



Review Article

Received: November 1, 2023

Accepted: December 11, 2023

Published: December 21, 2023

ISSN 2658-5553

Engineering polymer systems with self-healing functionality to enhance structural longevity

Vafaeva, Khristina Maksudovna^{1*} 
Kordas, George¹ 

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;
vafaeva.khm@gmail.com (V.K.M.); gckordas@gmail.com (K.G.);
Correspondence:* email vafaeva.khm@gmail.com;

Keywords:

Polymer systems; Self-healing functionality; Structural longevity; Engineering materials; Smart polymers; Durability enhancement; Nanotechnology applications; Composite materials; Material science; Sustainable construction

Abstract:

The object of research is polymer Systems with Self-Healing Functionality. This work aims to thoroughly analyze the manifold strategies employed to integrate self-healing capabilities into polymer systems. The investigation evaluates their effectiveness across diverse applications and delves into the broader implications of these materials for promoting sustainability in construction practices. **Method.**, The study navigates through the intricate technical aspects of self-healing mechanisms employing a critical and comparative methodology. It scrutinizes microencapsulated healing agents, intrinsic self-healing polymers, and bioinspired approaches, critically evaluating the strengths and limitations of each method. The assessment considers their suitability for varying applications and material types. Furthermore, exploring nanotechnology's potential to enhance self-healing capabilities and introduce novel functionalities is intricately discussed. **Results.** The findings of this review underscore the promising potential of self-healing polymer systems to revolutionize the construction industry. The diverse mechanisms offer prospects for prolonged structural longevity, diminished maintenance burdens, and heightened sustainability. Nevertheless, challenges persist in optimizing healing efficiencies, addressing material compatibility issues, and advancing cost-effective and scalable production methods. These insights provide a foundation for future research and development in the field, paving the way for the practical implementation of self-healing polymer systems in sustainable construction practices.

1 Introduction

Долговечность конструкций является ключевой задачей для обеспечения безопасности, эксплуатационной эффективности зданий и сооружений [1], [2]. Строительные материалы подвергаются преждевременному разрушению из-за различных факторов, таких как механические, химические, биологические воздействия, ультрафиолетовое излучение и погодные условия [3]–[5].

Недостаточная долговечность конструкций может привести к следующим негативным последствиям:

- небезопасность: разрушение конструкций представляет угрозу для здоровья и жизни людей;
- эксплуатационные расходы: частые ремонты и замены приводят к значительным финансовым затратам;

Vafaeva, K.M.; Kordas, G.

Engineering Polymer Systems with Self-Healing Functionality to Enhance Structural Longevity;
2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2913. doi: 10.57728/ALF.29.13



- экологические проблемы: производство материалов и снос зданий и сооружений влекут за собой углеродные выбросы и строительные отходы;
- эстетическая непривлекательность: поврежденные конструкции снижают эстетическую привлекательность.

Решение вышеперечисленных проблем требует разработки инновационных строительных материалов, способных противостоять различным видам деградации. Перспективным направлением является разработка самовосстанавливающихся полимерных систем, способных автоматически устранять повреждения и продлевать срок службы конструкций, сокращая негативное воздействие на окружающую среду [6]–[8]. Проблема долговечности конструкций в строительной индустрии является ключевой задачей, требующей непрерывного внимания и инноваций. Структурная долговечность материалов, используемых в строительстве, фундаментально важна для обеспечения безопасности зданий и инфраструктуры. Существующие методы, хоть и эффективны, но сталкиваются с ограничениями, подчеркивая необходимость инновационных подходов.

В исследовании [9] подробно анализируются методы самовосстановления полимеров, полимерных композитов и покрытий. Основные стратегии включают в себя создание обратимых поперечных связей в полимерах и использование восстановительных агентов в трещинах. Рассматриваются процессы обмена связей, а также использование контейнеров, таких как стекловолокна или капсулы, которые разрываются при возникновении трещин.

В другой статье [10] представлен обзор основ самовосстанавливающихся полимерных систем, их развития и применения в различных областях, таких как структурные компоненты, покрытия и другие приложения. Обсуждаются как химические, так и нехимические самовосстанавливающиеся полимерные системы, предоставляются последние отчеты, а также освещаются будущие перспективы и вызовы в области разработки таких систем.

В работе авторов [11] представлены различные подходы и достижения в области самовосстанавливающихся полимеров, включая использование функциональных металл-ионов и динамических металл-лигандных связей. Такие полимеры обладают разнообразными свойствами, такими как диэлектрическая проницаемость, люминесценция, магнитные свойства, каталитическая активность, способность реагировать на различные стимулы и память формы. Статья также уделяет внимание преимуществам координационных связей при создании самовосстанавливающихся полимеров и приводит примеры функциональных самовосстанавливающихся полимеров, основанных на металл-лигандных взаимодействиях. Кроме того, исследовалось использование эффекта Джоуля в проводящих нанокompозитах как одного из методов самовосстановления, что позволяет создавать многофункциональные материалы с настраиваемыми свойствами [12].

Цель данного исследования заключается в проведении анализа инженерных полимерных систем с самовосстановлением, изучении различных стратегий их интеграции и оценке эффективности в увеличении долговечности строительных материалов.

Формулировка гипотезы предполагает, что инженерные полимерные системы с самовосстановлением могут значительно продлить срок службы строительных материалов и снизить затраты на их эксплуатацию. Результаты этого исследования могут быть фундаментальным шагом в разработке инновационных методов ремонта и создания более долговечных строительных материалов.

Самовосстанавливающиеся полимерные системы представляют собой перспективную технологию, способную внести значительные изменения в строительную отрасль. Дополнительные исследования и разработки в данной области могут способствовать увеличению эффективности и снижению затрат на самовосстанавливающиеся полимеры, что, в свою очередь, сделает их более доступными и привлекательными для широкого внедрения.

2 Materials and Methods

В этом разделе описана методология исследования, которая включает в себя две части: обзор литературы и анализ полученных данных.

2.1 Поиск литературы

Обзор литературы проводился с использованием двух основных источников: библиографической и реферативной базы данных Scopus и поисковой системы Google Scholar. Поиск осуществлялся с использованием комбинации релевантных ключевых слов и фраз.

Vafaeva, K.M.; Kordas, G.

Engineering Polymer Systems with Self-Healing Functionality to Enhance Structural Longevity; 2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2913. doi: 10.57728/ALF.29.13



Ключевые слова были тщательно подобраны для всестороннего охвата соответствующей литературы. Результаты поиска представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры поиска
Table 1. Search Parameters

№	Поисковой запрос	Количество результатов	Ограничения	Комментарий
1	self AND healing AND polymers	7 614	без ограничений	выгружены 7 614
2	self-healing AND polymers AND polymer AND composites	1 947	без ограничений	выгружены 1 947
3	self-healing AND polymers AND durability AND enhancement	14	без ограничений	выгружены 14
4	self-healing AND polymers AND sustainable AND construction	41	без ограничений	выгружены 41
5	self-healing AND polymers AND nanotechnology AND in AND construction	6	без ограничений	выгружены 6
6	self-healing AND polymers AND microencapsulated AND healing AND agents	69	без ограничений	выгружены 69
7	self-healing AND polymers AND intrinsic AND self-healing AND polymers	413	без ограничений	выгружены 413
8	self-healing AND polymers AND bioinspired AND self-healing	104	без ограничений	выгружены 104
9	self-healing AND polymers AND smart AND materials	808	без ограничений	выгружены 808
10	self-healing AND polymers AND engineering AND materials	608	без ограничений	выгружены 608
Итого найдено:		11 624	Итого выгружено: 11 624	

2.2 Извлечение данных

После получения результатов поиска данные из базы данных Scopus были экспортированы в формате RIS, который широко используется для обмена библиографическими данными. Это позволило сохранить целостность данных и сделать их доступными для различных инструментов анализа.

2.3 Анализ данных на Python

Анализ данных проводился с использованием языка программирования Python и нескольких ключевых библиотек, специально предназначенных для работы и анализа данных. В процессе исследования были задействованы библиотеки Pandas и NumPy для выполнения различных этапов анализа. Библиотека Pandas предоставила мощные инструменты для структурирования, фильтрации и агрегации данных, тогда как NumPy была использована для эффективных математических операций и обработки массивов данных.

Кроме того, для визуализации результатов анализа данных была задействована библиотека Matplotlib, предоставляющая широкий спектр инструментов для создания графиков и диаграмм. Это способствовало наглядному представлению данных и выявлению основных тенденций.

Использование таких разнообразных библиотек в языке программирования Python обеспечило не только эффективность в обработке данных, но и разносторонний анализ, позволяя углубиться в структуру и характеристики исследуемой информации. Такой подход расширил возможности исследования, обогатив его множеством аспектов и выводов.

2.4 Анализ в VOSviewer

В дополнение к анализу данных на Python, данные были импортированы в программное обеспечение VOSviewer для библиометрического анализа. VOSviewer позволяет создавать визуальные представления о совпадении ключевых слов, авторов и публикаций в наборе данных. Это позволило получить ценную информацию о наиболее важных темах исследований, закономерностях и взаимосвязях между различными концепциями.

2.5 Интеграция результатов

Результаты анализа данных на Python и анализа VOSviewer были объединены для создания целостной картины литературного ландшафта, связанного с темой исследования. Это позволило

определить ключевые направления исследований, влиятельных авторов и значительные группы связанных публикаций.

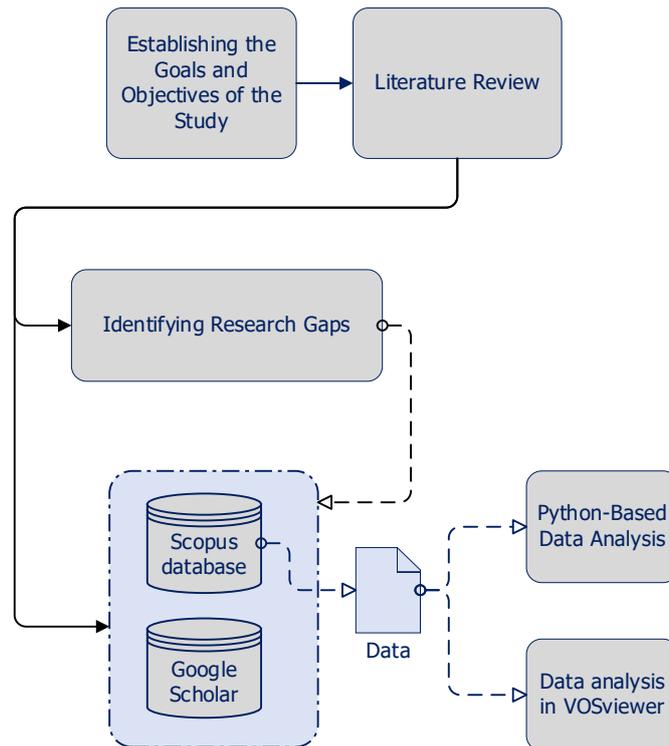


Рис. 1 – Схема методологии
Fig. 1 - Methodology Scheme

Таким образом, методология, использованная в этом исследовании, является эффективной и позволяет получить всеобъемлющее представление о литературном ландшафте, связанном с самовосстанавливающимися полимерными системами в строительстве. Использование двух основных источников литературы, а также различных методов анализа данных позволило получить достоверные и значимые результаты.

3 Results and Discussion

3.1 Библиометрический анализ литературы

На графике, представленном на Рисунке 2 показано распределение количества публикаций на основе найденных результатов из БД Scopus. Данные были извлечены из базы данных Scopus по ключевым словам из Таблицы 1 и объединены для комплексной аналитики за весь период без фильтрации по времени. На графике отчетливо виден положительный тренд в количестве научных публикаций, особенно в после 2020 года. Это может свидетельствовать о растущем интересе к научным исследованиям по данной тематике.

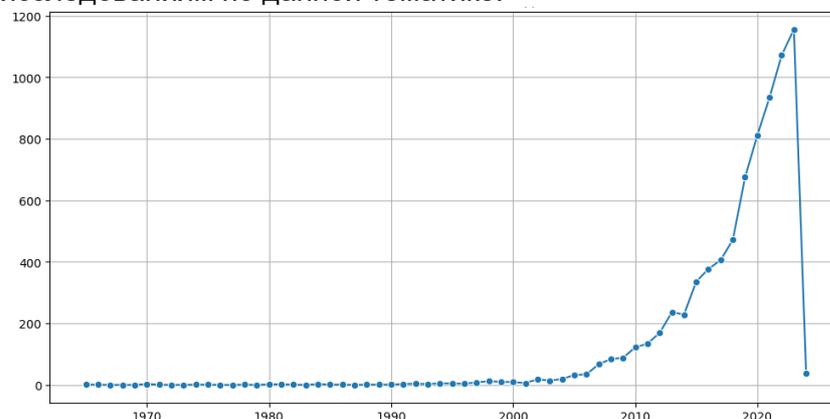


Рис. 2 – Количество публикаций по годам

Fig. 2 - Number of Publications Over the Years

Анализ диаграмм на Рис.3 с распределением документов по отраслям и типам публикаций позволяет выделить несколько ключевых наблюдений:

- доля документов по отраслям: научные области "Science" (30.8%), "Chemistry" (20.6%) и "Engineering" (14.7%) занимают лидирующие позиции в общем объеме научных публикаций. "Chemical Engineering" (10.9%), "Physics and Astronomy" (7.8%) и "Biochemistry, Genetics and Molecular Biology" (4.6%) также значительно представлены.

- типы документов: большая часть публикаций относится к типу "Article" (73.0%), что свидетельствует о преобладании исследовательских статей в общем объеме научных материалов. "Review" (11.9%) и "Conference Paper" (8.1%) следуют за исследовательскими статьями и имеют заметный вклад в общую картину научных публикаций.

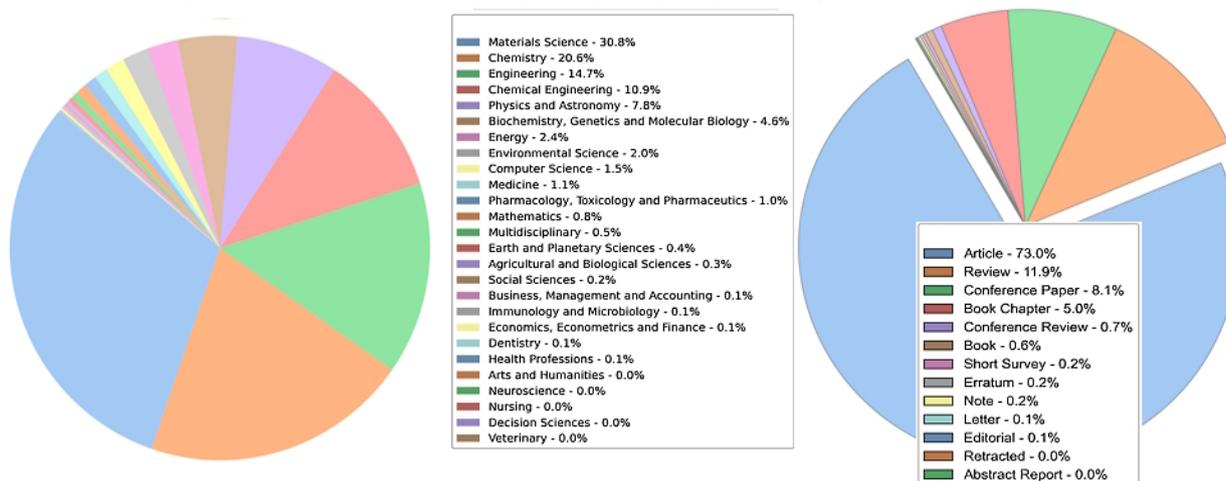


Рис. 3 – Доля публикаций по отраслям и типам документов
Fig. 3 - Share of Publications by Sectors and Document Types

Рис. 4 демонстрирует фрагмент аналитики взаимосвязи исследований в программном обеспечении VOSviewer. Анализ фрагмента взаимосвязей в VOSviewer по ключевым словам отражает множество тем и направлений исследований в области материалов и биомедицинских приложений: исследования по литий-ионным батареям, анодам, соединениям железа и стойкости к химическому воздействию; изучение полимеров, металлических координационных соединений, антимикробных свойств и антикоррозионных покрытий; продвинутые материалы для медицинских приложений, такие как тканевые клеи, адгезивы, антимикробные свойства, наночастицы, инъекционные гидрогели; исследования по механическим свойствам, самовосстановлению, гидрофобности, полимеризации, диффузии.

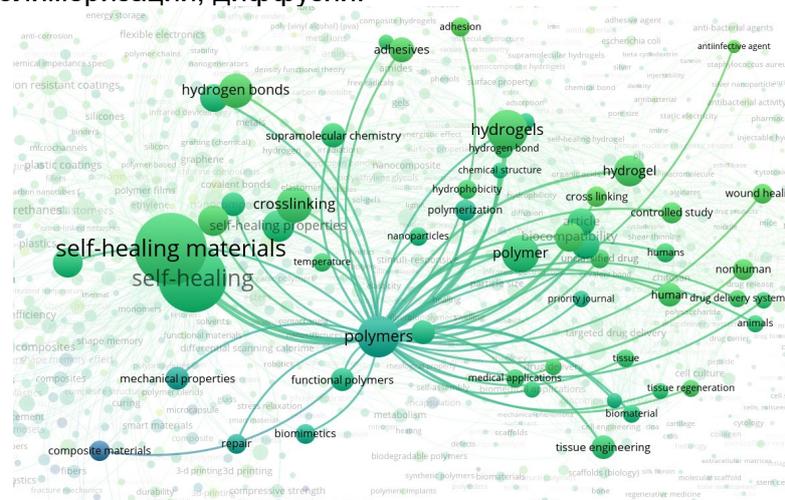


Рис. 4 – Фрагмент аналитики взаимосвязей в VOSviewer
Fig. 4 - Fragment of Network Analysis in VOSviewer

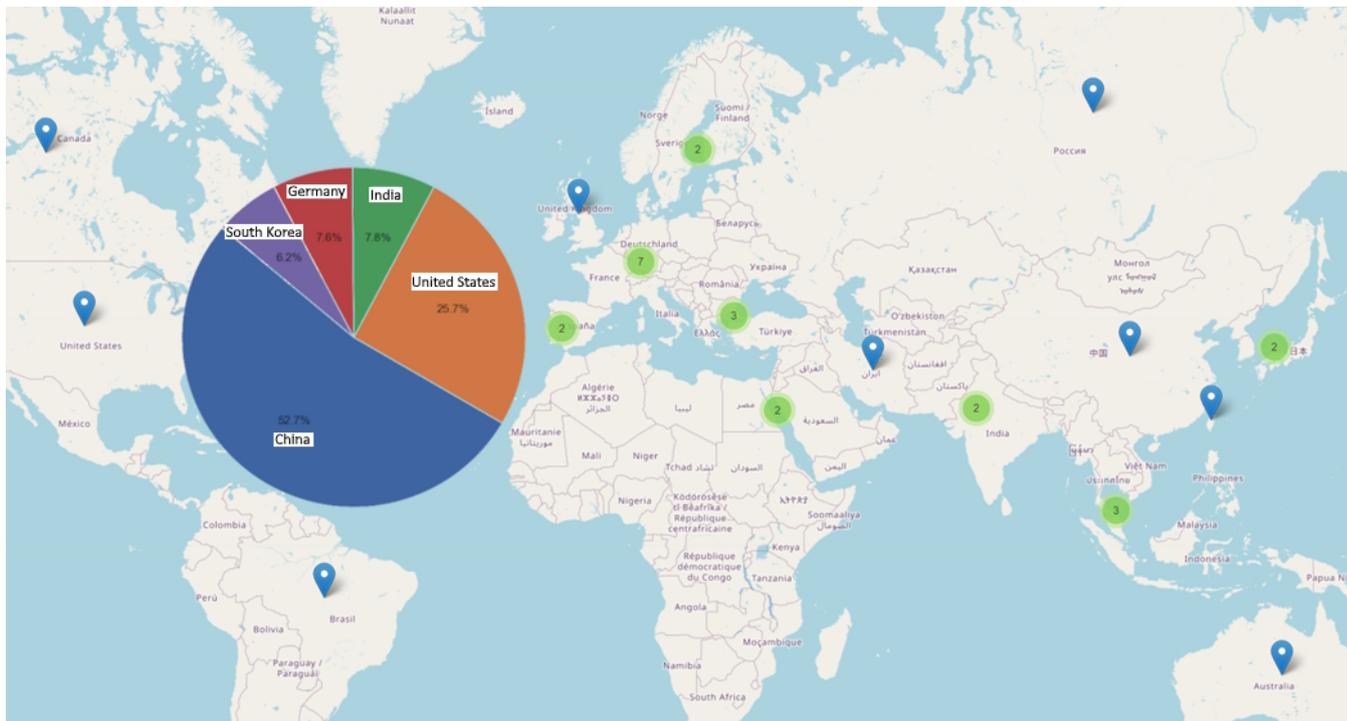


Рис. 8 – Карта активности по тематикам исследования
 Fig. 8 - Activity map by research topics

Другие страны, внесшие значительный вклад в исследования самовосстанавливающихся материалов, включают Нидерланды, Бельгию, Канаду, Австралию, Италию, Францию, Иран, Испанию, Россию, Сингапур, Швейцарию, Турцию, Малайзию, Тайвань, Саудовскую Аравию, Гонконг, Бразилию и Польшу.

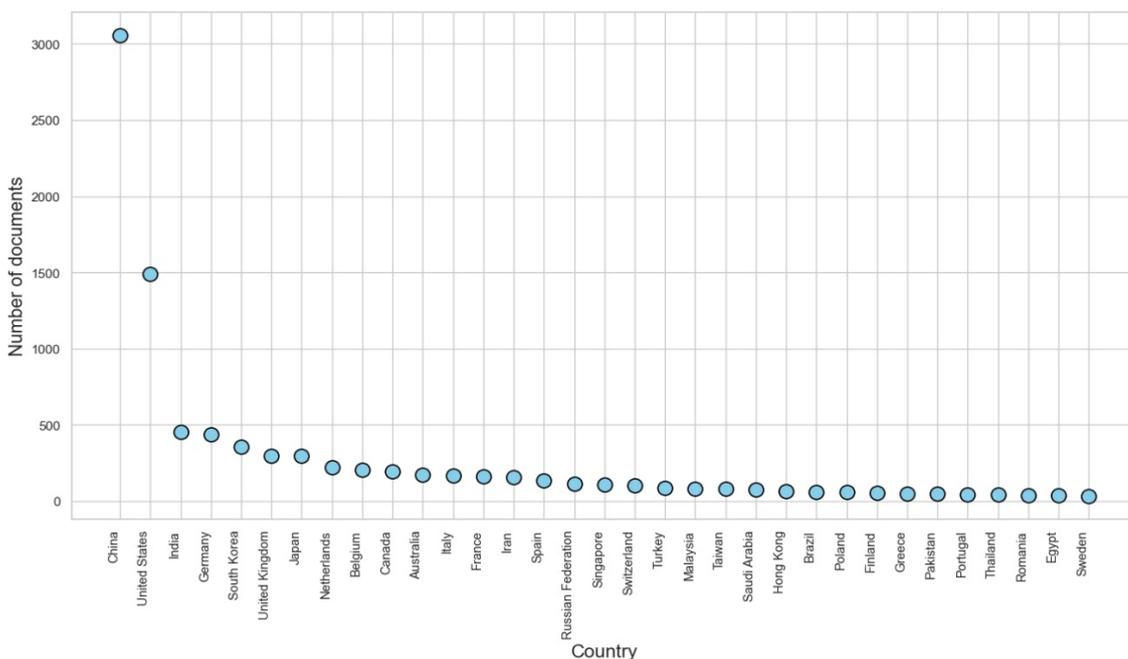


Рис. 9 – Диаграмма рассеяния по странам
 Fig. 9 - Scatter Diagram by Countries

Библиометрический анализ литературы по теме самовосстанавливающихся полимерных систем в строительстве показал, что интерес к этой области растет во всем мире. Китай является мировым лидером в области исследований самовосстанавливающихся полимерных систем, за ним следуют Соединенные Штаты, Индия, Германия, Южная Корея, Великобритания и Япония.



Исследования в области самовосстанавливающихся полимерных систем в строительстве ориентированы на несколько основных направлений. В первую очередь, это включает разработку и применение функциональных материалов, полученных с использованием технологии аддитивного производства. Вторым важным направлением является исследование и применение проводящих гидрогелей и других электроактивных материалов. Третьим аспектом исследований является разработка и применение антикоррозионных покрытий.

Проведенные исследования в данной области предоставляют значительные перспективы для повышения долговечности и надежности строительных конструкций, а также для снижения затрат на их эксплуатацию и ремонт.

Ожидается дальнейший рост интереса к изучению самовосстанавливающихся полимерных систем в строительстве. Этот рост обусловлен несколькими факторами, включая акцентирование к разработке материалов, способных к восстановлению или замене без необходимости утилизации.

3.2. Стратегии самовосстановления полимерных систем для строительных материалов

Разработка строительных материалов с функциональностью самовосстановления является перспективным направлением, направленным на продление срока службы конструкций и снижение экологического воздействия строительной индустрии. Этот раздел посвящен исследованию различных стратегий интеграции самовосстановления в полимерные системы, критически оценивая их преимущества, недостатки и пригодность для различных применений.

Микрокапсулированные агенты восстановления. Принцип работы: в полимерную матрицу внедряются микрокапсулы, содержащие жидкие или твердые вещества, способствующие восстановлению материала при повреждении. Капсулы могут разорваться при деформации, высвобождая агент восстановления, который заполняет трещину и инициирует химическую реакцию для восстановления перекрестных связей полимера.

Преимущества: высокая эффективность восстановления, возможность использования различных типов агентов восстановления, широкая совместимость с различными полимерами. Недостатки: потенциальное снижение механических свойств матрицы из-за микрокапсул, возможность преждевременного высвобождения агента, ограниченная глубина проникновения агента.

Внутренне самовосстанавливающиеся полимеры. Принцип работы: полимерная матрица модифицируется таким образом, что в случае повреждения молекулы полимера способны к рекомбинации, восстанавливая структуру материала. Модификация может достигаться за счет включения определенных функциональных групп.

Преимущества: отсутствие микрокапсул, потенциально более высокие механические свойства, отсутствие необходимости специальных условий для запуска процесса восстановления. Недостатки: ограниченные типы полимеров, пригодных для модификации, сложность контроля процесса восстановления, зависимость от внешних факторов (температура, влажность).

Биоинспирированные подходы. Принцип работы: имитация механизмов самовосстановления, наблюдаемых в природе, таких как образование тромбов у позвоночных или регенерация тканей растений. Полимеры могут быть модифицированы для взаимодействия с ферментами или другими биологическими системами для заживления повреждений.

Преимущества: высокая биосовместимость, потенциально высокая эффективность восстановления, возможность самовосстановления на микро- и макроуровне. Недостатки: ограниченное понимание биологических процессов, сложности в контроле и масштабировании процессов, потенциальное негативное влияние окружающей среды на работу системы.

Комбинированные подходы. Сочетание нескольких методов самовосстановления для достижения синергетического эффекта, улучшающего эффективность и расширяющего область применения.

Роль нанотехнологий. Наночастицы могут использоваться для капсулирования агентов восстановления, улучшения дисперсии агентов в матрице, повышения прочности и каталитического воздействия на процесс восстановления.

В Таблице 2 представлено сравнение стратегий самовосстановления в материалах. Каждая стратегия самовосстановления описана с учетом принципа работы, преимуществ, недостатков и областей применения. Данное сравнение служит важным инструментом для оценки и выбора подходящей стратегии самовосстановления в зависимости от конкретных требований и условий применения материала.

Таблица 2. Сравнение стратегий самовосстановления
Table 2. Comparison of Self-healing Strategies

Стратегия самовосстановления	Принцип работы	Преимущества	Недостатки	Применения
Микрокапсулированные агенты [13–18]	Внедрение микрокапсул в полимерную матрицу	Высокая эффективность, разнообразие агентов	Потенциальное снижение механических свойств, ограниченная глубина проникновения	Покрытия, трубы, композитные материалы
Внутренне самовосстанавливающиеся полимеры [11], [19]–[23]	Модификация полимерной матрицы для рекомбинации молекул	Отсутствие микрокапсул, потенциально более высокие механические свойства	Ограниченные типы полимеров, сложность контроля процесса, зависимость от внешних факторов	Мембраны, покрытия, электронные устройства
Биоинспирированные подходы [19], [24]–[27]	Имитация биологических механизмов восстановления	Высокая биосовместимость, потенциально высокая эффективность	Ограниченное понимание биологических процессов, сложности в контроле и масштабировании	Биомедицинские материалы, покрытия, ткани для одежды
Комбинированные подходы [28]–[32]	Использование нескольких стратегий одновременно	Синергетический эффект, расширение области применения	Требует дополнительных исследований, высокая сложность	Различные области применения

Таблица 3 представляет сравнение пригодности различных стратегий самовосстановления для различных применений в строительных материалах. Каждый тип строительного материала рассматривается в контексте четырех стратегий самовосстановления: микрокапсулированные агенты, внутренне самовосстанавливающиеся полимеры, биоинспирированные подходы и комбинированные подходы. Таблица предоставляет информацию о возможности использования каждой стратегии в конкретных областях.

Таблица 3. Сравнение пригодности для различных применений
Table 3. Comparison of Suitability for Various Applications

Тип строительного материала	Микрокапсулированные агенты	Внутренне самовосстанавливающиеся полимеры	Биоинспирированные подходы	Комбинированные подходы
Покрытия [33]–[36]	Да	Да	Да	Да
Трубы [37]–[41]	Да	Возможно	Нет	Да
Композитные материалы [42]–[45]	Да	Возможно	Возможно	Да
Электронные устройства [46]–[50]	Возможно	Да	Возможно	Да



Таблица 4 предоставляет сравнительную информацию о четырех стратегиях самовосстановления в строительных материалах: микрокапсулированные агенты, внутренне самовосстанавливающиеся полимеры, биоинспирированные подходы и комбинированные подходы. Каждая стратегия описана с точки зрения основного химического процесса, ключевых веществ, и условий восстановления.

Таблица 4. Химические процессы в стратегиях самовосстановления
Table 4. Chemical Processes in Self-healing Strategies

Стратегия самовосстановления	Основной химический процесс	Ключевые вещества	Условия восстановления
Микрокапсулированные агенты	рекомбинация полимерных цепей, химические реакции	различные агенты восстановления	при механическом воздействии
Внутренне самовосстанавливающиеся полимеры	рекомбинация молекул полимера	специфические функциональные группы	при механическом воздействии
Биоинспирированные подходы	вариативны в зависимости от подхода	биологически активные вещества	различные, в зависимости от имитируемого процесса
Комбинированные подходы	синтез и восстановление	разнообразные агенты и функциональные группы	различные, в зависимости от комбинации стратегий

В заключении данного раздела можно подытожить, что разработка материалов с функцией самовосстановления представляет собой важное направление, направленное на увеличение долговечности конструкций и снижение воздействия на окружающую среду в строительной индустрии. В ходе рассмотрения четырех стратегий - микрокапсулированных агентов, внутренне самовосстанавливающихся полимеров, биоинспирированных подходов и комбинированных подходов, были проанализированы их преимущества, недостатки и области применения.

3.3 Критерии оценки самовосстанавливающихся полимерных систем для строительных материалов

Для оценки самовосстанавливающихся полимерных систем для строительных материалов необходимо учитывать следующие критерии:

- эффективность восстановления: степень заживления повреждения, скорость процесса;
- механические свойства: сохранение прочности, эластичности и других характеристик после восстановления;
- долговечность: длительность действия системы самовосстановления;
- стоимость: затраты на производство и внедрение материала;
- воздействие на окружающую среду;

Эти критерии можно разделить на две группы: *критерии функциональности* - эффективность восстановления, механические свойства, долговечность и *критерии конкурентоспособности* - эти критерии определяют экономическую и экологическую привлекательность самовосстанавливающегося материала. Выбор оптимального метода самовосстановления зависит от следующих факторов: требования к функциональности, условия применения, технологические возможности.

Самовосстанавливающиеся полимерные системы находят широкое применение в строительстве, например:

- покрытия: самовосстанавливающиеся покрытия используются для защиты поверхностей от повреждений и износа. Такие покрытия могут быть применены для защиты фасадов зданий, мостов, трубопроводов и других сооружений [51–56];
- трубы: самовосстанавливающиеся трубы используются для ремонта и защиты от повреждений водопроводных, канализационных и других инженерных сетей [38], [39], [57]–[60];
- композитные материалы: самовосстанавливающиеся композитные материалы используются для изготовления конструкций, требующих высокой прочности и долговечности.



Такие материалы могут быть применены для изготовления элементов каркаса зданий, мостов, судов и других сооружений [43], [61]–[66];

- строительные материалы: самовосстанавливающиеся строительные материалы используются для изготовления стен, перекрытий, фундаментов и других элементов конструкций [67]–[73].

Существуют различные подходы к самовосстановлению в полимерных системах, каждый со своими преимуществами и недостатками. Выбор оптимального метода зависит от конкретного применения, требований к механическим свойствам, экономической целесообразности и экологических ограничений. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию существующих методов, разработку новых стратегий и материалов, а также на преодоление технологических и экономических барьеров для широкомасштабного внедрения самовосстанавливающихся полимерных систем в строительную индустрию.

Таблица 5 предоставляет критерии оценки различных стратегий самовосстанавливающихся полимерных систем. Каждая стратегия рассматривается с точки зрения эффективности восстановления, механических свойств, долговечности, стоимости и экологичности. Такой подход обеспечивает обширный обзор и позволяет провести сравнительный анализ, что является важным инструментом при выборе подходящей стратегии для конкретного применения в строительных материалах.

Таблица 5. Критерии оценки самовосстанавливающихся полимерных систем
Table 5. Criteria for Evaluating Self-healing Polymer Systems

Критерии оценки	Микрокапсулированные агенты	ВСП	Биоинспирированные подходы	Комбинированные подходы
Эффективность восстановления	высокая	зависит от типа полимера и модификации	потенциально высокая	зависит от комбинации стратегий
Механические свойства	возможно снижение	возможно улучшение	зависит от выбранных механизмов	синергетический эффект, зависит от комбинации стратегий
Долговечность	зависит от стойкости капсул	зависит от стойкости модификации	зависит от устойчивости биологических механизмов	зависит от комбинации стратегий
Стоимость	зависит от типа капсул и агентов	зависит от выбранной модификации	зависит от используемых биомиметических элементов	зависит от комбинации стратегий
Экологичность	возможно влияние на окружающую среду	возможны более экологичные варианты	зависит от источников биомиметики	зависит от комбинации стратегий

В данном разделе были рассмотрены критерии оценки самовосстанавливающихся полимерных систем для строительных материалов, выделив ключевые аспекты функциональности и конкурентоспособности. Эффективность восстановления, механические свойства, долговечность, стоимость и экологичность являются важными параметрами при выборе стратегии самовосстановления.

Существующие подходы к самовосстановлению предоставляют уникальные возможности, но их выбор требует тщательного анализа требований конкретного применения, условий эксплуатации, а также учета факторов экономической и экологической эффективности. Оптимизация существующих методов, разработка новых стратегий и материалов, а также преодоление технологических и экономических барьеров станут важными направлениями будущих исследований. Таблица 5 предоставляет систематизированный обзор критериев оценки для различных стратегий самовосстанавливающихся полимерных систем, что обеспечивает важный инструмент для принятия информированных решений при выборе подходящей стратегии в строительной индустрии.



3.4 Внутренне самовосстанавливающиеся полимеры: принцип работы, преимущества и недостатки

Внутренне самовосстанавливающиеся полимеры (ВСП) представляют собой класс материалов, которые способны самостоятельно восстанавливать повреждения, вызванные механическими воздействиями, такими как трещины, изломы и разрывы. В отличие от микрокапсулированных и биоинспирированных подходов, во ВСП агент восстановления не находится в отдельной фазе, а включен непосредственно в полимерную матрицу. Это обеспечивает более высокую эффективность восстановления и снижает риск преждевременного высвобождения агента.

Химические процессы и молекулярные механизмы самовосстановления. Самовосстановление во ВСП может осуществляться за счет различных химических процессов, таких как:

- рекомбинация полимерных цепей: при повреждении полимерной матрицы происходит разрыв полимерных цепей. После этого поврежденные цепи могут рекомбинироваться, восстанавливая исходную структуру материала;
- образование новых химических связей: при повреждении полимерной матрицы может происходить образование новых химических связей между полимерными цепями. Это приводит к заполнению трещины и восстановлению материала;
- восстановление кристаллической структуры: в некоторых случаях самовосстановление может осуществляться за счет восстановления кристаллической структуры материала;
- выбор конкретного механизма самовосстановления зависит от типа полимера и условий эксплуатации материала.

Преимущества и недостатки метода. ВСП обладают рядом преимуществ по сравнению с другими методами самовосстановления, включая:

- высокая эффективность восстановления: ВСП способны восстанавливать повреждения до исходного состояния;
- отсутствие необходимости в дополнительных компонентах: ВСП не содержат микрокапсул или других дополнительных компонентов, что упрощает процесс изготовления и снижает стоимость материала;
- возможность широкого применения: ВСП могут быть изготовлены из различных полимеров, что позволяет использовать их для широкого спектра применений.

К недостаткам ВСП можно отнести: ограниченный набор полимеров - ВСП могут быть изготовлены только из тех полимеров, которые способны к самовосстановлению; зависимость от внешних факторов - эффективность самовосстановления может зависеть от внешних факторов, таких как температура, влажность и наличие кислорода.

Таблица 6 предоставляет краткий обзор преимуществ и недостатков метода ВСП по различным аспектам. Это позволяет быстро оценить, насколько эффективен этот метод в контексте эффективности восстановления, механических свойств, долговечности и стоимости.

Таблица 6. Сводная таблица ВСП: преимущества и недостатки метода
Table 6. Summary Table of Inherently Self-healing Polymers: Advantages and Disadvantages of the Method

Категории/Аспекты	Преимущества	Недостатки
Эффективность восстановления	- Высокая эффективность восстановления	- Ограниченный выбор полимеров Зависимость от внешних факторов
Механические Свойства	- Возможность сохранения механических свойств после восстановления	- Возможное снижение механических свойств матрицы
Долговечность	- Отсутствие необходимости в дополнительных компонентах	- Зависимость от внешних факторов
Стоимость	- Отсутствие необходимости в дополнительных компонентах	- Зависимость от внешних факторов



ВСП представляют собой перспективный класс материалов, которые могут значительно улучшить долговечность и эксплуатационные характеристики строительных конструкций. Дальнейшие исследования в этой области направлены на решение следующих задач: разработка новых методов самовосстановления, которые позволят повысить эффективность и универсальность ВСП; оптимизация условий эксплуатации ВСП, чтобы обеспечить их надежную работу в различных условиях; разработка методов снижения стоимости производства ВСП, чтобы сделать их более доступными для широкого применения. Решение этих задач позволит сделать ВСП реальной альтернативой традиционным материалам в строительстве.

3.5 Биоинспирированные технологии самовосстановления: возможности и вызовы

Биоинспирированные подходы к самовосстановлению основаны на изучении механизмов самовосстановления, наблюдаемых в природе. В природе существует множество примеров самовосстанавливающихся материалов, таких как кости, раковины, ткани и другие. Эти материалы способны восстанавливать повреждения, вызванные механическими воздействиями, химическими агентами или другими факторами.

Механизмы самовосстановления в природе. В природе самовосстановление может осуществляться за счет различных механизмов, включая:

- физические механизмы: в некоторых случаях самовосстановление может осуществляться за счет физических процессов, таких как адгезия, капиллярные явления или кристаллизация;
- химические механизмы: в других случаях самовосстановление может осуществляться за счет химических процессов, таких как рекомбинация полимерных цепей, образование новых химических связей или восстановление кристаллической структуры;
- биологические механизмы: самовосстановление может также осуществляться с участием биологических систем, таких как ферменты, клетки или микроорганизмы.

Разработка биомиметических полимеров. Исследования биоинспирированных подходов к самовосстановлению направлены на разработку биомиметических полимеров, обладающих аналогичными свойствами. Биомиметические полимеры могут быть изготовлены из различных материалов, таких как полимеры, металлы, керамика или композиты. Для создания биомиметических полимеров используются различные методы, включая:

- включение в полимерную матрицу агентов восстановления, таких как микрокапсулы, наполненные ремонтным составом или биологически активными веществами;
- введение в полимерную матрицу функциональных групп, которые позволяют полимерам рекомбинироваться или образовывать новые химические связи при повреждении;
- использование биологических систем для инициирования или катализирования процесса самовосстановления.

Биоинспирированные технологии самовосстановления имеют большой потенциал для применения в различных областях, включая строительство, энергетику, транспорт и медицину. В строительстве биоинспирированные технологии самовосстановления могут использоваться для изготовления следующих материалов:

Исследования в области биоинспирированных технологий самовосстановления направлены на решение следующих задач: разработка новых механизмов самовосстановления, которые позволят повысить эффективность и универсальность биомиметических полимеров; оптимизация условий эксплуатации биомиметических полимеров, чтобы обеспечить их надежную работу в различных условиях; разработка методов снижения стоимости производства биомиметических полимеров, чтобы сделать их более доступными для широкого применения. Решение этих задач позволит сделать биоинспирированные технологии самовосстановления реальной альтернативой традиционным материалам в строительстве.

Биоинспирированные технологии самовосстановления имеют ряд преимуществ по сравнению с другими методами самовосстановления, включая: высокая эффективность восстановления - биомиметические полимеры способны восстанавливать повреждения до исходного состояния; возможность широкого применения - биомиметические полимеры могут быть изготовлены из различных материалов, что позволяет использовать их для широкого спектра применений; природоподобность - биомиметические полимеры имитируют механизмы самовосстановления, наблюдаемые в природе, что делает их более безопасными и экологичными.



Однако, биоинспирированные технологии самовосстановления также имеют ряд недостатков, такие как: сложность разработки - разработка биомиметических полимеров требует глубокого понимания механизмов самовосстановления в природе; высокая стоимость - производство биомиметических полимеров может быть дорогостоящим. Несмотря на эти недостатки, биоинспирированные технологии самовосстановления имеют большой потенциал для развития и применения в различных областях. Эффективность каждого метода самовосстановления определяется степенью восстановления повреждений, скоростью процесса и долговечностью восстановленного материала.

Микрокапсулированные агенты восстановления обладают высокой эффективностью восстановления, поскольку они способны заполнять даже крупные повреждения. Однако, они имеют ряд недостатков, включая: потенциальное снижение механических свойств материала - микрокапсулы могут снижать прочность и эластичность материала; возможность преждевременного высвобождения агента - микрокапсулы могут лопаться преждевременно, что приведет к потере эффективности восстановления; ограниченная глубина проникновения агента - микрокапсулы могут ограничивать глубину проникновения агента, что может привести к неполному восстановлению повреждений.

Внутренне самовосстанавливающиеся полимеры являются более подходящим подходом для применений, где требуется высокая прочность и долговечность, таких как изготовление строительных конструкций. Они также могут быть использованы для применений, где требуется восстановление повреждений на макроуровне.

Таблица 7. Преимущества и недостатки биоинспирированных технологий
Table 7. Advantages and Disadvantages of Bioinspired Technologies

Категории/Аспекты	Преимущества	Недостатки
Эффективность восстановления	- Высокая эффективность восстановления	- Сложность разработки Высокая стоимость производства
Механические Свойства	- Сохранение механических свойств Высокая долговечность	- Потенциальное снижение механических свойств материала
Долговечность	- Сохранение механических свойств Высокая долговечность	- Ограниченный выбор полимеров Зависимость от внешних факторов
Стоимость	- Отсутствие необходимости в дополнительных компонентах Возможность использования различных материалов	- Сложность разработки Высокая стоимость производства

Биоинспирированные подходы являются наиболее перспективным подходом к самовосстановлению, поскольку они обладают высокой эффективностью и универсальностью. Они особенно подходят для применений, где требуется высокая степень восстановления повреждений, таких как изготовление медицинских имплантатов и электронных устройств.

Каждый метод самовосстановления имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют его пригодность для различных приложений и материалов. Дальнейшие исследования в области самовосстановления направлены на разработку новых методов и материалов, которые позволят повысить эффективность и универсальность самовосстановления, а также снизить стоимость производства самовосстанавливающихся материалов.

Следует отметить, что исследования в области самовосстановления продолжаются, и в настоящее время разрабатываются новые методы и материалы, которые могут повысить эффективность и универсальность самовосстановления, а также снизить стоимость производства самовосстанавливающихся материалов.

4 Conclusions

1. На основании результатов библиографического анализа литературы, охватывающего анализ данных по 11 624 научным статьям по тематикам самовосстанавливающихся полимерных систем в строительстве, можно сделать следующие выводы:

- интерес к данной области растет во всем мире;



- Китай является мировым лидером в области исследований самовосстанавливающихся полимерных систем;

- исследования в области самовосстанавливающихся полимерных систем в строительстве ориентированы на несколько основных направлений: разработка и применение функциональных материалов, полученных с использованием технологии аддитивного производства; исследование и применение проводящих гидрогелей и других электроактивных материалов; разработка и применение антикоррозионных покрытий.

Проведенные исследования в данной области предоставляют значительные перспективы для повышения долговечности и надежности строительных конструкций, а также для снижения затрат на их эксплуатацию и ремонт.

2. Ожидается дальнейший рост интереса к изучению самовосстанавливающихся полимерных систем в строительстве. Этот рост обусловлен несколькими факторами, включая акцентирование к разработке материалов, способных к восстановлению или замене без необходимости утилизации.

3. Для дальнейшего развития исследований в области самовосстанавливающихся полимерных систем в строительстве необходимо сосредоточиться на следующих направлениях:

- разработка новых материалов и методов, позволяющих повысить эффективность самовосстановления;

- изучение механизмов самовосстановления и разработка методов управления ими;

- оценка эксплуатационных свойств самовосстанавливающихся полимерных систем в реальных условиях;

Реализация этих направлений позволит создать новые материалы и технологии, которые будут способствовать повышению долговечности и надежности строительных конструкций, а также снижению затрат на их эксплуатацию и ремонт.

4. В ходе рассмотрения четырех стратегий самовосстановления в строительных материалах были сделаны следующие выводы:

- микрокапсулированные агенты обеспечивают высокую эффективность восстановления, но могут снижать механические свойства материала и ограничивать глубину проникновения агента.

- внутренне самовосстанавливающиеся полимеры не содержат микрокапсул и могут обеспечить более высокие механические свойства, но требуют использования специальных условий для запуска процесса восстановления.

- биоинспирированные подходы обеспечивают высокую биосовместимость и потенциально высокую эффективность восстановления, но требуют дополнительных исследований для понимания биологических процессов и масштабирования технологий.

- комбинированные подходы позволяют достичь синергетического эффекта и расширить область применения самовосстановления, но требуют дальнейших исследований.

В целом, каждая стратегия самовосстановления имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при выборе подходящей стратегии для конкретного применения. Для строительных материалов наиболее перспективными являются стратегии микрокапсулированных агентов и внутренне самовосстанавливающихся полимеров, поскольку они обеспечивают высокую эффективность восстановления и могут быть применены к широкому спектру материалов.

5 Fundings

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as the grant Self-Healing Construction Materials (contract No. 075-15-2021-590 dated 04.06.2021).

References

- 1 Qu, F., Li, W., Dong, W., Tam, V.W.Y. and Yu, T. (2021) Durability Deterioration of Concrete under Marine Environment from Material to Structure: A Critical Review. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **35**, 102074. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.102074>.
- 2 Kodur, V., Kumar, P. and Rafi, M.M. (2020) Fire Hazard in Buildings: Review, Assessment and Strategies for Improving Fire Safety. *PSU Research Review*, Emerald Group Holdings Ltd., **4**, 1–23. <https://doi.org/10.1108/PRR-12-2018-0033/FULL/PDF>.



- 3 Barrelas, J., Silva, A., de Brito, J. and Tadeu, A. (2023) Effects of Climate Change on Rendered Façades: Expected Degradation in a Progressively Warmer and Drier Climate—A Review Based on the Literature. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 352, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 352. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13020352>.
- 4 Lisci, C., Sitzia, F., Pires, V. and Mirão, J. (2022) Building Stones Durability by UVA Radiation, Moisture and Spray Accelerated Weathering. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, Springer Nature, **7**, 1–14. <https://doi.org/10.1007/S41024-022-00196-9/TABLES/5>.
- 5 Riahinezhad, M., Hallman, M. and Masson, J.F. (2021) Critical Review of Polymeric Building Envelope Materials: Degradation, Durability and Service Life Prediction. *Buildings* 2021, Vol. 11, Page 299, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **11**, 299. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11070299>.
- 6 Wang, S. and Urban, M.W. (2020) Self-Healing Polymers. *Nature Reviews Materials* 2020 5:8, Nature Publishing Group, **5**, 562–583. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0202-4>.
- 7 Idumah, C.I. (2021) Recent Advancements in Self-Healing Polymers, Polymer Blends, and Nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, SAGE Publications Ltd, **29**, 246–258. https://doi.org/10.1177/0967391120910882/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0967391120910882-FIG8.JPEG.
- 8 Padhan, A.K. and Mandal, D. (2020) Types of Chemistries Involved in Self-Healing Polymeric Systems. *Self-Healing Polymer-Based Systems*, Elsevier, 17–73. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818450-9.00002-7>.
- 9 Irzhak, V.I., Uflyand, I.E. and Dzhardimalieva, G.I. (2022) Self-Healing of Polymers and Polymer Composites. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 5404, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 5404. <https://doi.org/10.3390/POLYM14245404>.
- 10 Surendran, A. and Thomas, S. (2020) Self-Healing Polymeric Systems—Fundamentals, State of Art, and Challenges. *Self-Healing Polymer-Based Systems*, Elsevier, 1–16. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818450-9.00001-5>.
- 11 Li, C.-H., Zuo, J.-L., Li, C.-H. and Zuo, J.-L. (2020) Self-Healing Polymers Based on Coordination Bonds. *Advanced Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **32**, 1903762. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201903762>.
- 12 Orellana, J., Moreno-villoslada, I., Bose, R.K., Picchioni, F., Flores, M.E. and Araya-hermosilla, R. (2021) Self-Healing Polymer Nanocomposite Materials by Joule Effect. *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 649, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 649. <https://doi.org/10.3390/POLYM13040649>.
- 13 Gao, C., Ruan, H., Yang, C. and Wang, F. (2021) Investigation on Microcapsule Self-Healing Mechanism of Polymer Matrix Composites Based on Numerical Simulation. *Polymer Composites*, John Wiley & Sons, Ltd, **42**, 3619–3631. <https://doi.org/10.1002/PC.26083>.
- 14 Baharom, Z., Idris, M.I., Lee, T.C., Syed Abu Bakar, S.A. and Abdullah, H.Z. (2020) Characterizations on Microencapsulated Sunflower Oil as Self-Healing Agent Using In Situ Polymerization Method. *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, **1010**, 433–438. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.1010.433>.
- 15 Barbaz-Isfahani, R., Saber-Samandari, S. and Salehi, M. (2023) Experimental and Numerical Research on Healing Performance of Reinforced Microcapsule-Based Self-Healing Polymers Using Nanoparticles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, SAGE Publications Ltd, **42**, 95–109. https://doi.org/10.1177/07316844221102945/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_07316844221102945-FIG17.JPEG.
- 16 Zotiadis, C., Patrikalos, I., Loukaidou, V., Korres, D.M., Karantonis, A. and Vouyiouka, S. (2021) Self-Healing Coatings Based on Poly(Urea-Formaldehyde) Microcapsules: In Situ Polymerization, Capsule Properties and Application. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **161**, 106475. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2021.106475>.
- 17 Üzümlü, O., Andiç-Çakır, Ö., Alver, N., Saltan, F. and Akat, H. (2022) Self-Healing of Cement-Based Composites by Use of Micro-Encapsulated Polymeric Agents. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis, **26**, 7526–7539. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.2003249>.
- 18 Zhu, D.Y., Rong, M.Z. and Zhang, M.Q. (2015) Self-Healing Polymeric Materials Based on Microencapsulated Healing Agents: From Design to Preparation. *Progress in Polymer Science*, Pergamon, **49–50**, 175–220. <https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2015.07.002>.



- 19 Pathan, N. and Shende, P. (2021) Strategic Conceptualization and Potential of Self-Healing Polymers in Biomedical Field. *Materials Science and Engineering: C*, Elsevier, **125**, 112099. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2021.112099>.
- 20 Cioffi, M.O.H., Bomfim, A.S.C., Ambrogi, V. and Advani, S.G. (2022) A Review on Self-Healing Polymers and Polymer Composites for Structural Applications. *Polymer Composites*, John Wiley & Sons, Ltd, **43**, 7643–7668. <https://doi.org/10.1002/PC.26887>.
- 21 Hornat, C.C. and Urban, M.W. (2020) Shape Memory Effects in Self-Healing Polymers. *Progress in Polymer Science*, Pergamon, **102**, 101208. <https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2020.101208>.
- 22 Kahar, N.N.F.N.M.N., Osman, A.F., Alosime, E., Arsat, N., Azman, N.A.M., Syamsir, A., Itam, Z. and Hamid, Z.A.A. (2021) The Versatility of Polymeric Materials as Self-Healing Agents for Various Types of Applications: A Review. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 1194*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 1194. <https://doi.org/10.3390/POLYM13081194>.
- 23 Cho, S., Hwang, S.Y., Oh, D.X. and Park, J. (2021) Recent Progress in Self-Healing Polymers and Hydrogels Based on Reversible Dynamic B–O Bonds: Boronic/Boronate Esters, Borax, and Benzoxaborole. *Journal of Materials Chemistry A*, Royal Society of Chemistry, **9**, 14630–14655. <https://doi.org/10.1039/D1TA02308J>.
- 24 Algaifi, H.A., Bakar, S.A., Alyousef, R., Mohd Sam, A.R., Ibrahim, M.H.W., Shahidan, S., Ibrahim, M. and Salami, B.A. (2021) Bio-Inspired Self-Healing of Concrete Cracks Using New *B. Pseudomycooides* Species. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, **12**, 967–981. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.03.037>.
- 25 Asha, A.B., Ounkaew, A., Peng, Y.Y., Gholipour, M.R., Ishihara, K., Liu, Y. and Narain, R. (2022) Bioinspired Antifouling and Antibacterial Polymer Coating with Intrinsic Self-Healing Property. *Biomaterials Science*, Royal Society of Chemistry, **11**, 128–139. <https://doi.org/10.1039/D2BM01055K>.
- 26 Lossada, F., Hoenders, D., Guo, J., Jiao, D. and Walther, A. (2020) Self-Assembled Bioinspired Nanocomposites. *Accounts of Chemical Research*, American Chemical Society, **53**, 2622–2635. https://doi.org/10.1021/ACS.ACCOUNTS.0C00448/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AR0C00448_001.1.GIF.
- 27 Ganewatta, M.S., Wang, Z. and Tang, C. (2021) Chemical Syntheses of Bioinspired and Biomimetic Polymers toward Biobased Materials. *Nature Reviews Chemistry 2021 5:11*, Nature Publishing Group, **5**, 753–772. <https://doi.org/10.1038/s41570-021-00325-x>.
- 28 Zhai, L., Narkar, A. and Ahn, K. (2020) Self-Healing Polymers with Nanomaterials and Nanostructures. *Nano Today*, Elsevier, **30**, 100826. <https://doi.org/10.1016/J.NANTOD.2019.100826>.
- 29 Utrera-Barrios, S., Verdejo, R., López-Manchado, M.A. and Hernández Santana, M. (2020) Evolution of Self-Healing Elastomers, from Extrinsic to Combined Intrinsic Mechanisms: A Review. *Materials Horizons*, Royal Society of Chemistry, **7**, 2882–2902. <https://doi.org/10.1039/D0MH00535E>.
- 30 Ammar, M., Haleem, A., Javaid, M., Bahl, S. and Verma, A.S. (2022) Implementing Industry 4.0 Technologies in Self-Healing Materials and Digitally Managing the Quality of Manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **52**, 2285–2294. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.09.248>.
- 31 Jun Tan, Y., Jocelin Susanto, G., Parveen Anwar Ali, H., K Tee, B.C., Tan, Y.J., Susanto, G.J., Anwar Ali, H.P., K Tee, B.C., K Tee N, B.C. and C K Tee, S.B. (2021) Progress and Roadmap for Intelligent Self-Healing Materials in Autonomous Robotics. *Advanced Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **33**, 2002800. <https://doi.org/10.1002/ADMA.202002800>.
- 32 Zheng, N., Xu, Y., Zhao, Q. and Xie, T. (2021) Dynamic Covalent Polymer Networks: A Molecular Platform for Designing Functions beyond Chemical Recycling and Self-Healing. *Chemical Reviews*, American Chemical Society, **121**, 1716–1745. https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.0C00938/ASSET/IMAGES/MEDIUM/CRO0C00938_0014.GIF.
- 33 Malekhouyan, R., Neisiany, R.E., Khorasani, S.N., Das, O., Berto, F. and Ramakrishna, S. (2021) The Influence of Size and Healing Content on the Performance of Extrinsic Self-Healing Coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **138**, 49964. <https://doi.org/10.1002/APP.49964>.
- 34 Beach, M., Davey, T., Subramanian, P. and Such, G. (2023) Self-Healing Organic Coatings –

Vafaeva, K.M.; Kordas, G.

Engineering Polymer Systems with Self-Healing Functionality to Enhance Structural Longevity; 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2913. doi: 10.57728/ALF.29.13



- Fundamental Chemistry to Commercial Application. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **183**, 107759. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2023.107759>.
- 35 Cheng, M., Fu, Q., Tan, B., Ma, Y., Fang, L., Lu, C. and Xu, Z. (2022) Build a Bridge from Polymeric Structure Design to Engineering Application of Self-Healing Coatings: A Review. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **167**, 106790. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2022.106790>.
- 36 Gadwal, I. (2020) A Brief Overview on Preparation of Self-Healing Polymers and Coatings via Hydrogen Bonding Interactions. *Macromol 2021, Vol. 1, Pages 18-36*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **1**, 18–36. <https://doi.org/10.3390/MACROMOL1010003>.
- 37 Ekeocha, J., Ellingford, C., Pan, M., Wemyss, A.M., Bowen, C., Wan, C., Ekeocha, J., Ellingford, C., Wemyss, A.M., Wan, C., Pan, M. and Bowen, C. (2021) Challenges and Opportunities of Self-Healing Polymers and Devices for Extreme and Hostile Environments. *Advanced Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **33**, 2008052. <https://doi.org/10.1002/ADMA.202008052>.
- 38 Kong, W., Wu, B., Zhao, X. and Ye, L. (2023) A Novel Strategy for Construction of Multiple Dynamic Hybrid Crosslinking Network for Polyethylene Pipes and Self-Healing Behavior via Thermal Stimulation. *Composite Structures*, Elsevier, **319**, 117216. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.117216>.
- 39 Li, P., Du, Y., Liu, G., Huang, P. and Ding, Y. (2021) Light Self-Healing of Resin Matrix Composites Based on Pipe Network Carrier. *Materials Letters*, North-Holland, **288**, 129330. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2021.129330>.
- 40 Rod, K.A., Fernandez, C.A., Nguyen, M.T., Gardiner, J.B., Huerta, N.J., Glezakou, V.A., Varga, T., Rousseau, R. and Koech, P.K. (2020) Polymer-Cement Composites with Adhesion and Re-Adhesion (Healing) to Casing Capability for Geothermal Wellbore Applications. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **107**, 103490. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.103490>.
- 41 Zhao, P., Cao, M., Liu, C., Dai, Y., Tan, Y., Ji, S. and Xu, H. (2022) Water-Enhanced and Remote Self-Healing Elastomers in Various Harsh Environments. *ACS Applied Materials and Interfaces*, American Chemical Society, **14**, 27413–27420. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.2C05570/SUPPL_FILE/AM2C05570_SI_003.MP4.
- 42 Ramesh, M., Rajesh Kumar, L., Khan, A. and Asiri, A.M. (2020) Self-Healing Polymer Composites and Its Chemistry. *Self-Healing Composite Materials: From Design to Applications*, Woodhead Publishing, 415–427. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817354-1.00022-3>.
- 43 Shojaei, A. and Khasraghi, S.S. (2021) Self-Healing and Self-Sensing Smart Polymer Composites. *Composite Materials: Manufacturing, Properties and Applications*, Elsevier, 307–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820512-9.00015-0>.
- 44 JE, P.C., Sultan, M.T., Selvan, C.P., Irulappasamy, S., Mustapha, F., Basri, A.A. and Safri, S.N.A. (2020) Manufacturing Challenges in Self-Healing Technology for Polymer Composites — a Review. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, **9**, 7370–7379. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.04.082>.
- 45 Mobaraki, M., Ghaffari, M. and Mozafari, M. (2020) Basics of Self-Healing Composite Materials. *Self-Healing Composite Materials: From Design to Applications*, Woodhead Publishing, 15–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817354-1.00002-8>.
- 46 Zhang, K., Liu, Y., Wang, Z., Song, C., Gao, C. and Wu, Y. (2020) A Type of Self-Healable, Dissoluble and Stretchable Organosilicon Elastomer for Flexible Electronic Devices. *European Polymer Journal*, Pergamon, **134**, 109857. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2020.109857>.
- 47 Khatib, M., Zohar, O., Haick, H., Khatib, M., Zohar, O. and Haick, H. (2021) Self-Healing Soft Sensors: From Material Design to Implementation. *Advanced Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **33**, 2004190. <https://doi.org/10.1002/ADMA.202004190>.
- 48 Yang, Y., Dang, Z.M., Li, Q. and He, J. (2020) Self-Healing of Electrical Damage in Polymers. *Advanced Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **7**, 2002131. <https://doi.org/10.1002/ADVS.202002131>.
- 49 Gai, Y., Li, H., Li, Z., Gai, Y., Li, Z. and Li, H. (2021) Self-Healing Functional Electronic Devices. *Small*, John Wiley & Sons, Ltd, **17**, 2101383. <https://doi.org/10.1002/SMLL.202101383>.
- 50 Mashkoo, F., Lee, S.J., Yi, H., Noh, S.M. and Jeong, C. (2022) Self-Healing Materials for Electronics Applications. *International Journal of Molecular Sciences 2022, Vol. 23, Page 622*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **23**, 622. <https://doi.org/10.3390/IJMS23020622>.
- 51 Ye, K., Bi, Z., Cui, G., Zhang, B. and Li, Z. (2020) External Self-Healing Coatings in Anticorrosion Applications: A Review. *Corrosion*, Allen Press, **76**, 279–298. <https://doi.org/10.5006/3430>.



- 52 Manoj, A., Ramachandran, R. and Menezes, P.L. (2020) Self-Healing and Superhydrophobic Coatings for Corrosion Inhibition and Protection. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, **106**, 2119–2131. <https://doi.org/10.1007/S00170-019-04758-Z/FIGURES/9>.
- 53 Khan, A., Huang, K., Sarwar, M.G., Cheng, K., Li, Z., Tuhin, M.O. and Rabnawaz, M. (2020) Self-Healing and Self-Cleaning Clear Coating. *Journal of Colloid and Interface Science*, Academic Press, **577**, 311–318. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2020.05.073>.
- 54 Zhang, D., Peng, F. and Liu, X. (2021) Protection of Magnesium Alloys: From Physical Barrier Coating to Smart Self-Healing Coating. *Journal of Alloys and Compounds*, Elsevier, **853**, 157010. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2020.157010>.
- 55 Odarczenko, M., Thakare, D., Li, W., Venkateswaran, S.P., Sottos, N.R. and White, S.R. (2020) Sunlight-Activated Self-Healing Polymer Coatings. *Advanced Engineering Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **22**, 1901223. <https://doi.org/10.1002/ADEM.201901223>.
- 56 Xu, H., Tu, J., Xiang, G., Zhang, Y., Guo, X., Xu, H., Tu, J., Xiang, G.F., Zhang, Y. and Guo, X.D. (2020) A Thermosetting Polyurethane with Excellent Self-Healing Properties and Stability for Metal Surface Coating. *Macromolecular Chemistry and Physics*, John Wiley & Sons, Ltd, **221**, 2000273. <https://doi.org/10.1002/MACP.202000273>.
- 57 Khamani, S. and Khajouei, M. (2023) Self-Healing Composite Materials and Their Application in Pipelines. *Polymer Composite Systems in Pipeline Repair: Design, Manufacture, Application, and Environmental Impacts*, Gulf Professional Publishing, 249–265. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99340-1.00011-3>.
- 58 Zhu, H., Wang, T., Wang, Y. and Li, V.C. (2021) Trenchless Rehabilitation for Concrete Pipelines of Water Infrastructure: A Review from the Structural Perspective. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **123**, 104193. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104193>.
- 59 Jiang, C. yin, Liu, X. zhou, Li, X. juan, Fu, G. wei, Zhang, K. li, Wang, J. and Xie, C. dong. (2023) Preparation and Anti-Corrosion Performance of Temperature-Resistant Self-Healing Coating for L80 Pipe. *International Journal of Electrochemical Science*, Elsevier, **18**, 100041. <https://doi.org/10.1016/J.IJOES.2023.100041>.
- 60 Wang, X., Chen, X., Zhao, X. and Ning, R. (2023) Reliability Analysis of Self-Healing Systems Equipped with Multi-Component Protective Devices Operating in a Shock Environment. *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, 109844. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2023.109844>.
- 61 Kadam, S., Chavan, S. and Kanu, N.J. (2021) An Insight into Advance Self-Healing Composites. *Materials Research Express*, IOP Publishing, **8**, 052001. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ABFBA5>.
- 62 Chen, W., Feng, K., Wang, Y., Lin, Y. and Qian, H. (2021) Evaluation of Self-Healing Performance of a Smart Composite Material (SMA-ECC). *Construction and Building Materials*, Elsevier, **290**, 123216. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123216>.
- 63 Madia, E., Tserpes, K., Polydoropoulou, P. and Pantelakis, S. (2022) Simulation of the Mechanical Behavior of Self-Healing Composite Materials. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Emerald Publishing, **94**, 1567–1576. <https://doi.org/10.1108/AEAT-02-2022-0036/FULL/XML>.
- 64 Lee, M.W. (2020) Prospects and Future Directions of Self-Healing Fiber-Reinforced Composite Materials. *Polymers 2020, Vol. 12, Page 379*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **12**, 379. <https://doi.org/10.3390/POLYM12020379>.
- 65 Ma, Z., Li, H., Jing, X., Liu, Y. and Mi, H.Y. (2021) Recent Advancements in Self-Healing Composite Elastomers for Flexible Strain Sensors: Materials, Healing Systems, and Features. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, **329**, 112800. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2021.112800>.
- 66 Cerdan, K., Moya, C., Van Puyvelde, P., Bruylants, G. and Brancart, J. (2022) Magnetic Self-Healing Composites: Synthesis and Applications. *Molecules 2022, Vol. 27, Page 3796*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **27**, 3796. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27123796>.
- 67 Lesovik, V., Fediuk, R., Amran, M., Vatin, N. and Timokhin, R. (2021) Self-Healing Construction Materials: The Geomimetic Approach. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 9033*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 9033. <https://doi.org/10.3390/SU13169033>.
- 68 Ryparová, P., Tesárek, P., Schreiberová, H. and Prošek, Z. (2020) The Effect of Temperature on Bacterial Self-Healing Processes in Building Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **726**, 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/726/1/012012>.



- 69 Fernandez, C.A., Correa, M., Nguyen, M.T., Rod, K.A., Dai, G.L., Cosimbescu, L., Rousseau, R. and Glezakou, V.A. (2021) Progress and Challenges in Self-Healing Cementitious Materials. *Journal of Materials Science*, Springer, **56**, 201–230. <https://doi.org/10.1007/S10853-020-05164-7/FIGURES/13>.
- 70 Hossain, M.R., Sultana, R., Patwary, M.M., Khunga, N., Sharma, P. and Shaker, S.J. (2022) Self-Healing Concrete for Sustainable Buildings. A Review. *Environmental Chemistry Letters*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **20**, 1265–1273. <https://doi.org/10.1007/S10311-021-01375-9/TABLES/1>.
- 71 Litina, C. and Al-Tabbaa, A. (2020) First Generation Microcapsule-Based Self-Healing Cementitious Construction Repair Materials. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **255**, 119389. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119389>.
- 72 Jakubovskis, R., Jankutė, A., Urbonavičius, J. and Gribniak, V. (2020) Analysis of Mechanical Performance and Durability of Self-Healing Biological Concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **260**, 119822. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119822>.
- 73 Wang, M., Tan, X., Tu, Y., Xiang, P., Jiang, L., Yang, A., Xu, R. and Chen, X. (2020) Self-Healing PDMS/SiO₂-CaCO₃ Composite Coating for Highly Efficient Protection of Building Materials. *Materials Letters*, North-Holland, **265**, 127290. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2019.127290>.