costa, O. L. B., Monteiro, S. N., Veiga-Junior, V. F., Silveira, P. C. R., Cardoso, D. D., & Figueiredo, A. B. D. S. (2025). Ionizing radiation and its effects on thermoplastic polymers: an overview. *Polymers*, 17(8), 1110. <https://doi.org/10.3390/polym17081110>
8. Borejka, A. J. (2010). Industrial radiation processing: trends and applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 79(4), 469–477. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2009.10.007>
9. Calina, I., Demeter, M., Scarisoreanu, A., Abbas, A., & Raza, M. A. (2025). Role of ionizing radiation techniques in polymeric hydrogel synthesis for tissue engineering applications. *Gels*, 11(1), 47. <https://doi.org/10.3390/gels11010047>
10. Cataldo, F., Ragni, P., & Ursini, O. (2007). Radiation-induced polymerization of β (-) pinene: a further insight. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 272(1), 29–36. <https://doi.org/10.1007/s10967-006-6833-0>
11. Charlesby, A. (1967). Radiation mechanisms in polymers. In *Radiation chemistry of polymeric systems*. American Chemical Society, 1–21. <https://doi.org/10.1021/ba-1967-0066.ch001>
12. Chapiro, A. (1962). *Radiation chemistry of polymeric systems*. Interscience.
13. Chen, J., Asano, M., Yamaki, T., & Yoshida, M. (2006). Chemical and radiation crosslinked polymer electrolyte membranes prepared from radiation-grafted ETFE films for DMFC applications. *Journal of Power Sources*, 158, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.09.024>
14. Cleland, M. R., Parks, L. A., & Cheng, S. (2003). Applications for radiation processing of materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 208(1–2), 66–73. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)00655-4](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00655-4)
15. Clough, R. L. (2001). High-energy radiation and polymers: a review of commercial processes and emerging applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 185(1-4), 8–33. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)00837-1](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00837-1)
16. Coqueret, X. (2024). Radiation-induced cross-linking polymerization: recent developments for coating and composite applications. *Nukleonika*, 69(1), 1-10. <https://doi.org/10.2478/nuka-2024-0006>
17. Covas, J. A., Pessan, L. A., Machado, A. V., & Larocca, N. M. (2011). Polymer blend compatibilization by copolymers and functional polymers. In: *Polymer blends*, 315–356.
18. Darwis, D., Erizal, B., Abbas, B., Nurlidar, F., & Putra, D. P. (2015). Radiation processing of polymers for medical and pharmaceutical applications. *Macromolecular Symposia*, 353, 15–23. <https://doi.org/10.1002/masy.201550302>
19. Dole, M. (Ed.). (1972). *The radiation chemistry of macromolecules* (Vols. 1–2). Academic Press.
20. Elbarbary, A. A., El-Rehim, H. A., El-Sawy, N. M., Hegazy, E. S., & Soliman, E. A. (2017). Radiation-induced crosslinking of polyacrylamide incorporated low molecular weight natural

- polymers for possible use in agricultural applications. *Carbohydrate Polymers*, 178, 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.050>
21. Fujisato, T., Tomihata, K., & Ikada, Y. (1999). Cross-linking of amniotic membranes. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 10(11), 1171–1183. <https://doi.org/10.1163/156856299X00829>
 22. Ferry, M., Dispenza, C., Seguy, S., & Moise, I. M. (2020). Radiation effects in polymer materials: From mechanisms to applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 171, 108732. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108732>
 23. Gao, Q., Hua, J., Li, R., Xing, Z., Pang, L., Zhang, M., Xu, L., & Wu, G. (2017). Radiation-induced graft polymerization for the preparation of highly efficient UHMWPE fibrous adsorbent for Cr (VI) removal. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.08.004>
 24. Gao, Y., Zhou, D., Lyu, J., Xu, Q., Newland, B., Matyjaszewski, K., Tai, H., & Wang, W. (2020). Complex polymer architectures through free-radical polymerization of multivinyl monomers. *Nature Reviews Chemistry*, 4(4), 194–212. <https://doi.org/10.1038/s41570-020-0170-7>
 25. Gheysari, D., & Behjat, A. (2001). Radiation crosslinking of LDPE and HDPE with 5 and 10 MeV electron beams. *European Polymer Journal*, 37(10), 2011–2016. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(01\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(01)00084-2)
 26. Ghobashy, M. M., & Abdeen, Z. E. (2016). Radiation crosslinking of polyurethanes: Characterization by FTIR, TGA, SEM, XRD, and Raman spectroscopy. *Journal of Polymers*, 2016, 9802514. <https://doi.org/10.1155/2016/9802514>
 27. Głuszewski, W., Stasiak, A., Raszewska-Kaczor, A., & Kaczor, D. (2018). Effect of polyethylene cross-linking on properties of foams. *Nukleonika*, 63(2), 81–85. <https://doi.org/10.2478/nuka-2018-0010>
 28. Haji-Saeid, M., Sampa, M. H. O., & Chmielewski, A. G. (Eds.). (2005). Radiation processing of polymers. IAEA.
 29. Hara, M. (2022). Effects of ionizing radiation on biopolymers for applications as biomaterials. In *Biomedical Materials & Devices* (pp. 1–28). Springer. <https://doi.org/10.1007/s44174-022-00049-6>
 30. Hasan, M. K., Staack, D., Pillai, S. D., Fifield, L., & Pharr, M. (2024). Connecting radiation-driven changes in structural, thermal, and mechanical properties in several medical device polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 230, 110677. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110677>
 31. Hegazy, E. S. A., & Dessouki, A. M. (2007). Radiation-induced crosslinking and grafting of polymers. *Radiation Physics and Chemistry*, 76(8–9), 1365–1372. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2006.11.012>
 32. International Atomic Energy Agency. (2004). Radiation technology for polymers (Technical Reports Series No. 429). IAEA.
 33. International Atomic Energy Agency. (2020). Use of radiation processing to convert plastic waste into useful products (IAEA-TECDOC-1928). IAEA.
 34. International Atomic Energy Agency. (2021). Radiation effects on polymer materials commonly used in medical devices: CRP F23035 – 1st RCM report. IAEA.
 35. International Organization for Standardization. (2017). *ISO 11137-3: Sterilization of health care products - Radiation - Part 3: Guidance on dosimetry for sterilization*. ISO.
 36. Ishihara, R., Asai, S., & Saito, K. (2020). Recent progress in charged polymer chains grafted by radiation-induced graft polymerization. *Quantum Beam Science*, 4(2), 20. <https://doi.org/10.3390/qubs4020020>
 37. Jabbari, E., & Nozari, S. (2000). Swelling behavior of acrylic acid hydrogels prepared by γ -radiation crosslinking of polyacrylic acid. *European Polymer Journal*, 36(12), 2685–2692. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(00\)00044-6](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(00)00044-6)

38. Jaganathan, S., Balaji, A., Vellayappan, M., Subramanian, A. P., John, A. A., Asokan, M. K. U., & Supriyanto, E. (2015). Radiation-induced surface modification of polymers for biomaterial application. *Journal of Materials Science*, 50(5), 2007–2018. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8718-x>
39. Kalapakdee, S., Pongprayoon, T., Hemvichian, K., Suwanmala, P., & Kangsumrith, W. (2013). Mechanical properties of poly (lactic acid)/thermoplastic starch blends crosslinked by gamma radiation. *Advanced Materials Research*, 781–784, 467–470. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.781-784.467>
40. Kaminskaya, T. P., & Podshibyakin, S. V. (2008). Crosslinking of polymer–carbon composites for self-resetting fuses (Sshivka polimerno-uglerodnykh kompozitov dlya samozashchishchayushchikhsya predokhraniteley in Russian). *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*, 2, 143–144.
41. Khalil, A. A. (2023). The effects of gamma radiation on the microstructure and mechanical properties of polypropylene. *Sirte University Scientific Journal*, 13(2), 29–34. <https://doi.org/10.37375/susj.v13i2.2501>
42. Khodkar, F., & Ebrahimi, N. (2011). Effect of irradiation on mechanical and structural properties of EVA hollow fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 119, 2085–2092. <https://doi.org/10.1002/app.32926>
43. Khosroshahi, F. H., Kordi, F., & Tohidian, M. (2025). Preparation of cross-linked sponge with piezoelectric properties. *Polymers for Advanced Technologies*. <https://doi.org/10.1002/pat.70084>
44. Kimura, A., Yoshida, F., & Taguchi, M. (2020). Application of radiation crosslinking technique to gelatin scaffold development. *Radiation Physics and Chemistry*, 175, 109287. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109287>
45. Kolhe, A., Chauhan, A., & Dongre, A. (2022). A review on various methods for the cross-linking of polymers. *Research Journal of Pharmaceutical Dosage Forms and Technology*, 14(2), 183–188. <https://doi.org/10.52711/0975-4377.2022.00029>
46. Kremer, D., Seidl, B., Zitzenbacher, G., Lackner, M., & Buchberger, W. (2024). Increasing the melt viscosity of post-consumer recycled polypropylene via e-beam techniques. *Radiation Physics and Chemistry*, 222, 111846. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111846>
47. Kurbanova, B., Aimaganbetov, K., Ospanov, K., Abdrakhmanov, K., Zhakiyev, N., Rakhadilov, B., Sagdoldina, Z., & Almas, N. (2023). Effects of electron beam irradiation on mechanical and tribological properties of PEEK. *Polymers*, 15(6), 1340. <https://doi.org/10.3390/polym15061340>
48. Kume, T., Furuta, M., Todoriki, S., Uenoyama, N., & Kobayashi, Y. (2009). Status of food irradiation in the world. *Radiation Physics and Chemistry*, 78(3), 222–226. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2008.09.009>
49. Lapshin, V. P., & Voronkova, L. I. (2015). Radiation chemistry of polymers (Radiatsionnaya khimiya polimerov in Russian). Nauka.
50. Lee, J., Kim, H., & Park, J. (2021). Study of crystallization behaviour of electron beam irradiated HDPE and PP. *Royal Society Open Science*, 8(10), 202250. <https://doi.org/10.1098/rsos.202250>
51. Lee, J.-G., Jeong, J.-O., Jeong, S.-I., & Park, J.-S. (2021). Radiation-based crosslinking technique for enhanced thermal and mechanical properties of HDPE/EVA/PU blends. *Polymers*, 13(16), 2832. <https://doi.org/10.3390/polym13162832>
52. Lee, S., Park, Y. K., & Lee, J. (2023). Upcycling of plastic and tire waste toward use as modifier for asphalt binder. *Energy & Environment*, 35(4), 510–524. <https://doi.org/10.1177/0958305X231173999>
53. Leisen, C., Menacher, M., & Drummer, D. (2015). Influence of radiation cross-linking of polyamide 66 on vibration welding. *Polymer Engineering & Science*, 55(9), 2121–2128. <https://doi.org/10.1002/pen.24139>

54. Lenfeld, P., Brdlik, P., Boruvka, M., Behalek, L., & Habr, J. (2020). Effect of radiation crosslinking and surface modification of cellulose fibers. *Polymers*, 12(12), 3006. <https://doi.org/10.3390/polym12123006>
55. Manaila, E., Stelescu, & M., Craciun, G. (2012). Aspects regarding radiation crosslinking of elastomers. In *Elastomers* (pp. 83–108). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/47747>
56. Manas, D., Stanek, M., Manas, M., Müller, M., & Štěpánek, P. (2018). HDPE composite with recycled filler: Processing and properties. *Polymers*, 10(12), 1361. <https://doi.org/10.3390/polym10121361>
57. Mendizabal, E., Cruz, L., Jasso, C. F., Burillo, G., & Dakin, V. I. (1996). Radiation crosslinking of highly plasticized PVC. *Radiation Physics and Chemistry*, 47(2), 305–309. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(94\)00183-K](https://doi.org/10.1016/0969-806X(94)00183-K)
58. Mo, S. J., Zhang, J., Liang, D., & Chen, H. Y. (2013). Pyrolysis characteristics of cross-linked polyethylene cable material. *Procedia Engineering*, 52, 588–592. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.190>
59. Naikwadi, A. T., Sharma, B. K., Bhatt, K. D., & Mahanwar, P. A. (2022). Gamma radiation processed polymeric materials for high performance applications: a review. *Frontiers in Chemistry*, 10, 837111. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.837111>
60. Novikov, G. K., Fedchishin, V. V., & Kakorin, A. A. (2019). Mechanical strength and hardness of polymer materials radiation-crosslinked by X-ray emission (Mekhanicheskaya prochnost' i tverdost' polimernykh materialov, radiatsionno sshitykh rentgenovskim izlucheniem in Russian). *Electricity (Elektrichestvo)*, 9, 66–70.
61. Novikov, G. K., Fedchishin, V. V., & Smirnov, A. I. (2018). TSD spectroscopy of radiation-crosslinked cable polyethylene (Spektroskopiya TSD radiatsionno-sshitoho kabel'nogo polietilena in Russian). *Plasticheskie massy (Plastics)*, 9–10, 41–43.
62. Ogul, H. (2022). Radiation attenuation properties of polymer composites mixed with tantalum carbide. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 177, 531–544. <https://doi.org/10.1080/10420150.2022.2063124>
63. Ortega Pijeira, M. S., Magne, T. M., da Silva, N. C. G., Ramos Ribeiro, E. R. F., Albuquerque Silva, Y. J., Ricci-Junior, E., Rebelo Alencar, L. M., & Santos-Oliveira, R. (2023). Ionizing radiation chemistry on polymers. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 23(15), 1414–1424. <https://doi.org/10.2174/1568026623666230315122855>
64. Ovsik, M., Manas, M., Stanek, M., Dockal, A., Mizera, A., Fluxa, P., Bednarik, M., & Adamek, M. (2021). Nano-mechanical properties of irradiated polyethylene. *Materials*, 13(4), 929. <https://doi.org/10.3390/ma13040929>
65. Ovsik, M., Reznicek, M., Senkerik, V., Stanek, M., & Hylova, L. (2019). Influence of radiation cross-linking on gel content of polyamide. *MM Science Journal*, 2819–2822. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_03_201861
66. Oshima, A., Ikeda, S., Seguchi, T., & Tabata, Y. (1997). Improvement of radiation resistance of PTFE by crosslinking. *Radiation Physics and Chemistry*, 49(2), 279–284. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(96\)00138-7](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(96)00138-7)
67. Pekel, N., Yoshii, F., Kume, T., & Guven, O. (2004). Radiation crosslinking of biodegradable HPMC. *Carbohydrate Polymers*, 55, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2003.08.015>
68. Ping, X., Wang, M., & Ge, X. (2011). Radiation grafting onto PET films. *Radiation Physics and Chemistry*, 80, 632–637. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2011.01.001>
69. Pirvu, C. I., Sover, A., & Abrudeanu, M. (2024). Polymer participation in piezoelectric composites. *Polymers*, 16(24), 3603. <https://doi.org/10.3390/polym16243603>
70. Podhornaya, L., Avramenko, V., & Karandashov, O. (2020). Radiation-chemical structuring of epoxy compositions. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 12(1), 08008. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-1-08>
71. Rahaman, M. S., Hasnine, S. M., Ahmed, T., Sultana, S., Bhuiyan, M. A., Manir, M. S., Ullah, N., Sen, S. K., Hossain, M. N., Hossain, M. S., & Dafader, N. C. (2021). Radiation crosslinked

- hydrogels. *Iranian Polymer Journal*, 30, 1101–1116. <https://doi.org/10.1007/s13726-021-00949-2>
72. Ramaraj, B. (2007). Crosslinked poly (vinyl alcohol) and starch films. *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 1127–1132. <https://doi.org/10.1002/app.24612>
73. Relleve, L. S., & Yoshii, F. (1997). Radiation crosslinking of polymers. *Progress in Polymer Science*, 22(2), 257–289. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(96\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(96)00015-8)
74. Relleve, L. S., Gallardo, A. K., Tecson, M. G., & Luna, J. A. (2021). Biocompatible hydrogels by radiation crosslinking. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 109194. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109194>
75. Rimdusit, S., Somsaeng, K., Kewsuwan, P., Jubsilp, C., & Tiptipakorn, S. (2012). Comparison of gamma and chemical crosslinking of hydrogels. *Engineering Journal*, 16(4), 15–28. <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.4.15>
76. Schneider, L. M., Ihrner, N., Zenkert, D., & Johansson, M. (2019). Bicontinuous electrolytes. *ACS Applied Energy Materials*, 2(6), 4362–4369. <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b00563>
77. Sharif, J., Abdul Aziz, H. S., & Hashim, K. (2000). Radiation effects on LDPE/EVA blends. *Radiation Physics and Chemistry*, 58, 191–195. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00373-4](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00373-4)
78. Singh, N., Singh, J., & Singh, L. (2014). Radiation processing of polymers: fundamentals and applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 105, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.06.020>
79. Silva, A. S., Carvalho, A., Barreiros, P., de Sá, J., Aroso, C., & Mendes, J. M. (2021). Fracture resistance in acrylic resins. *Polymers*, 13(8), 1234. <https://doi.org/10.3390/polym13081234>
80. Smith, J. A., Brown, L. R., & Taylor, M. E. (2018). Radiation-induced modification and crosslinking of polymers: Mechanisms and applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 145, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.12.015>
81. Stephen, R., Jose, S., Joseph, K., Thomas, S., & Oommen, Z. (2006). Thermal stability of gamma-radiation vulcanized rubber blends. *Polymer Degradation and Stability*, 91(8), 1717–1725. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.12.001>
82. Stelescu, M. D., Airinei, A., Manaila, E., Crăciun, G., Fifere, N., Varganici, C., Pamfil, D., & Doroftei, F. (2018). Effects of electron beam irradiation on elastomer composites. *Polymers*, 10, 1112. <https://doi.org/10.3390/polym10111206>
83. Sun, J., Zhang, Y., & Zhong, X. (1994). Radiation crosslinking of PTFE. *Polymer*, 35, 2881–2883. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(94\)90323-9](https://doi.org/10.1016/0032-3861(94)90323-9)
84. Svarcova, A., & Svoboda, P. (2025). Enhanced mechanical properties of irradiated EVA. *Processes*, 13(5), 1562. <https://doi.org/10.3390/pr13051562>
85. Svoboda, P. (2016). High-temperature study of radiation cross-linked ethylene–octene copolymers. *Polymer Bulletin*, 74, 121–144. <https://doi.org/10.1007/s00289-016-1703-6>
86. Sütekin, S. D., Guven, O. (2019). Radiation synthesis of nanogels. *Applied Radiation and Isotopes*, 145, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.12.028>
87. Thiher, N. L. K., Schissel, S. M., & Jessop, J. L. P. (2020). Comparison of photo- and electron-beam polymerizations. *Radiation Physics and Chemistry*, 172, 108808. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108808>
88. Touati, N., Kaci, M., Ahouari, H., Bruzard, S., & Grohens, Y. (2007). Effect of γ -irradiation on PP/clay nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 292, 1271–1279. <https://doi.org/10.1002/mame.200700260>
89. Tretinnikov, O. N., Kubo, M., & Ikada, Y. (1998). Surface crosslinking of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 60(1), 123–130. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00104-8)
90. Tsai, C.-Y., Zhang, T., Zhao, M., Chang, C.-S., & Sue, H.-J. (2021). Thermally conductive but electrically insulated polypropylene. *Composites Science and Technology*, 204, 108635. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.03.017>

91. Voit, W., Ware, T., & Gall, K. (2010). Radiation crosslinked shape-memory polymers. *Polymer*, 51(15), 3551–3559. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.05.049>
92. Wach, R. A., Mitomo, H., Nagasawa, N., & Yoshii, F. (2003). Radiation crosslinking of carboxymethylcellulose. *Radiation Physics and Chemistry*, 68, 771–779. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(03\)00403-1](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(03)00403-1)
93. Wach, R. A., Mitomo, H., Yoshii, F., & Kume, T. (2002). Hydrogel of radiation-induced cross-linked hydroxypropylcellulose. *Macromolecular Materials and Engineering*, 287, 285–295. [https://doi.org/10.1002/1439-2054\(20020401\)287:4<285:AID-MAME285>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1439-2054(20020401)287:4<285:AID-MAME285>3.0.CO;2-3)
94. Wang, B., Wang, M., Xing, Z., Zeng, H., & Wu, G. (2013). Radiation crosslinked LDPE/EVA foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 127, 912–918. <https://doi.org/10.1002/app.37826>
95. Woods, R. J., & Pikaev, A. K. (1994). Applied radiation chemistry: Radiation processing. Wiley.
96. Yamashita, S., Ma, J., Marignier, J.-L., Hiroki, A., Taguchi, M., Mostafavi, M., & Katsumura, Y. (2016). Radiation-induced reactions in hydroxypropyl cellulose hydrogels. *Radiation Research*, 186, 650–658. <https://doi.org/10.1667/RR14539.1>
97. Zaharescu, T. (2015). Radiation effects on polymer-based systems. In Radiation effects on polymer-based systems. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03464-5_6
98. Zhao, L., Mitomo, H., Nagasawa, N., Yoshii, F., & Kume, T. (2003). Radiation synthesis of chitin-based hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, 51, 169–175. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00210-2)
99. Zhao, W., Kundu, C. K., Li, Z., Li, X., & Zhang, Z. (2021). Flame retardant treatments for polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 145, 106382. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106382>
100. Zhou, C. (2012). Bulk preparation of radiation crosslinking poly(urethane-imide). In *Polyurethane* (pp. 387–406). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/48282>
101. Zenkiewicz, M., Richert, J., Rytlewski, P., & Moraczewski, K. (2015). Effects of gamma radiation on polymers and polymer composites. *Polymers*, 60(2), 83–92. <https://doi.org/10.14314/polimery.2015.083>

Біріншілік және екіншілік полимерлерді радиациялық тігу әдістері: полимерлерді радиациялық тігудің тиімділігі мен мүмкіндіктері

Лязат Толымбекова, Айымжан Казбекова, Айша Бақтыбек, Гайни Сейтенова, Арайлым Турсынова

Аңдатпа. Мақала біріншілік және екіншілік полимерлерді радиациялық тігу перспективалық макромолекулалық материалдарды модификациялау бағыттарының бірі ретінде шолуға арналған. Мақалада γ -сәулесінің электрондық сәулелік шоқтың және ультракүлгін сәулелердің әсерінен жүретін тігілудің физика-химиялық негіздері қарастырылып, полимер құрылымында көлденең байланыстардың түзілу механизмдеріне ерекше назар аударылады. Біріншілік және екіншілік полимерлердің радиациялық әсерге төзімділігін салыстырмалы талдау жүргізіліп, қоспалардың, қалдық стабилизаторлардың және деградация дәрежесінің әсері қарастырылады. Заманауи ғылыми зерттеулердің нәтижелері жинақталып, радиациялық тігуден кейін полимерлердің механикалық және термиялық қасиеттеріндегі өзгерістер көрсетіледі.

Мақаланың елеулі бөлігі радиациялық тігілуден өткен материалдардың әртүрлі салаларда практикалық қолданылуына арналған: энергетикада (кабельдерді оқшаулау), медицинада (бір реттік бұйымдар), құрылыс саласында (құбырлар мен пленкалар), сондай-ақ пластикалық қалдықтарды өңдеу және қайта пайдалану саласында. Әдістің экономикалық аспектілері талданып, массалық өндірісте радиациялық тігу әдісі химиялық әдістерге қарағанда тиімді екені көрсетіледі, бұл жоғары өнімділік, процестерді автоматтандыру және инициаторларды

қолданудың қажет еместігімен түсіндіріледі. Экологиялық артықшылықтарға, соның ішінде улы жанама өнімдердің болмауы және екіншілік полимерлерді терең өңдеу мүмкіндігіне назар аударылады. Соңында, радиациялық тігілудің тұрақты даму және айналымдық экономикаға көшу контекстінде жоғары өзектілігі мен потенциалы туралы қорытынды жасалады.

Түйін сөздер: радиациялық тігу; иондаушы сәулелену; біріншілік полимерлер; екіншілік полимерлер; полиэтилен; полимерлердің модификациясы; экологиялық таза; полимер қалдықтары; циркуляциялық экономика.

Radiation crosslinking of primary and secondary polymers: efficiency and possibilities of radiation crosslinking of polymers

Lyazat Tolymbekova, Aiymszhan Kazbekova, Aisha Baktybek, Gaini Seitenova, Arailym Tursynova

Abstract. The article is devoted to a review of radiation crosslinking of primary and secondary polymers as a promising area of modification of macromolecular materials. The physicochemical foundations of the crosslinking process under the influence of ionizing radiation, including gamma radiation, electron beam, and ultraviolet, are considered, with an emphasis on the mechanisms of formation of cross-links in the polymer structure. Special attention is paid to the comparative analysis of the behavior of primary and secondary polymers under radiation exposure, including the effects of impurities, residual stabilizers, and the degree of degradation. The results of modern scientific research demonstrating changes in the mechanical and thermal properties of polymers after crosslinking are summarized. A significant part of the article is devoted to the practical application of radiation-crosslinked materials in various industries: energy (cable insulation), medicine (disposable products), construction (pipes and films), as well as in the processing and disposal of plastic waste. An analysis of the economic aspects of the method is given, which shows that in mass production, radiation crosslinking turns out to be economically more profitable than chemical methods, due to high productivity, automation of processes, and the absence of the need for initiators. Environmental advantages were noted, including the absence of toxic by-products and the possibility of deep processing of secondary polymers. The conclusion is made about the high relevance and potential of radiation crosslinking in the context of sustainable development and transition to a circular economy.

Keywords: radiation crosslinking; ionizing radiation; primary polymers; secondary polymers; polyethylene; polymer modification; environmental friendliness; polymer waste; circular economy.