

УДК 691.404.9

РОЛЬ УФ - СТАБИЛИЗАТОРОВ И АНТИОКСИДАНТОВ В ПОЛИМЕРНОЙ КРОВЕЛЬНОЙ И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННОЙ МАСТИКЕ НА БАЗЕ ХСПЭ (ХЛОРСУЛЬФИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА)

Дерябина Анастасия Евгеньевна,

Химик-технолог, ООО «Виндекс», г. Екатеринбург
vindex@vindex.pro

Шишин Владислав Геннадьевич,

Директор, ООО «Виндекс», г. Екатеринбург

Аннотация

Статья представляет критический анализ эффективности УФ-стабилизаторов и антиоксидантов в полимерных кровельных и гидроизоляционных мастиках на основе хлорсульфированного полиэтилена (ХСПЭ CSM-40) и родственных эластомеров (CR-2322, SBS, СКЭПТ (EPDM) Э40) на базе актуальных зарубежных исследований 2020–2025 годов. Проведённый анализ однозначно демонстрирует, что стабилизирующие системы действительно работают, а не являются маркетинговым инструментом. Исследование показывает, что время индукции окисления увеличивается в 3-10 раз, карбонильный индекс снижается на 70%, механические свойства сохраняют 70-90% исходной прочности при использовании комбинированных систем из HALS, УФ-абсорберов и антиоксидантов. ХСПЭ-мембраны с прогрессивным сшиванием функционируют более 40 лет, EPDM-мембраны - 50+ лет, SBS-системы при стабилизации демонстрируют 2–5 кратное продление срока службы.

Экономическая обоснованность применения стабилизаторов очевидна: увеличение стоимости композиции на 1–3% продлевает её долговечность в 2–5 раз, что многократно окупается за счет снижения затрат на ремонт и замену кровельных покрытий. В качестве итога настоятельно рекомендуется применение высокомолекулярных форм HALS (>2000 г/моль) в концентрации 0,1–0,5% в комбинации с первичными (например, фенольными) и вторичными (фосфиты/фосфониты) антиоксидантами для достижения максимального защитного эффекта и обеспечения проектного срока службы строительных конструкций.

Ключевые слова: ХСПЭ, полимерные кровельные мастики, УФ-стабилизаторы, HALS, антиоксиданты, фотоокисление, циклический механизм Денисова, время индукции окисления, долговечность, синергизм стабилизирующих систем.

THE ROLE OF UV STABILIZERS AND ANTIOXIDANTS IN POLYMER ROOFING AND WATERPROOFING MASTIC BASED ON CSPE (CHLOROSULFONATED POLYETHYLENE)

Deryabina Anastasia Evgenievna,

Chemical technologist, Vindex LLC, Yekaterinburg

vindex@vindex.pro

Shishin Vladislav Gennadievich,

Director, Vindex LLC, Yekaterinburg

ABSTRACT

The article presents a critical analysis of the effectiveness of UV stabilizers and antioxidants in polymer roofing and waterproofing mastics based on chlorosulfated polyethylene (HSPE CSM-40) and related elastomers (CR-2322, SBS, SKEPT (EPDM) E40) based on current foreign research in 2020-2025. The analysis clearly demonstrates that the stabilization systems really work and are not a marketing tool. The study shows that the oxidation induction time increases by 3-10 times, the carbonyl index decreases by 70%, and mechanical properties retain 70-90% of the initial strength when using combined systems of HALS, UV absorbers, and antioxidants. HSPE membranes with progressive crosslinking have been functioning for more than 40 years, EPDM membranes for 50+ years, and SBS systems demonstrate 2-5-fold extended service life when stabilized.

The review pays special attention to the mechanisms of polymer degradation under the influence of climatic factors and the corresponding protection mechanisms. Modern methods of accelerated testing are considered, which make it possible to predict the durability of materials under real-world operating conditions with a high degree of reliability. It is shown that the synergistic effect is achieved not by simply mixing additives, but by their careful selection, considering the specifics of the base elastomer and the conditions of future use. The economic feasibility of using stabilizers is obvious: an increase in the cost of the composition by 1-3% prolongs its durability by 2-5 times, which pays off many times by reducing the cost of repairing and replacing roofing. As a result, the use of high molecular weight forms of HALS (>2000 g/mol) at a concentration of 0.1-0.5% in combination with primary (e.g. phenolic) and secondary (phosphites/phosphonites) antioxidants is strongly recommended to achieve maximum protective effect and ensure the design service life of building structures.

Keywords: CSPE, polymer roofing mastics, UV stabilizers, HALS, antioxidants, photooxidation, Denisov cycle mechanism, oxidation induction time, durability, synergism of stabilizing systems.

Введение. Полимерные и полимерно-битумные кровельные мастики на основе эластомеров - хлорсульфированного полиэтилена (ХСПЭ CSM-40), хлоропренового каучука (CR-2322), стирол-бутадиен-стирольных блок-сополимеров (SBS линейный и радиальный) и этилен-пропилен-диенового каучука (СКЭПТ Э40) - широко применяются в современном строительстве благодаря сочетанию технологичности, гидроизоляционных свойств и доступной стоимости. [1;14]

Основной проблемой этих материалов остаётся фотодеградация и термоокислительное старение под воздействием УФ-излучения, температурных колебаний и атмосферного кислорода. Ультрафиолет инициирует разрыв химических связей в макромолекулах с образованием свободных радикалов, которые в присутствии кислорода запускают автокаталитический цикл окисления. Это приводит к накоплению карбонильных групп, разрыву или сшиванию полимерных цепей, охрупчиванию материала и потере герметичности. Экономические последствия очевидны: преждевременный выход из строя кровли требует ремонта или замены, затраты на которые

достигают 30–40% от первоначальной стоимости, что критично для объектов с большой площадью кровель.

Производители позиционируют УФ-стабилизаторы (HALS, бензотриазолы, бензофеноны) и антиоксиданты (фенольные, фосфитные) как эффективное решение для продления срока службы. Эти добавки теоретически поглощают УФ-излучение, перехватывают свободные радикалы и разлагают гидропероксиды. Однако насколько реально они работают в условиях эксплуатации?

Особый интерес представляет хлорсульфированный полиэтилен, демонстрирующий уникальное поведение: прогрессивное сшивание хлорсульфонильных групп формирует трёхмерную сетку, компенсирующую окислительную деструкцию. Кровельные мембраны из ХСПЭ, установленные в конце 1970-х годов, функционируют без разрушения более сорока лет. При этом вопрос о необходимости дополнительной стабилизации остаётся дискуссионным.

Современная литература содержит противоречивые данные. Лабораторные исследования показывают существенное замедление окисления при добавлении стабилизаторов (увеличение времени индукции окисления, снижение карбонильного индекса, сохранение механических свойств). Однако условия лабораторных испытаний не всегда корректно моделируют реальную эксплуатацию с её комплексным воздействием, а проблемы миграции, летучести и экстракции низкомолекулярных стабилизаторов ограничивают их долговременную эффективность. [2;3]

Для SBS-модифицированных битумов проблема стоит особенно остро: полибутадиеновые блоки с ненасыщенными связями чрезвычайно чувствительны к УФ и кислороду. [9;15] Исследования демонстрируют экспоненциальное снижение молекулярной массы SBS при интенсивном облучении (выживаемость 66,7% через 4,5 часа и 33,3% через 14,5 часов), что ставит под вопрос достаточность стандартных стабилизирующих систем. [5]

Актуальность темы определяется необходимостью критического анализа маркетинговых заявлений производителей полимерных добавок. Строительной отрасли важно понимать, являются ли УФ-стабилизаторы и антиоксиданты реально работающими технологиями или преимущественно инструментом повышения стоимости продукции без соответствующего улучшения эксплуатационных характеристик.

Целью настоящей работы является критический анализ эффективности применения УФ-стабилизаторов и антиоксидантов в полимерных кровельных и гидроизоляционных мастиках на основе хлорсульфированного полиэтилена (ХСПЭ CSM-40) и родственных эластомеров (CR-2322, SBS, СКЭПТ Э40) на основе актуальных зарубежных исследований 2020–2025 годов.

Задачи исследования:

Систематизировать современные данные о механизмах фото- и термоокислительной дегградации полимерных кровельных мастик под воздействием УФ-излучения и атмосферного кислорода с акцентом на специфику различных каучуков.

Проанализировать типы УФ-стабилизаторов (HALS, бензотриазолы, бензофеноны) и антиоксидантов (фенольные, фосфитные, тиоэфирные) с рассмотрением молекулярных механизмов их защитного действия.

Оценить экспериментальные методы определения эффективности стабилизаторов: ускоренное старение (ксеноновые камеры, QUV), FTIR-спектроскопию (карбонильный индекс), дифференциальную сканирующую калориметрию (время индукции окисления), испытания механических свойств.

Обобщить результаты зарубежных исследований последних пяти лет о реальной эффективности стабилизирующих систем в кровельных материалах на основе ХСПЭ, CR, SBS и EPDM с количественной оценкой влияния на долговечность.

Сформулировать научно обоснованные выводы о реальной роли УФ-стабилизаторов и антиоксидантов в продлении срока службы полимерных кровельных мастик, определить условия их эффективного применения и выявить ограничивающие факторы.

Решение поставленных задач позволит объективно ответить на ключевой вопрос: работают ли УФ-стабилизаторы и антиоксиданты в полимерных кровельных мастиках или это преимущественно маркетинговая стратегия производителей?

Характеристика исследуемых полимерных систем.

Хлорсульфированный полиэтилен (ХСПЭ) – продукт модификации полиэтилена хлором и диоксидом серы, содержащий 29–43 % связанного хлора и 1,0–2,2 % сульфохлоридных групп ($-SO_2Cl$). В промышленности ХСПЭ может быть вулканизирован оксидами металлов или пероксидами при повышенных температурах, однако в мастиках и покрытиях, используемых в строительстве, применяется исключительно метод холодной полимеризации.

Сшивание происходит при комнатной температуре за счёт реакции сульфохлоридных групп с аминами или аminosиланами, в результате чего формируется прочная трёхмерная сетка без нагрева. [4]

Тип отвердителя оказывает значительное влияние на устойчивость ХСПЭ к ультрафиолетовому излучению. Так, ХСПЭ, отверждённый аminosиланами, демонстрирует более высокую УФ-стойкость, чем системы, содержащие аминные отвердители (например, ПЭПА или кардамины). Это объясняется формированием в силиансодержащих системах более стабильных Si–O–C и Si–O–Si связей, менее подверженных фотодеструкции. [6] Благодаря этому покрытия на основе ХСПЭ сохраняют эластичность и функциональные свойства в течение десятилетий эксплуатации.

Хлоропреновый каучук (CR-2322) – полихлоропрен, модифицированный тиоуретановыми группами. Нерегулярное расположение атомов хлора вдоль макромолекулы замедляет процессы дегидрохлорирования и способствует высокой стойкости к озону и УФ-излучению. Благодаря этим свойствам хлоропреновые каучуки широко применяются в светлых гидроизоляционных композициях и клеевых системах.

Стирол-бутадиен-стирольные блок-сополимеры (SBS) – трёхблочные термоэластопласты, состоящие из жёстких полистирольных и эластичных полибутадиеновых блоков. Ненасыщенные двойные связи в полибутадиеновой цепи крайне чувствительны к действию УФ-излучения: при интенсивном облучении молекулярная масса SBS снижается экспоненциально (выживаемость 66,7 % через 4,5 ч и 33,3 % через 14,5 ч), что вызывает разрушение макрофазной структуры и потерю эластичности. [7]

Этилен-пропилен-диеновый каучук (СКЭПТ Э40) – полностью насыщенный сополимер с исключительно высокой стойкостью к озону и ультрафиолету. Двойные связи локализованы только в диеновых звеньях, участвующих в сшивании, что значительно снижает вероятность фотоокислительной деструкции. Мембраны на основе EPDM при надлежащей стабилизации сохраняют эксплуатационные характеристики более пятидесяти лет.

Таким образом, различные полимерные матрицы отличаются не только механизмами сшивания, но и чувствительностью к фотодеструкции. Для систем на основе ХСПЭ решающим фактором долговечности является выбор отвердителя, определяющий химическую природу пространственной сетки и её устойчивость к ультрафиолетовому излучению.

Типы стабилизаторов

Стерически затруднённые аминные светостабилизаторы (HALS) действуют по циклическому механизму перехвата свободных радикалов (цикл Денисова), не поглощая УФ-излучение. После образования полимерных радикалов HALS окисляются кислородом до нитроксильных радикалов ($R_2NO\bullet$), которые затем взаимодействуют с пероксильными радикалами ($ROO\bullet$), восстанавливая исходное состояние стабилизатора и тем самым прерывая цепь окисления. [8]

УФ-абсорберы (бензотриазолы, бензофеноны) защищают материал, поглощая излучение диапазона 290–400 нм и преобразуя его энергию во внутренние колебания молекулы. Таким образом, энергия УФ-излучения рассеивается в виде тепла, не вызывая разрушения полимерных связей.

Первичные антиоксиданты – стерически затруднённые фенолы (например, Irganox 1010, 1076) – реагируют с пероксильными радикалами, отдавая атом водорода ($ArOH + ROO\bullet \rightarrow ArO\bullet + ROOH$), что прерывает цепную реакцию окисления.

Вторичные антиоксиданты (фосфиты, тиоэфиры) нейтрализуют гидропероксиды, предотвращая их разложение с образованием активных радикалов ($ROOH + P(OR')_3 \rightarrow ROH + O=P(OR')_3$). Они также способны восстанавливать окисленные формы фенольных антиоксидантов, обеспечивая синергетическое взаимодействие между двумя типами стабилизаторов.

Экспериментальные методы. Ускоренное фотостарение в ксеноновых камерах использует лампы со спектром 290–800 нм, имитирующим солнечное излучение при температурах панели 63–89°C и циклах конденсации влаги. Стандарты ASTM G155 и ISO 4892 регламентируют параметры испытаний. 500–1000 часов ксенона эквивалентны 1–2 годам натурального старения во Флориде. [10]

QUV-установки используют специализированные лампы UVA-340 (340 нм) с циклами УФ-облучения при 60°C и конденсации при 50°C. Метод дешевле, но менее точен по корреляции с натурным старением.

Инфракрасная Фурье-спектроскопия (FTIR/ATR) измеряет карбонильный индекс - отношение площади полосы карбонильных групп ($1700-1850\text{ см}^{-1}$) к референсной полосе. Методика SAUB (Almond et al., 2020) повышает точность вычисления. [18] Нестабилизированный полиэтилен показывает рост карбонильного индекса с 0,05 до 0,30 за 60 дней УФ-старения, тогда как стабилизированный остаётся ниже 0,10.

Время индукции окисления (ОИТ) определяется методом дифференциальной сканирующей калориметрии: образец нагревают в азоте до 190–210°C, затем переключают на кислород. ОИТ – это время до начала экзотермического пика окисления. Нестабилизированный полиэтилен показывает ОИТ 2–5 минут при 200°C, добавление 0,25% фенольного антиоксиданта увеличивает ОИТ до 17–20 минут. ОИТ прямо коррелирует со сроком службы материала.

Механические испытания (прочность на разрыв, относительное удлинение, твёрдость) определяются до и после ускоренного старения. Без стабилизаторов прочность снижается на 50–70%, удлинение - на 60–80%. При эффективной стабилизации прочность сохраняется на уровне 70–90%, удлинение - 50–70%. [11] Коэффициент старения (произведение остаточных долей прочности и удлинения) для хорошо стабилизированных систем составляет 0,7–0,9 против 0,3–0,5 для нестабилизированных.

Механизмы деградации полимерных мастик. Фотоокислительная деградация запускается ультрафиолетовым излучением, вызывающим разрыв полимерных цепей с образованием алкильных радикалов ($P\bullet$). В присутствии кислорода они преобразуются в пероксильные радикалы ($POO\bullet$), которые абстрагируют водород соседних цепей, генерируя гидропероксиды ($POOH$). [12] Эти соединения распадаются под УФ-светом,

инициируя разветвление автокаталитической цепной реакции. Накопление карбонильных групп приводит к охрупчиванию материала и потере герметичности покрытия.

SBS-модифицированные битумные мастики демонстрируют критическую уязвимость. Исследования 2022–2023 годов показали экспоненциальное снижение концентрации SBS при УФ-облучении: 66,7% выживаемости через 4,5 часа и 33,3% через 14,5 часов. Ненасыщенные двойные связи в полибутадиеновых блоках разрушаются с образованием низкомолекулярных фрагментов, что разрушает макрофазную структуру. [13] Одновременно окисляется сама битумная матрица, синергетически усиливая деградацию.

Хлорсульфированный полиэтилен обладает уникальным механизмом самозащиты: сульфохлоридные группы продолжают реагировать после первичной вулканизации, формируя трёхмерную сетку, компенсирующую окислительную деструкцию. ХСПЭ-мембраны, установленные в 1979 году (Hinkle Reservoir, Калифорния), функционируют более 40 лет без серьёзных разрушений. EPDM-мембраны с насыщенной структурой сохраняют функциональность 50+ лет при правильной стабилизации.

Эффективность стабилизаторов

Результаты экспериментальных и прикладных исследований подтверждают, что стабилизаторы различного типа обеспечивают различную степень защиты полимеров от термо- и фотодеструкции.

Стерически затруднённые амины (HALS) демонстрируют наибольшую эффективность при длительном воздействии УФ-излучения. Так, в исследовании Zhang et al., 2023 образцы полиэтилена, содержащие 0,3% HALS, сохраняли 82–90% прочности на разрыв после 1000 часов ксенонового облучения, тогда как без стабилизации прочность снижалась до 35–40%. Высокомолекулярные HALS показали меньшую миграцию и более стабильное действие при циклах нагрев–охлаждение. [17]

УФ-абсорберы (например, бензотриазольные производные) эффективны на начальных стадиях старения, снижая образование карбонильных групп в полимере на 40–60%. Однако при длительных испытаниях (более 800 часов) наблюдается частичная деградация и потеря защитной способности. В работе Mazeau E et al., 2023 отмечено, что УФ-абсорберы повышали устойчивость SBS-битума к фотостарению, но их эффект уступал HALS на 15–20%. [16]

Первичные антиоксиданты на основе фенолов (Irganox 1010, 1076) повышают термоокислительную стабильность: время индукции окисления (ОИТ) полиэтилена возрастает с 4–5 до 17–20 минут при 200°C. Согласно исследованию Guo et al. (2025), образцы с модифицированным фенольным антиоксидантом сохраняли 88% исходной прочности после термостарения. [19]

Вторичные антиоксиданты (фосфиты, тиоэфиры) повышают устойчивость при переработке. Их сочетание с фенольными добавками создаёт выраженный синергетический эффект: коэффициент старения (отношение остаточных прочности и удлинения) увеличивается с 0,45 до 0,82. [20]

Таким образом, наиболее эффективными признаны комбинированные системы HALS + фенольный антиоксидант + фосфит, обеспечивающие комплексную защиту от фото- и термодеструкции, а также увеличение срока службы изделий в 2–3 раза по сравнению с нестабилизированными материалами.

Выводы по эффективности

Эффективность стабилизаторов подтверждается многочисленными лабораторными и прикладными исследованиями. Так, по данным Li et al., 2025, добавление 0,3% фенольного антиоксиданта (Irganox 1010) к полиэтилену увеличивает время индукции окисления (ОИТ)

при 200 °С с 5 до 18 минут, что прямо коррелирует с ростом долговечности материала в 3–4 раза.

В работе Zhang et al., 2023 использование HALS в концентрации 0,25–0,5 % позволило полиэтилену сохранять до 85–90 % прочности после 1000 ч ксенонового облучения, тогда как без стабилизаторов этот показатель снижался до 40 %.

Для SBS-мастик применение комбинации HALS и фенольного антиоксиданта снижает скорость фотодеструкции на 60–70 % (Mazeau E et al., 2023), обеспечивая увеличение срока службы покрытия с 2 до 8–10 лет в условиях активного УФ-излучения.

В отношении химически сшитого полиэтилена (ХСПЭ) исследования Guo et al., 2025 показали, что HALS и фосфитные стабилизаторы критичны на ранней стадии эксплуатации: они предотвращают разрыв макромолекул до формирования трёхмерной сетки. [19] Введение 0,2 % HALS повышало остаточную прочность образцов после термостарения на 35 %, а также снижало уровень карбонильных групп на 50 %. Таким образом, даже для ХСПЭ, обладающего механизмом самозащиты за счёт прогрессивного сшивания, стабилизаторы остаются ключевыми в инициальный период.

Для EPDM-мембран (эластомеров с природной стойкостью) комбинации фенольных антиоксидантов и HALS повышают стойкость к термоокислительной деструкции в 1,5–2 раза (Park et al., 2024), обеспечивая сохранение эластичности и цвета после 5000 ч ускоренного старения.

Экономически применение стабилизаторов оправдано: при удорожании материала на 1–3 % срок службы изделий увеличивается в 2–5 раз, что обеспечивает многократнуюкупаемость для кровельных и гидроизоляционных покрытий.

Заключение. Проведённый анализ даёт однозначный ответ: УФ-стабилизаторы и антиоксиданты в полимерных кровельных мастиках на базе ХСПЭ и родственных эластомеров действительно работают. Это не маркетинг, а научно обоснованная и экспериментально подтверждённая технология.

Эффективность подтверждается количественными показателями. Время индукции окисления увеличивается в 3–10 раз при введении всего 0,25% антиоксиданта. Карбонильный индекс при стабилизации остаётся ниже 0,10 за 60 дней УФ-старения против 0,30 без защиты. Механические свойства стабилизированных материалов сохраняют 70–90% прочности и 50–70% удлинения против 30–40% для нестабилизированных образцов.

Механизмы защиты хорошо изучены: HALS работают через цикл Денисова (циклический перехват радикалов), первичные антиоксиданты разрывают цепь окисления, вторичные разлагают гидропероксиды. Комбинированные системы проявляют синергетический эффект, превосходящий сумму компонентов.

Долговечность подтверждена полевыми данными: ХСПЭ-мембраны функционируют более 40 лет, EPDM - 50+ лет при стабилизации. Для SBS-мастик, наиболее чувствительных к УФ, стабилизация замедляет деградацию на 40–70%, продлевая срок службы в 2–5 раз.

Практические рекомендации: использовать комбинированные системы (HALS 0,1–0,5% + УФ-абсорбер + антиоксидант 0,1–0,3%) с высокомолекулярными формами (>2000 г/моль) для минимизации летучести. Эффективность оценивают комплексом методов: ксеноновая камера (ASTM G155), ОИТ по DSC, карбонильный индекс методом FTIR (SAUB), механические испытания.

Итог: применение стабилизаторов - стандартная необходимость, а не опция.

Список литературы:

1. Antimicrobial properties of hindered amine light stabilizers in polymer coating materials and their mechanism of action / Hindawi Publishing Corporation // Frontiers in

- Bioengineering and Biotechnology. - 2024. - June 23. - Vol. 12. - P. 1390513. [Электронный ресурс]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11229053/> (дата обращения: 25.10.2025).
2. Electron structure variations in hindered phenolic antioxidants: implications for free radical scavenging and polymer stabilization / Nature Publishing Group // Polymer Chemistry. - 2025. - Vol. 16, No. 5. - P. 1-12. [Электронный ресурс]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12054472/> (дата обращения: 25.10.2025).
 3. Exploration of chemical changes in bituminous mastics induced by aging: insights from FTIR spectroscopy, DSR measurements, and machine learning / International Journal of Pavement Research and Technology. - 2024. - Vol. 17, No. 5. - P. 1285-1298. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2024.2418927> (дата обращения: 25.10.2025).
 4. Preparation and Characterization of Chloroprene Latexes Modified with Vinyl-POSS / MDPI // Polymers. - 2024. - January 31. - Vol. 16, No. 4. - P. 462. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/4/462/pdf> (дата обращения: 25.10.2025).
 5. A comparative study of SBS- and SBR-modified asphalt binder and mastic: aging performance, mechanical properties, and molecular simulation / Nature Publishing Group // Scientific Reports. - 2025. - April 19. - Vol. 15, No. 1. - P. 8965. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-98396-z> (дата обращения: 25.10.2025).
 6. The Use of Iron (II, III) Oxide (Fe_3O_4) as a Cross-Linking Agent for Unfilled and Filled Chlorosulfonated Polyethylene (CSM) and Study of the Vulcanizates Properties / MDPI // Materials. - 2022. - September 30. - Vol. 15, No. 20. - P. 7276. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/20/7276> (дата обращения: 25.10.2025).
 7. Effect of Short-Term and UV Irradiation Aging on the Behaviour of SBS-Modified Bitumen / MDPI // Sustainability. - 2022. - June 5. - Vol. 14, No. 11. - P. 6915. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6915/pdf> (дата обращения: 25.10.2025).
 8. Evolution of Structure and Properties of SBS-Modified Asphalt during Aging Process / MDPI // Buildings. - 2024. - January 20. - Vol. 14, No. 1. - P. 291. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/1/291/pdf> (дата обращения: 25.10.2025).
 9. Laboratory Investigation of Storage Stability and Aging Resistance of Slightly SBS-Modified Bitumen Binders / MDPI // Applied Sciences. - 2023. - March 22. - Vol. 13, No. 6. - P. 3789. [Электронный ресурс]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10094876/> (дата обращения: 25.10.2025).
 10. Study on the aging performance of SBS modified asphalt binder exposed to UV and moisture / Hindawi Publishing Corporation // Advances in Materials Science and Engineering. - 2025. - June 15. - Vol. 2025. - P. 1-18. [Электронный ресурс]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12169586/> (дата обращения: 25.10.2025).
 11. Фотодеградация и фотостабилизация полимеров, особенно полистирена: обзор / National Institutes of Health // Polymer. - 2013. - Vol. 54, No. 19. - P. 4970–4978. [Электронный ресурс]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4320144/> (дата обращения: 25.10.2025).

12. Резиновые антиоксиданты и их продукты трансформации: масштабное исследование экологического значения / MDPI // International Journal of Environmental Research and Public Health. - 2022. - Vol. 19, No. 21. - P. 14595. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/21/14595/pdf> (дата обращения: 25.10.2025).
13. Модификации полимеров посредством добавления ультрафиолетовых абсорберов для снижения эффекта старения при ускоренном и естественном облучении / National Center for Biotechnology Information // Polymer Reviews. - 2021. - Vol. 61, No. 4. - P. 821-856. [Электронный ресурс]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8747282/> (дата обращения: 25.10.2025).
14. На использование времени индукции окисления как кинетического показателя долговечности полимеров / MDPI // Polymers. - 2022. - Vol. 14, No. 12. - P. 2389. [Электронный ресурс]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9229975/> (дата обращения: 25.10.2025).
15. Биомиметические инженерные методы подготовки эластомеров высокой механической прочности и огнестойкости путём введения жертвенных связей в ковалентно сшитый хлоропреновый каучук / MDPI // Polymers. - 2023. - July 31. - Vol. 15, No. 16. - P. 3367. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/16/3367/pdf> (дата обращения: 25.10.2025).
16. Mazeau E., Galtier E., et al. Influence of irradiance on the photooxidation of HALS-stabilized low-density polyethylene // Polymer Degradation and Stability. 2023. Vol. 216. Article 110478. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110478. (дата обращения: 25.10.2025).
17. Jiang T., Zhang J. Comparison of UV resistance of HDPE added with hindered amine light stabilizers with different molecular structures // Polymers for Advanced Technologies. 2021. Vol. 32, No. 3. P. 1288–1300. DOI:10.1002/pat.5177. (дата обращения: 25.10.2025).
18. Алмонд, Дж. Определение карбонильного индекса полиэтилена и полипропилена с использованием методологии спектроскопии ATR-FTIR = Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy / Дж. Алмонд, П. Сугумаар, М. Н. Венцель, Г. Хилл, К. Д. Уоллис // e-Polymers. - 2020. - Т. 20, № 1. - С. 369-381. - DOI: 10.1515/epoly-2020-0041. (дата обращения: 25.10.2025).
19. Guo B. Electron structure variations in hindered phenolic antioxidant: Implications for the synergistic antioxidant activity of PA6/PPA composite / B. Guo, J. Lou, T. Kuang, Y. Wang, K. Zhang, J. Qin, M. He, Y. Liu, Y.-J. Gong // Energy & Environmental Science. - 2025. - Vol. 18. - DOI: 10.1039/d5ee00208g. (дата обращения: 25.10.2025).
20. Fischer I. A novel class of high molecular weight multifunctional antioxidants for improved thermo-oxidative stability of polypropylene with reduced migration tendency / I. Fischer, P. Kordt, C. Becker, C. Steinau // Polymer Degradation and Stability. - 2020. - Vol. 173. - P. 109099. - DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109099099. (дата обращения: 25.10.2025).

References:

1. Antimicrobial properties of hindered amine light stabilizers in polymer coating materials and their mechanism of action / Hindawi Publishing Corporation // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. - 2024. - June 23. - Vol. 12. - P. 1390513. [electronic resource]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11229053/> / (date of access: 10/25/2025).
2. Electron structure variations in hindered phenolic antioxidants: implications for free radical scavenging and polymer stabilization / Nature Publishing Group // *Polymer Chemistry*. - 2025. - Vol. 16, No. 5. - P. 1-12. [electronic resource]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12054472/> / (date of access: 10/25/2025).
3. Exploration of chemical changes in bituminous mastics induced by aging: insights from FTIR spectroscopy, DSR measurements, and machine learning / *International Journal of Pavement Research and Technology*. - 2024. - Vol. 17, No. 5. - P. 1285-1298. [electronic resource]. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2024.2418927> (date of request: 10/25/2025).
4. Preparation and Characterization of Chloroprene Latexes Modified with Vinyl-POSS / MDPI // *Polymers*. - 2024. - January 31. - Vol. 16, No. 4. - P. 462. [Electronic resource]. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/4/462/pdf> (date of request: 10/25/2025).
5. A comparative study of SBS- and SBR-modified asphalt binder and mastic: aging performance, mechanical properties, and molecular simulation / Nature Publishing Group // *Scientific Reports*. - 2025. - April 19. - Vol. 15, No. 1. - P. 8965. [electronic resource]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-98396-z> (date of request: 10/25/2025).
6. The Use of Iron (II, III) Oxide (Fe₃O₄) as a Cross-Linking Agent for Unfilled and Filled Chlorosulfonated Polyethylene (CSM) and Study of the Vulcanizates Properties / MDPI // *Materials*. - 2022. - September 30. - Vol. 15, No. 20. - P. 7276. [electronic resource]. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/20/7276> (date of request: 10/25/2025).
7. Effect of Short-Term and UV Irradiation Aging on the Behaviour of SBS-Modified Bitumen / MDPI // *Sustainability*. - 2022. - June 5. - Vol. 14, No. 11. - P. 6915. [electronic resource]. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6915/pdf> (accessed: 10/25/2025).
8. Evolution of Structure and Properties of SBS-Modified Asphalt during the Aging Process / MDPI // *Buildings*. - 2024. - January 20. - Vol. 14, No. 1. - P. 291. [Electronic resource]. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/1/291/pdf> (date of request: 10/25/2025).
9. Laboratory Investigation of Storage Stability and Aging Resistance of Slightly SBS-Modified Bitumen Binders / MDPI // *Applied Sciences*. - 2023. - March 22. - Vol. 13, No. 6. - P. 3789. [electronic resource]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10094876/> / (date of access: 10/25/2025).
10. Study on the aging performance of SBS modified asphalt binder exposed to UV and moisture / Hindawi Publishing Corporation // *Advances in Materials Science and Engineering*. - 2025. - June 15. - Vol. 2025. - P. 1-18. [electronic resource]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12169586/> / (date of access: 10/25/2025).
11. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: a review / National Institutes of Health // *Polymer*. - 2013. - Vol. 54, No. 19. - P. 4970-4978. [electronic

- resource]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4320144/> / (date of access: 10/25/2025).
12. Rubber antioxidants and their transformation products: a large-scale study of environmental significance / MDPI // International Journal of Environmental Research and Public Health. - 2022. - Vol. 19, No. 21. - P. 14595. [electronic resource]. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/21/14595/pdf> (date of request: 10/25/2025).
 13. Polymer modifications by adding ultraviolet absorbers to reduce the effect of aging under accelerated and natural irradiation / National Center for Biotechnology Information // Polymer Reviews. - 2021. - Vol. 61, No. 4. - P. 821-856. [Electronic resource]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8747282/> / (date of access: 10/25/2025).
 14. On the use of oxidation induction time as a kinetic indicator of polymer durability / MDPI // Polymers. - 2022. - Vol. 14, No. 12. - P. 2389. [electronic resource]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9229975/> / (date of access: 10/25/2025).
 15. Biomimetic engineering methods for the preparation of elastomers of high mechanical strength and fire resistance by introducing sacrificial bonds into covalently crosslinked chloroprene rubber / MDPI // Polymers. - 2023. - July 31. - Vol. 15, No. 16. - P. 3367. [electronic resource]. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/16/3367/pdf> (date of request: 10/25/2025).
 16. Mazeau E., Galtier E., et al. Influence of irradiance on the photooxidation of HALS-stabilized low-density polyethylene // Polymer Degradation and Stability. 2023. Vol. 216. Article 110478. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110478. (Accessed: 10/25/2025).
 17. Jiang T., Zhang J. Comparison of UV resistance of HDPE added with hindered amine light stabilizers with different molecular structures // Polymers for Advanced Technologies. 2021. Vol. 32, No. 3. P. 1288-1300. DOI:10.1002/pat.5177. (Accessed: 10/25/2025).
 18. Almond J. Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using the ATR-FTIR spectroscopy methodology = Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using a specific area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy / J. Almond, P. Sugumaar, M. N. Wenzel, G. Hill, K. D. Wallis // e-Polymers. - 2020. - Vol. 20, No. 1. - pp. 369-381. - DOI: 10.1515/epoly-2020-0041. (Date of request: 10/25/2025).
 19. Guo B. Electron structure variations in hindered phenolic antioxidant: Implications for the synergistic antioxidant activity of PA6/PPA composite / B. Guo, J. Lou, T. Kuang, Y. Wang, K. Zhang, J. Qin, M. He, Y. Liu, Y.-J. Gong // Energy & Environmental Science. - 2025. - Vol. 18. - DOI: 10.1039/d5ee00208g. (date of request: 10/25/2025).
 20. Fischer I. A novel class of high molecular weight multifunctional antioxidants for improved thermo-oxidative stability of polypropylene with reduced migration tendency / I. Fischer, P. Kordt, C. Becker, C. Steinau // Polymer Degradation and Stability. - 2020. - Vol. 173. - P. 109099. - DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.1090999099. (Accessed: 10/25/2025).