



Review Article

Received: October 27, 2023

Accepted: December 6, 2023

Published: December 16, 2023

ISSN 2658-5553

## Self-healing building materials: The future of construction

Vafaeva, Khristina Maksudovna<sup>1\*</sup> Vatin, Nikolai Ivanovich<sup>1</sup> Kordas, George<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; [vafaeva.khm@gmail.com](mailto:vafaeva.khm@gmail.com) (V.K.M); [vatin@mail.ru](mailto:vatin@mail.ru) (V.N.I.); [gckordas@gmail.com](mailto:gckordas@gmail.com) (K.G.)

Correspondence:\* email [vafaeva.khm@gmail.com](mailto:vafaeva.khm@gmail.com)

### Keywords:

Self-healing; Building materials; Construction; Smart materials; Nanotechnology; Bioinspired; Sustainability; Infrastructure; Innovative materials; Structural longevity

### Abstract:

**The object of research** is Self-healing building materials. This work aims to comprehensively analyze the diverse mechanisms employed in self-healing building materials, assess their effectiveness across various materials and applications, and explore the broader implications of these materials for the future of construction. **Method.** This research scrutinizes the technical aspects of self-healing mechanisms employing a critical and comparative approach. The analysis includes examining microcapsule-based systems, bioinspired approaches, and intrinsic healing through shape-memory polymers. The strengths and limitations of each method are critically evaluated, considering their suitability for different material types and construction scenarios. Additionally, the potential of nanotechnology to enhance self-healing capabilities and introduce novel functionalities is discussed. **Results.** The findings reveal the promising potential of self-healing building materials to revolutionize the construction industry. The diverse mechanisms showcased potential benefits like prolonged lifespan, reduced maintenance burdens, and enhanced sustainability. However, challenges remain in optimizing healing efficiencies, overcoming cost barriers, and ensuring long-term material durability.

## 1 Introduction

Строительство, как одна из ведущих отраслей экономики, играет ключевую роль в создании и обслуживании инфраструктуры и зданий [1]. Несмотря на высокую прочность и долговечность традиционных строительных материалов, таких как бетон, сталь и древесина, они подвергаются разнообразным повреждениям, таким как атмосферные воздействия [2], коррозия [3], [4], физические нагрузки и деградация. Подобные виды повреждений могут привести к снижению характеристик конструкций и необходимости их восстановления или ремонта.

Заделка трещин, укрепление конструкций и замена поврежденных элементов являются эффективными методами, но обладают определенными недостатками, включая высокие затраты, временные разрывы в эксплуатации и возможность повторных повреждений [5], [6]. Эти ограничения подчеркивают актуальность поиска новых подходов к решению проблем устаревающей инфраструктуры и созданию более эффективных строительных материалов. В этом контексте самовосстанавливающиеся строительные материалы предлагают принципиально новый подход [7]–[9].

Самовосстанавливающиеся строительные материалы – это новое поколение интеллектуальных материалов, способных проактивно реагировать на микроповреждения и предотвращать их прогрессию [10], [11]. Существует несколько механизмов, которые могут быть внедрены в эти материалы, включая системы на основе микрокапсул [12], [13], биоинспирированные подходы [14], [15] и внутреннее самовосстановление [16], [17].

Vafaeva, K.M.; Vatin, N.I.; Kordas, G.

Self-healing building materials: The future of construction;  
2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2912. doi: 10.57728/ALF.29.12



Целью данного исследования является всестороннее изучение самовосстанавливающихся строительных материалов, включая их принципы, механизмы, перспективы применения и потенциальные преимущества. Для достижения этой цели определены следующие задачи:

- рассмотреть основные виды самовосстанавливающихся строительных материалов и их механизмы самовосстановления;
- оценить эффективность самовосстановления различных материалов в различных условиях;
- изучить потенциальные преимущества самовосстанавливающихся строительных материалов для строительной отрасли;

Дальнейшее развитие и внедрение самовосстанавливающихся строительных материалов может привести к значительному повышению эффективности и долговечности конструкций, а также к снижению затрат на их обслуживание и ремонт.

## 2 Materials and Methods

В данном разделе предоставляется детальное описание методики исследования, начиная с постановки целей и задач. Поиск научной литературы осуществляется с применением баз данных Scopus и поисковой системы Google Scholar для комплексного анализа соответствующих работ. Полученные данные подвергаются тщательному анализу с применением языка программирования Python и инструмента VOSviewer. Python используется для обработки данных, статистического анализа и визуализации результатов, в то время как VOSviewer помогает создать наглядное представление научного ландшафта, выделяя ключевые темы и авторов. Иллюстрация общей схемы методологии представлена на Рисунке 1.

### А. Поиск литературы

Был проведен поиск литературы по двум основным источникам: библиографическая и реферативная база данных Scopus и поисковая система Google Scholar. Поиск осуществлялся с применением сочетания ключевых слов и фраз, тщательно отобранных для полного охвата соответствующей литературы. Таблица 1 представляет поисковые запросы и количество полученных результатов в базе данных Scopus.

Таблица 1. Параметры поиска  
Table 1. Search Parameters

№	Поисковой запрос	Кол-во результатов	Ограничения поиска	Примечание
1	self-healing AND building AND materials	33 027	без ограничений по датам	выгружены первые 20 000
2	self AND healing AND concrete	2 339	без ограничений по датам	выгружены 2 339
3	self-healing AND polymers	7 043	без ограничений по датам	выгружены 7 043
4	self-healing AND ceramics	667	без ограничений по датам	выгружены 667
5	self-healing AND composites	5 081	без ограничений по датам	выгружены 5 081
6	self-healing AND mechanisms	4 831	без ограничений по датам	выгружены 4 831
7	microcapsules AND self-healing	1 522	без ограничений по датам	выгружены 1 522
8	bioinspired AND approaches AND self-healing	67	без ограничений по датам	выгружены 67
9	intrinsic AND self-healing	948	без ограничений по датам	выгружены 948
<b>Итого:</b>		<b>55 525</b>	<b>Выгружено результатов: 22 498</b>	

### В. Извлечение данных

После получения результатов поиска информация из базы данных Scopus была экспортирована в формат RIS (Research Information Systems) для удобства последующего анализа. Формат RIS широко применяется для обмена библиографическими данными и совместим с различными инструментами анализа данных.

### С. Анализ данных на Python

Vafaeva, K.M.; Vatin, N.I.; Kordas, G.

Self-healing building materials: The future of construction; 2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2912. doi: 10.57728/ALF.29.12

Анализ данных выполнялся с применением языка программирования Python, используя различные библиотеки для работы и анализа данных. Для процессов очистки, преобразования и подготовки данных использовались популярные библиотеки Python, такие как Pandas и NumPy.

#### D. Анализ в VOSviewer

Помимо использования Python для анализа данных, данные также были переданы в программное обеспечение VOSviewer. С его помощью удалось визуализировать ключевые слова и публикации в наборе данных, получив информацию о тематиках исследований, закономерностях и взаимосвязях между различными концепциями.

#### E. Интеграция результатов

Результаты анализа данных, полученных с использованием Python и VOSviewer, были объединены для создания целостного представления о научной области, связанной с темой исследования. Обобщенные результаты позволили выявить основные направления исследований и крупные группы связанных публикаций.

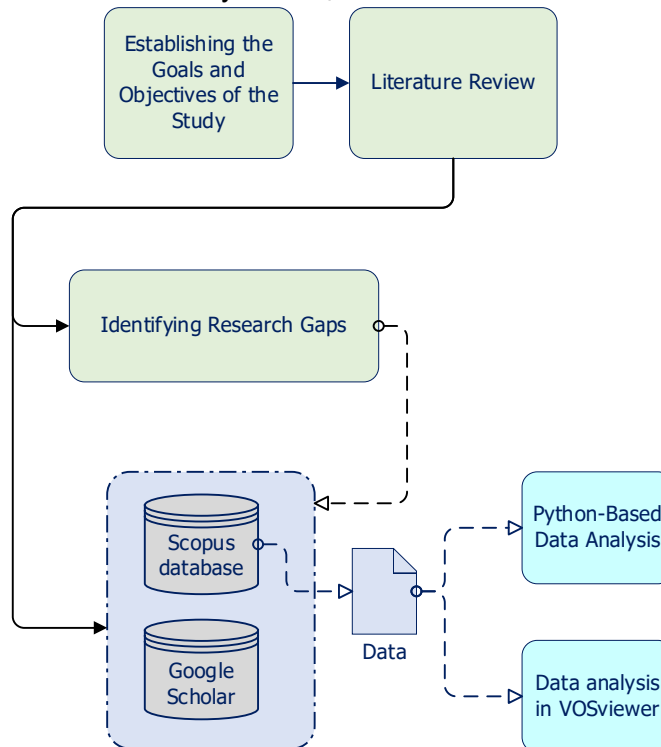


Рис. 1 – Схема методологии  
Fig. 1 - Methodology Scheme

Предложенная методология позволяет получить полезную информацию о научной области самовосстанавливающихся строительных материалов. Ее использование может способствовать развитию исследований в этой области и повышению эффективности использования самовосстанавливающихся материалов. Полученные данные являются надежными и могут быть использованы в дальнейших исследованиях в данной области.

## 3 Results and Discussion

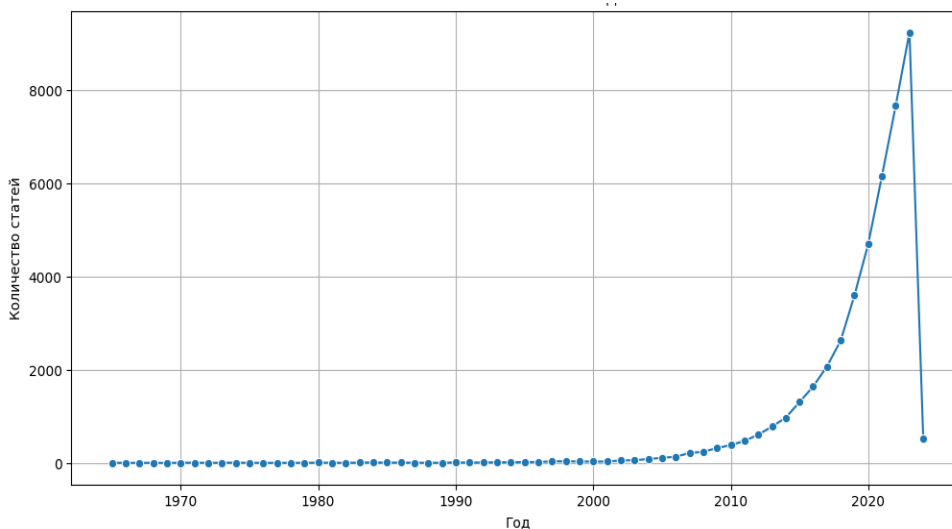
### 3.1 Библиометрический анализ литературы

На графике, представленном на Рисунке 2 показано общее количество публикаций по годам, соответствующих результатам поиска по заданным запросам, представленным в Таблице 1. Данные были извлечены из БД Scopus и объединены для комплексной аналитики за весь период без фильтрации по времени. Как демонстрирует график на Рис.2 и гистограмма распределения на Рисунке 3, наблюдается устойчивый рост количества публикаций с 2010 года по данной тематике. Пик публикаций приходится на 2023 год. Этот восходящий тренд можно объяснить несколькими факторами:

- возрастающий интерес к самовосстанавливающимся материалам со стороны исследователей и промышленности. Эта технология имеет потенциал для решения ряда проблем в строительной отрасли, таких как сокращение затрат на обслуживание и ремонт, повышение долговечности конструкций и снижение воздействия на окружающую среду;

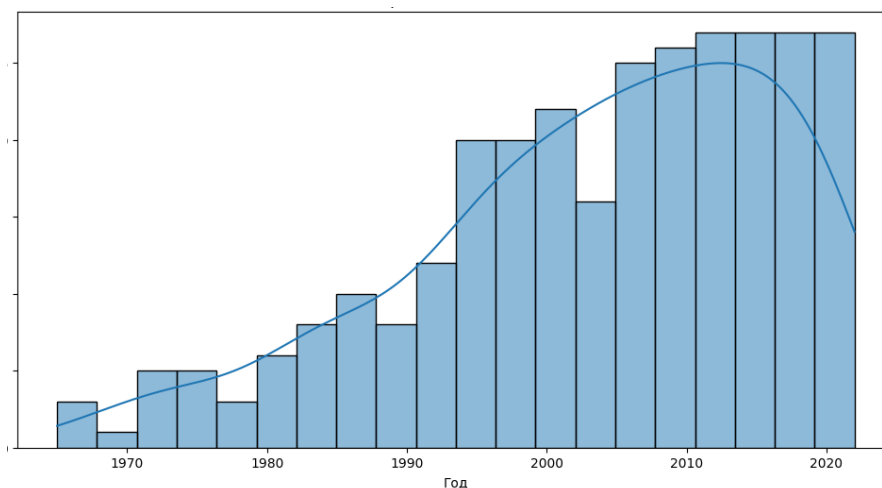
- развитие новых методов и материалов для самовосстановления. В последние годы было предложено множество новых подходов к самовосстановлению, что привело к значительному прогрессу в этой области;

- повышение доступности данных и инструментов для анализа исследований. Технологии позволяют исследователям быстро и эффективно получать доступ к информации из различных источников, что стимулирует развитие исследований в данной области.



**Рис. 2 – Общее количество публикаций по годам за весь период**  
**Fig. 2 - Total Number of Publications Over the Years**

Линия на гистограмме (Рис. 3) демонстрирует спад после пика публикаций, однако это не так и связано с тем, что выгрузка данных для аналитики была произведена в конце 2023 года. Таким образом, спад на гистограмме является артефактом, связанным с моментом выгрузки данных.



**Рис. 3 – Гистограмма распределения по годам за весь период**  
**Fig. 3 - Histogram of Distribution Over the Years for the Entire Period**

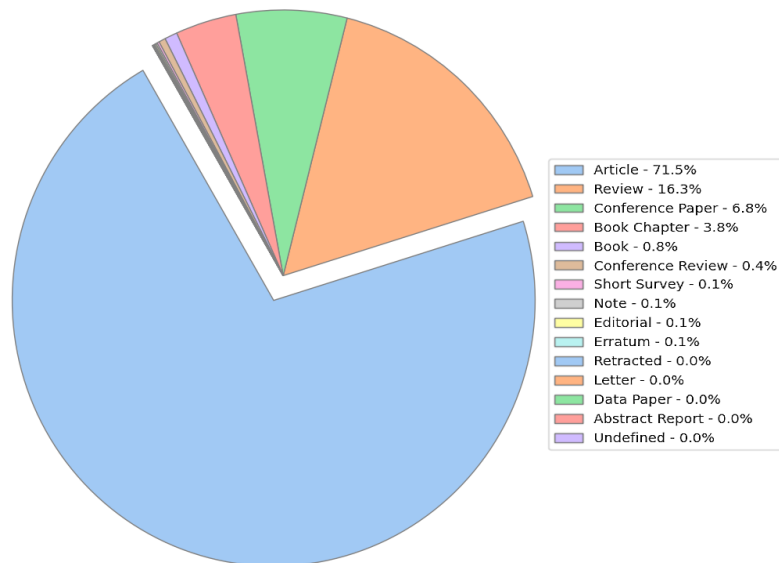
На круговой диаграмме (Рис. 4) отражено распределение научных публикаций по категориям в области материалов, обладающих свойствами самовосстановления. Наиболее распространенным типом публикаций являются статьи (Article), составляющие 71.5% от общего объема научных работ. Это указывает на тот факт, что главной направленностью исследований в данной области является разработка новых материалов и методов, способных обеспечивать самовосстановление. Второе по численности место занимают обзоры (Review) с долей 16.3% от общего числа публикаций. Это свидетельствует о динамичном развитии исследований в области

Vafaeva, K.M.; Vatin, N.I.; Kordas, G.

Self-healing building materials: The future of construction;

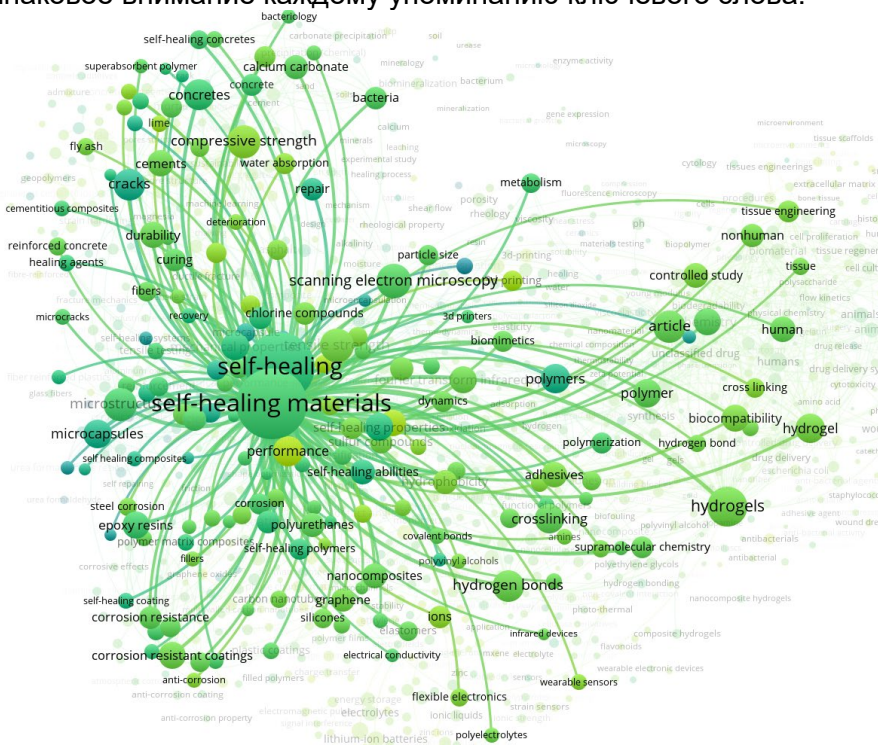
2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2912. doi: 10.57728/ALF.29.12

самовосстанавливающихся строительных материалов, отражая появление новых результатов и тенденций. Доклады конференций (Conference Paper) занимают третье место по числу публикаций, составляя 6.8% от общего объема. Это указывает на активное обсуждение исследований в данной области на конференциях и семинарах.



**Рис. 4 – Распределение по типам документов**  
**Fig. 4 - Distribution by Document Types**

Рис. 5 иллюстрирует аналитические аспекты взаимосвязей исследований, осуществленных с использованием программного обеспечения VOSviewer. Взаимосвязи, представленные на Рисунке 5, вычислены методом полного подсчета ключевых слов (Full counting). В этом методе каждое ключевое слово учитывается в полном объеме и равнозначно, что означает, что каждое упоминание ключевого слова считается за одну единицу. Таким образом, данный метод подсчета обеспечивает одинаковое внимание каждому упоминанию ключевого слова.

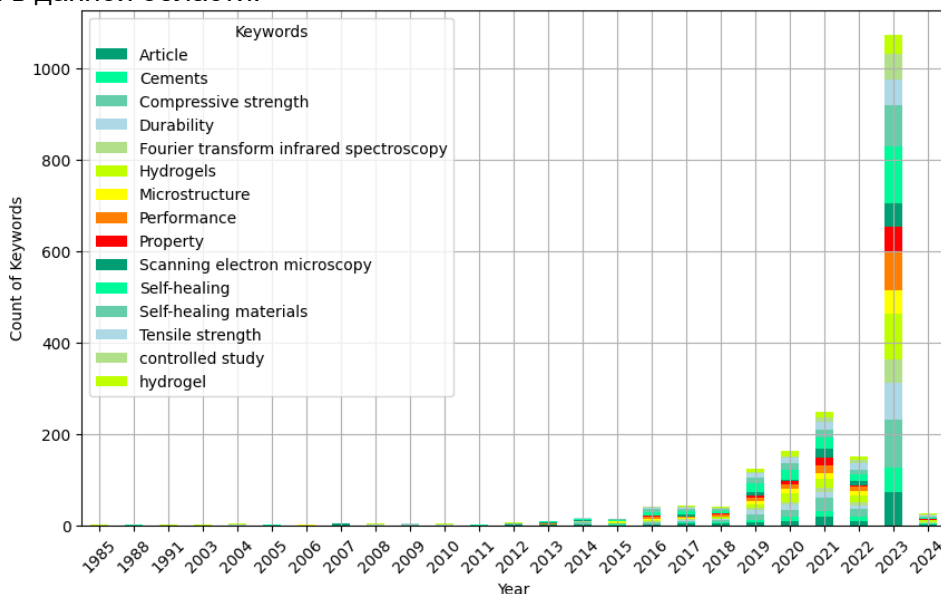


**Рис. 5 – Фрагмент аналитики взаимосвязей в VOSviewer**  
**Fig. 5 - Fragment of Network Analysis in VOSviewer**

Анализ в программе VOSviewer, использующий метод Full counting для ключевых слов в данном фрагменте, выявляет основные тематики исследований:

- **самовосстанавливающиеся бетоны:** ключевые термины включают самовосстанавливающиеся бетоны, бактериальную минерализацию, кальцит, цементы, трещины, прочность, микрокапсулы. Основной фокус направлен на разработку бетонов, способных автоматически восстанавливать трещины с использованием бактерий и осаждения кальцита для повышения долговечности и снижения затрат на ремонт;
- **биомиметические материалы:** включают термины самовосстанавливающиеся материалы, полимеры, адгезивы, ткани, регенерация тканей, клетки. Исследования материалов направлены на создание самовосстанавливающихся покрытий, тканевой инженерии и доставки лекарств;
- **антикоррозионные покрытия:** отражаются ключевые термины коррозия, эпоксидные смолы, полиуретаны, антибактериальные свойства, нанокompозиты. Исследования направлены на разработку самовосстанавливающихся покрытий с антикоррозионными и антибактериальными свойствами для защиты инфраструктуры, электроники и медицинских устройств;
- **функциональные материалы:** включают термины 3D-печать, диоксид углерода, биомиметика, генная экспрессия, метаболизм, флуоресцентная микроскопия. Исследования направлены на создание функциональных материалов с контролируруемыми свойствами и реакцией на внешние стимулы;
- **возможные направления исследований** включают усовершенствование технологий самовосстанавливающихся бетонов, разработку новых биомиметических материалов для медицины, инженерии тканей, создание многофункциональных покрытий, а также использование 3D-печати и биоинженерных методов для создания материалов с программируемым поведением.

Рис. 6 демонстрирует растущий интерес к этой области исследований. Наибольшее количество упоминаний имеют базовые термины, такие как "Cements", "Compressive strength", "Durability", отражающие фундаментальные аспекты исследования материалов. С годами появляются новые термины, такие как "Fourier transform infrared spectroscopy", "Hydrogels", "Microstructure", "Self-healing materials", "controlled study", показывающие углубление исследований и появление новых направлений, например, самовосстанавливающиеся материалы и гидрогели. На графике наблюдаются несколько пиков использования ключевых слов, например, в 2021–2023 годах, возможно, связанные с важными открытиями или публикациями в данной области.



**Рис. 6 – Наиболее высокочастотные ключевые слова по годам**  
**Fig. 6 - Most Frequent Keywords Over the Years**

Таким образом, можно прийти к выводам, что исследования материалов остаются активной и развивающейся областью. Интерес к фундаментальным свойствам материалов сохраняется, но появляются новые направления, такие как самовосстанавливающиеся материалы и гидрогели.



## 3.2 Механизмы самовосстановления

### 3.2.1 Системы на основе микрокапсул

Системы на основе микрокапсул представляют собой один из наиболее широко изучаемых подходов к самовосстановлению строительных материалов [18–20]. В этих системах микрокапсулы, содержащие агенты восстановления или катализаторы, равномерно распределяются в материале. При повреждении материала микрокапсулы разрушаются, высвобождая агенты восстановления, которые заполняют и герметизируют поврежденный участок.

**Принцип функционирования** систем, основанных на микрокапсулах, основан на следующем:

- *равномерное распределение микрокапсул*: микрокапсулы, содержащие в себе агенты восстановления или катализаторы, равномерно внедряются в структуру материала.
- *активация при повреждении*: в случае повреждения материала микрокапсулы подвергаются разрушению, что приводит к высвобождению агентов восстановления.
- *заполнение и герметизация поврежденной области*: высвобожденные агенты восстановления наполняют и герметизируют поврежденный участок материала.

Таблица 2 представляет сравнение различных типов микрокапсул по нескольким характеристикам. В таблице указаны размеры капсул, используемые материалы, механизм активации, эффективность восстановления, простота интеграции, стоимость и долговечность. Представленные значения представляют собой усредненные характеристики различных типов микрокапсул и могут служить ориентировочной основой для сравнения. Однако, стоит отметить, что в конкретных случаях значения могут варьироваться в зависимости от конкретных условий и материалов, используемых в исследованиях.

Таблица 2. Сравнение типов микрокапсул  
Table 2. Comparison of Microcapsule Types

Тип микрокапсулы	Размер	Материал	Механизм активации	Эффективность восстановления	Простота интеграции	Стоимость	Долговечность
Твердые микрокапсулы [21–24]	большой	полимер	давление	высокая	высокая	низкая	низкая
Жидкие микрокапсулы [25–27]	маленький	полимер	давление	высокая	высокая	высокая	низкая
Наномикрокапсулы [28–32]	очень маленький	полимер	давление	высокая	высокая	очень высокая	низкая
Металлические микрокапсулы [33–36]	средний	металл	давление	высокая	высокая	высокая	высокая
Керамические микрокапсулы [8], [37]–[40]	средний	керамика	давление	высокая	высокая	высокая	высокая

**Механизмы активации.** Микрокапсулы могут быть активированы различными способами:

*температурная активация*: микрокапсулы, содержащие термочувствительные материалы, разрушаются при достижении определенной температуры;

*активируемые давлением*: микрокапсулы с материалами, реагирующими на давление, разрушаются под воздействием внешнего давления;

*высвобождение при образовании трещин*: микрокапсулы, содержащие материалы, чувствительные к трещинам, раскрываются при формировании трещин в материале;

Выбор механизма активации следует проводить с учетом его срабатывания исключительно при повреждении материала.

Системы, основанные на микрокапсулах, представляют ряд преимуществ:

*высокая эффективность восстановления*: при повреждении материала микрокапсулы высвобождают обширное количество агентов восстановления, обеспечивая оперативное и эффективное восстановление поврежденного участка;



*универсальность:* микрокапсулы могут применяться в различных строительных материалах, включая бетон, полимеры, керамику и композиты;

Однако системы, базирующиеся на микрокапсулах, также обладают рядом недостатков, такими как: высокая стоимость, ограниченная долговечность - с течением времени микрокапсулы могут подвергаться разрушению, что может снизить эффективность самовосстановления.

В Таблице 3 представлены усредненные значения для сравнения характеристик механизмов активации микрокапсул для самовосстановления строительных материалов. Данные таблицы являются усредненными и могут не отражать все возможные вариации характеристик микрокапсул. В частности, данные могут не учитывать следующие факторы: тип и размер микрокапсул, материал микрокапсул, методы изготовления микрокапсул. Таким образом, данная таблица служит инструментом для систематизации и оценки ключевых характеристик механизмов активации микрокапсул.

**Таблица 3. Сравнение механизмов активации**  
**Table 3. Comparison of Activation Mechanisms**

Механизм активации	Эффективность восстановления	Простота интеграции	Стоимость	Долговечность
Температурная активация [12], [41]–[44]	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Давление [45–48]	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Трещинно-индуцированное высвобождение [36], [49]–[52]	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Химическая активация [53–56]	Средняя	Средняя	Низкая	Низкая
Биоактивация [57–60]	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая

Системы на основе микрокапсул представляют собой один из наиболее перспективных подходов к самовосстановлению строительных материалов. Они обладают рядом преимуществ, включая высокую эффективность восстановления, универсальность и простоту интеграции. Однако системы на основе микрокапсул также имеют ряд недостатков, включая высокую стоимость и ограниченную долговечность.

Дальнейшее развитие и совершенствование систем на основе микрокапсул позволит преодолеть эти недостатки и сделать их более эффективными и долговечными. В дополнение к вышеуказанным преимуществам и недостаткам, системы на основе микрокапсул также имеют ряд других особенностей, которые следует учитывать при их использовании. Таблица 4 представляет сравнительный анализ эффективности восстановления различных типов микрокапсул в строительных материалах. Приведенные значения эффективности восстановления являются усредненными и могут изменяться в зависимости от различных факторов, таких как тип материала, конкретные условия эксплуатации и методы производства микрокапсул.

**Таблица 4. Сравнение эффективности восстановления**  
**Table 4. Comparison of Recovery Efficiency**

Тип микрокапсулы	Материал	Механизм активации	Эффективность восстановления
Твердые микрокапсулы	Полимер [36], [44], [61]–[63]	Давление	90–95%
Твердые микрокапсулы	Керамика [15], [64]–[66]	Давление	85–90%
Твердые микрокапсулы	Стекло [36], [67]–[69]	Давление	80–85%
Жидкие микрокапсулы	Полимер [44], [70]–[72]	Давление	95–98%
Наномикрокапсулы	Полимер [12], [73]–[76]	Давление	98–99%

Тип микрокапсулы	Материал	Механизм активации	Эффективность восстановления
Металлические микрокапсулы	Полимер [77], [78]	Давление	95–98%
Керамические микрокапсулы	Полимер [76], [79]–[83]	Давление	90–95%

Размер микрокапсул оказывает влияние на их эффективность восстановления. Уменьшение размера микрокапсул приводит к увеличению площади поверхности. Это, в свою очередь, позволяет микрокапсулам высвобождать больше агентов восстановления, что содействует повышению общей эффективности восстановления. Однако уменьшение размера микрокапсул также сопровождается снижением их прочности, что делает их более уязвимыми к разрушениям при воздействии внешних факторов, что, в свою очередь, может снизить эффективность восстановления.

Материал микрокапсул определяет их прочность. Микрокапсулы, изготовленные из более прочных материалов, проявляют большую устойчивость к разрушениям при воздействии внешних факторов, что, в итоге, повышает общую эффективность восстановления. Кроме того, материал микрокапсул влияет на их химическую и биологическую устойчивость. Микрокапсулы, изготовленные из материалов, устойчивых к химическим воздействиям и воздействию микроорганизмов, обладают более продолжительной жизненной цикл и, следовательно, повышают эффективность восстановления.

Механизм активации определяет условия высвобождения агентов восстановления. Например, микрокапсулы, активируемые температурой, освобождают агенты восстановления при достижении определенной температуры, что способствует более эффективному восстановлению при воздействии повышенных температур.

Также важно отметить, что механизм активации определяет степень чувствительности микрокапсул к внешним воздействиям. Например, микрокапсулы, активируемые давлением, высвобождают агенты восстановления при воздействии внешнего давления, что делает их более подверженными воздействию внешних факторов и, следовательно, может снизить эффективность восстановления. Долговечность систем на основе микрокапсул зависит от различных факторов, таких как тип микрокапсул, материал, механизм активации, условия окружающей среды и метод интеграции в материал.

### 3.2.2 Биоинспирированное самовосстановление

Биоинспирированное самовосстановление представляет собой подход к самовосстановлению строительных материалов, основанный на принципах, используемых живыми организмами. В природе многие организмы обладают способностью восстанавливать поврежденные ткани или органы. Например, кости могут восстанавливаться после перелома, а кожа может восстанавливаться после пореза. В основе биоинспирированного самовосстановления лежит использование бактерий или ферментов для катализа процессов восстановления в строительных материалах. Бактерии и ферменты могут выполнять различные функции, включая: продукцию веществ, которые заполняют и герметизируют поврежденный участок. Например, бактерии могут продуцировать кальций-силикатный цемент, который заполняет трещины в бетоне. Удаление или разрушение поврежденных материалов: например, ферменты могут расщеплять поврежденные полимеры; создание новых материалов или структур: бактерии могут образовывать новые клетки или ткани.

Существует множество различных биоинспирированных методов самовосстановления, которые можно использовать для различных строительных материалов. Некоторые из наиболее распространенных методов включают:

- бактериальный бетон: в этом методе бетон смешивается с бактериями, которые продуцируют кальций-силикатный цемент. При повреждении бетона бактерии начинают размножаться и продуцировать цемент, который заполняет и герметизирует трещины.

- самовосстанавливающиеся полимеры с встроенными микробами: в этом методе полимеры смешиваются с микробами, которые могут выполнять различные функции, включая производство веществ, которые заполняют и герметизируют поврежденный участок, удаление или разрушение поврежденных материалов, или создание новых материалов или структур.

Vafaeva, K.M.; Vatin, N.I.; Kordas, G.

Self-healing building materials: The future of construction; 2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2912. doi: 10.57728/ALF.29.12



В Таблице 5 представлены усредненные значения эффективности восстановления и устойчивости методов биоинспирированного самовосстановления для различных типов материалов и функций. Метод определяет способ использования бактерий или ферментов для самовосстановления материала, тип материала определяет, для каких материалов может быть использован метод. Функция определяет, для каких целей может быть использован метод. Эффективность восстановления определяется как отношение восстановленной площади к площади повреждения. Устойчивость определяется как способность материала противостоять повреждениям и восстанавливаться после них. Следует отметить, что приведенные в таблице значения эффективности восстановления и устойчивости являются усредненными и могут варьироваться в зависимости от конкретных условий эксплуатации системы.

**Таблица 5. Сравнение методов биоинспирированного самовосстановления**  
**Table 5. Comparison of Bioinspired Self-healing Methods**

Метод	Тип материала	Функция	Эффективность восстановления	Устойчивость
Бактериальный бетон [84–88]	Бетон	Заполнение и герметизация трещин	Высокая	Высокая
Самовосстанавливающиеся полимеры с встроенными микробами [89–93]	Полимеры	Заполнение и герметизация трещин, удаление или разрушение поврежденных материалов, создание новых материалов или структур	Средняя	Средняя

Биоинспирированные подходы к самовосстановлению строительных материалов представляют собой перспективное направление исследований, которое может привести к созданию новых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Биоинспирированные подходы к самовосстановлению обладают рядом преимуществ, включая:

- высокая эффективность восстановления: биоинспирированные методы могут эффективно восстанавливать различные типы повреждений, включая трещины, коррозию и износ. Это достигается за счет использования бактерий или ферментов, которые могут синтезировать новые материалы или заполнять поврежденные участки;

- устойчивость: биоинспирированные методы самовосстановления могут быть устойчивыми к внешним воздействиям, таким как перепады температур и влажность. Это связано с тем, что бактерии и ферменты, используемые в этих методах, обычно обладают высокой устойчивостью к неблагоприятным условиям окружающей среды;

- биосовместимость: биоинспирированные методы могут быть биосовместимыми с живыми организмами, что делает их безопасными для использования в строительстве сооружений, контактирующих с людьми или животными. Это связано с тем, что бактерии и ферменты, используемые в этих методах, обычно не являются патогенами.

Вместе с тем, несмотря на перечисленные преимущества, биоинспирированные стратегии обладают также рядом недостатков, включая:

- сложность: проектирование и внедрение биоинспирированных методов самовосстановления могут представлять собой сложную задачу, требующую высокой степени технической компетентности;

- возможные экологические проблемы: использование бактерий или ферментов в строительных материалах может вызывать потенциальные экологические проблемы, такие как загрязнение окружающей среды или распространение патогенов.

Биоинспирированные подходы к самовосстановлению строительных материалов обладают рядом преимуществ, которые могут сделать их перспективными для использования в строительной отрасли. Однако, для широкого внедрения этих подходов необходимо решить ряд задач, связанных с их сложностью и возможными экологическими проблемами.

В Таблице 6 представлены усредненные значения эффективности восстановления, биосовместимости и экологических проблем для различных типов бактерий и ферментов, используемых в биоинспирированных методах самовосстановления строительных материалов. Усредненные значения в таблице представляют общий взгляд на эффективность восстановления, биосовместимость и возможные экологические проблемы, основанный на

имеющихся научных исследованиях. Однако следует отметить, что конкретные значения могут варьироваться в зависимости от различных факторов, таких как условия эксплуатации, тип материалов и др.

**Таблица 6. Сравнение типов бактерий и ферментов**  
**Table 6. Comparison of Types of Bacteria and Enzymes**

Тип бактерий или ферментов	Функция	Эффективность восстановления	Биосовместимость	Экологические проблемы
Бактерии, продуцирующие кальций-силикатный цемент [94–97]	Заполнение и герметизация трещин	высокая	да	Возможны
Бактерии, продуцирующие органические вещества [86], [97]–[101]	Заполнение и герметизация трещин	средняя	да	Возможны
Ферменты, расщепляющие поврежденные материалы [102–104]	Удаление или разрушение поврежденных материалов	высокая	да	Возможны
Ферменты, продуцирующие новые материалы или структуры [11], [105]–[107]	Создание новых материалов или структур	низкая	да	Возможны

Суммируя вышеизложенное, биоинспирированные методы самовосстановления представляют собой перспективное направление в области инноваций строительных материалов. Они обладают высокой эффективностью восстановления, устойчивостью и биосовместимостью, что делает их потенциально привлекательными для использования в различных строительных приложениях. Тем не менее, для успешной интеграции этих методов в практику строительства необходимо решить технические сложности и внимательно оценить возможные экологические последствия. С дальнейшим развитием исследований в этой области можно ожидать создание более продвинутых и устойчивых строительных материалов, способных к эффективному самовосстановлению.

### 3.2.3. Внутреннее самовосстановление

Внутреннее самовосстановление представляет собой подход к самовосстановлению строительных материалов, основанный на использовании обратимых химических связей или полимеров с памятью формы. В этих материалах способность к самовосстановлению является неотъемлемой частью их структуры и не требует добавления каких-либо дополнительных компонентов.

В материалах с обратимыми химическими связями повреждение приводит к разрыву этих связей. При определенных условиях эти связи могут восстанавливаться, что приводит к восстановлению материала. Одним из наиболее распространенных типов обратимых химических связей, используемых в самовосстанавливающихся материалах, являются реакции Дильса-Альдера. В этих реакциях две молекулы, содержащие альдегиды или кетоны, реагируют друг с другом, образуя новую молекулу. При нагревании эта новая молекула может расщепиться обратно на исходные компоненты. Другим типом обратимых химических связей, используемых в самовосстанавливающихся материалах, являются гидролизные связи. В этих связях один атом связан с другим атомом или группой атомов с помощью связи, которая может быть расщеплена водой.

В Таблице 7 представлены механизмы внутреннего самовосстановления строительных материалов, а также их основные характеристики.

**Таблица 7. Сравнение механизмов внутреннего самовосстановления**  
**Table 7. Comparison of Intrinsic Self-healing Mechanisms**



Механизм	Тип связи	Способ восстановления
Реакции Дильса-Альдера [108–112]	обратимые химические связи	нагревание или воздействие света
Гидролизные связи [113–117]	обратимые химические связи	воздействие воды
Полимеры с памятью формы [118–124]	стеклообразная структура	нагревание

Полимеры с памятью формы обладают способностью восстанавливать свою исходную форму после деформации. Эта способность основана на наличии в полимере двух типов структур: стеклообразной и кристаллической. При деформации полимера стеклообразная структура разрушается, а кристаллическая структура остается неизменной. При нагревании полимера стеклообразная структура восстанавливается, а кристаллическая структура деформируется, что приводит к восстановлению исходной формы полимера.

Внутреннее самовосстановление может происходить по различным механизмам, включая:

- реакции Дильса-Альдера: при повреждении материала обратимые химические связи разрываются, что приводит к образованию трещин или других дефектов. При определенных условиях, таких как нагревание или воздействие света, эти связи могут восстанавливаться, что приводит к заполнению дефектов и восстановлению материала.

- гидролизные связи: при повреждении материала гидролизные связи расщепляются, что приводит к образованию трещин или других дефектов. При воздействии воды эти связи могут восстанавливаться, что приводит к заполнению дефектов и восстановлению материала.

- полимеры с памятью формы: при повреждении материала стеклообразная структура разрушается, что приводит к образованию трещин или других дефектов. При нагревании полимера стеклообразная структура восстанавливается, что приводит к заполнению дефектов и восстановлению материала.

Внутреннее самовосстановление обладает рядом преимуществ, включая: эффективность восстановления - материалы с внутренним самовосстановлением могут эффективно восстанавливаться от различных типов повреждений, включая трещины, коррозию и износ; выбор материалов - внутреннее самовосстановление может быть реализовано в различных материалах, включая бетон, полимеры, керамику и композиты; долгосрочная стабильность - материалы с внутренним самовосстановлением могут быть стабильными в течение длительного времени, что снижает вероятность повторных повреждений. Однако внутреннее самовосстановление также имеет ряд ограничений, таких как: разработка и внедрение материалов с внутренним самовосстановлением может быть сложной задачей; высокая стоимость - материалы с внутренним самовосстановлением могут быть более дорогостоящими, чем традиционные материалы.

Внутреннее самовосстановление представляет собой перспективный подход к самовосстановлению строительных материалов. Этот подход обладает рядом преимуществ, включая эффективность восстановления, выбор материалов и долгосрочную стабильность. Однако разработка и внедрение материалов с внутренним самовосстановлением может быть сложной задачей, и необходимо учитывать потенциальные ограничения, такие как сложность и высокая стоимость.

В дополнение к вышеуказанным преимуществам и ограничениям, внутреннее самовосстановление также имеет ряд других особенностей, которые следует учитывать при его использовании. Температура может влиять на эффективность внутреннего самовосстановления. Например, реакции Дильса-Альдера протекают быстрее при более высоких температурах. Влажность также может влиять на эффективность внутреннего самовосстановления. Например, гидролизные связи могут расщепляться при воздействии воды и другие факторы окружающей среды, такие как ультрафиолетовое излучение или химические вещества, могут влиять на эффективность внутреннего самовосстановления. При выборе материалов с внутренним самовосстановлением для конкретного приложения необходимо учитывать все эти факторы.

### 3.2.4. Нанотехнологии для улучшения самовосстановления

Нанотехнологии предлагают широкий спектр возможностей для улучшения самовосстановления строительных материалов. Наночастицы и наноматериалы могут быть

использованы для улучшения существующих механизмов самовосстановления, внедрения новых функций и снижения стоимости. Наночастицы могут быть использованы в качестве агентов восстановления для заполнения и герметизации поврежденных участков.

В Таблице 8 представлены потенциальные возможности нанотехнологий для улучшения самовосстановления строительных материалов. Потенциальные возможности определяют область применения нанотехнологий в самовосстановлении строительных материалов.

**Таблица 8. Возможности нанотехнологий для улучшения самовосстановления**  
**Table 8. Opportunities of Nanotechnology for Enhancing Self-healing**

Потенциальные возможности	Описание
Использование наночастиц в качестве агентов восстановления [125–129]	Наночастицы могут быть использованы для заполнения и герметизации поврежденных участков. Наночастицы могут быть изготовлены из различных материалов, включая полимеры, металлы, оксиды и сегнетоэлектрики.
Использование наночастиц в качестве катализаторов [130–133]	Наночастицы могут быть использованы в качестве катализаторов для ускорения реакций самовосстановления. Катализаторы могут быть использованы для ускорения реакций Дильса-Альдера, гидролиза или других реакций, которые используются для восстановления материалов.
Использование наночастиц в качестве датчиков для обнаружения повреждений [18], [134]–[136]	Наночастицы могут быть использованы в качестве датчиков для обнаружения повреждений. Датчики могут быть использованы для обнаружения трещин, коррозии или других дефектов.
Интеграция наноматериалов в системы самовосстановления [103], [136]–[138]	Наноматериалы могут быть интегрированы в различные системы самовосстановления, включая системы на основе микрокапсул, биоинспирированные системы и системы с внутренним самовосстановлением.

Наночастицы могут быть использованы в качестве катализаторов для ускорения реакций самовосстановления. Катализаторы могут быть использованы для ускорения реакций Дильса-Альдера, гидролиза или других реакций, которые используются для восстановления материалов. Например, металлы или металлоксиды могут быть использованы в качестве катализаторов для реакций Дильса-Альдера. Ферменты могут быть использованы в качестве катализаторов для гидролиза. Использование наночастиц в качестве датчиков для обнаружения повреждений. Наночастицы могут быть использованы в качестве датчиков для обнаружения повреждений. Датчики могут быть использованы для обнаружения трещин, коррозии или других дефектов.

Наноматериалы могут быть интегрированы в различные системы самовосстановления, включая системы на основе микрокапсул, биоинспирированные системы и системы с внутренним самовосстановлением. Интеграция наноматериалов может улучшить производительность и стоимость самовосстанавливающихся материалов. Например, наночастицы могут быть использованы для увеличения количества агентов восстановления, что может привести к более эффективному восстановлению. Наночастицы также могут быть использованы для снижения стоимости материалов, например, за счет использования более дешевых материалов для основы материала.

Нанотехнологии предлагают широкий спектр возможностей для улучшения самовосстановления строительных материалов. Наночастицы и наноматериалы могут быть использованы для улучшения существующих механизмов самовосстановления, внедрения новых функций и снижения стоимости. Дальнейшее развитие и внедрение нанотехнологий в области самовосстановления строительных материалов может привести к революционным изменениям в строительстве, сделав его более эффективным, экологичным и устойчивым.

Исследования в области применения нанотехнологий для самовосстановления строительных материалов находятся на ранней стадии, но они уже показывают большой потенциал для улучшения этих материалов.

### 3.3 Области применения

Самовосстанавливающиеся строительные материалы имеют потенциал для широкого применения в различных секторах строительства, включая: инфраструктура, здания, транспорт. В Таблице 9 представлена краткая сводка областей применения самовосстанавливающихся материалов, а также их преимущества и недостатки.

**Таблица 9. Области применения самовосстанавливающихся материалов**  
**Table 9. Applications of Self-healing Materials**

Область применения	Преимущества	Недостатки
Инфраструктура [139–142]	Снижение затрат на техническое обслуживание, продление срока службы, снижение количества строительных отходов	Сложность интеграции самовосстанавливающихся материалов в существующие конструкции, необходимость разработки новых методов ремонта и обслуживания
Здания [47], [97], [143]	Улучшение эксплуатационных характеристик зданий, снижение затрат на техническое обслуживание, продление срока службы, снижение количества строительных отходов	Сложность интеграции самовосстанавливающихся материалов в существующие конструкции, необходимость разработки новых методов ремонта и обслуживания
Транспорт [143–146]	Снижение затрат на техническое обслуживание, продление срока службы, снижение количества строительных отходов	Сложность интеграции самовосстанавливающихся материалов в существующие конструкции, необходимость разработки новых методов ремонта и обслуживания

Внедрение самовосстанавливающихся материалов может принести ряд экономических и экологических преимуществ, таких как: снижение затрат на техническое обслуживание, продление срока службы, уменьшение количества строительных отходов. Дальнейшее развитие и внедрение самовосстанавливающихся материалов может привести к новым возможностям для строительства в будущем. Исследования в области самовосстанавливающихся строительных материалов находятся на ранней стадии, но они уже показывают большой потенциал для улучшения строительства.

### 3.4 Барьеры при внедрении и направления для дальнейших исследований

Ключевыми проблемами, остающимися в процессе разработки и внедрения самовосстанавливающихся строительных материалов, являются:

- масштабируемость: необходимо разработать методы масштабирования производства самовосстанавливающихся материалов, чтобы они могли быть экономически эффективно изготовлены в больших объемах;

- экономическая эффективность: необходимо снизить стоимость самовосстанавливающихся материалов, чтобы они были более конкурентоспособными по сравнению с традиционными материалами;

- долговечность: необходимо увеличить долговечность самовосстанавливающихся материалов, чтобы они могли эффективно восстанавливать повреждения в течение длительного времени;

- стандартизация: необходимо разработать стандарты для самовосстанавливающихся материалов, чтобы обеспечить их безопасность и надежность.

Для преодоления этих проблем необходимо проведение дальнейших исследований и решить следующие задачи:

- необходимо оптимизировать состав и структуру самовосстанавливающихся материалов, чтобы повысить их эффективность, долговечность и экономичность.

- необходимо разработать передовые методы характеристики самовосстанавливающихся материалов, чтобы лучше понять их поведение и свойства.

- необходимо провести анализ жизненного цикла самовосстанавливающихся материалов, чтобы оценить их экономические и экологические преимущества.

Таким образом, дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке новых материалов и технологий, которые сделают строительство более эффективным, экологичным и устойчивым.



## 4 Conclusions

1. На основе проведенного библиометрического анализа, охватывающего 22 498 статьи с использованием специализированного программного обеспечения для аналитики данных, формулируются следующие выводы:

- самовосстанавливающиеся строительные материалы представляют собой перспективную технологию, которая может привести к революционным изменениям в строительстве. Эти материалы обладают рядом преимуществ, включая:

- снижение затрат на техническое обслуживание: самовосстанавливающиеся материалы могут самостоятельно устранять повреждения, что может привести к экономии средств для владельцев и операторов объектов.

- продление срока службы: самовосстанавливающиеся материалы могут продлить срок службы строительных объектов, что может привести к снижению затрат на строительство и техническое обслуживание в долгосрочной перспективе.

- уменьшение количества строительных отходов: самовосстанавливающиеся материалы могут быть отремонтированы или заменены без необходимости демонтажа и утилизации поврежденных материалов. Это может привести к снижению воздействия строительства на окружающую среду.

В дополнение к этим преимуществам самовосстанавливающиеся строительные материалы также могут повысить устойчивость и долговечность конструкций. Это связано с тем, что они могут самостоятельно устранять повреждения, которые могут привести к более серьезным проблемам, таким как коррозия или разрушение.

2. Исследования в области самовосстанавливающихся строительных материалов находятся на ранней стадии, но они уже показывают значительный потенциал для улучшения строительства. Дальнейшее развитие и внедрение этих материалов может привести к следующим преимуществам:

- экономическая эффективность: самовосстанавливающиеся материалы могут снизить затраты на строительство, техническое обслуживание и ремонт.

- снижение воздействия на окружающую среду: самовосстанавливающиеся материалы могут снизить воздействие строительства на окружающую среду за счет уменьшения количества строительных отходов и выбросов парниковых газов.

- самовосстанавливающиеся строительные материалы имеют значительный потенциал для повышения устойчивости и долговечности конструкций. Они могут помочь снизить затраты на строительство, техническое обслуживание и ремонт, а также уменьшить воздействие строительства на окружающую среду. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке новых материалов и технологий, которые сделают строительство более эффективным.

## 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 Norouzi, M., Chàfer, M., Cabeza, L.F., Jiménez, L. and Boer, D. (2021) Circular Economy in the Building and Construction Sector: A Scientific Evolution Analysis. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **44**, 102704. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102704>.
- 2 Lacasse, M.A., Gaur, A. and Moore, T. V. (2020) Durability and Climate Change—Implications for Service Life Prediction and the Maintainability of Buildings. *Buildings 2020, Vol. 10, Page 53*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **10**, 53. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10030053>.
- 3 Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I. and Betelu, S. (2021) Reinforced Concrete Structures: A Review of Corrosion Mechanisms and Advances in Electrical Methods for Corrosion Monitoring. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **269**, 121240. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121240>.
- 4 Syll, A.S. and Kanakubo, T. (2022) Impact of Corrosion on the Bond Strength between Concrete





- and Rebar: A Systematic Review. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 7016, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 7016. <https://doi.org/10.3390/MA15197016>.
- 5 Ridwan, R., Jemaa, Y. and Yuniarto, E. (2023) Various Methods of Strengthening Reinforced Concrete Beam-Column Joint Subjected Earthquake-Type Loading Using Fibre-Reinforced Polymers: A Critical Review. *Journal of Applied Materials and Technology*, Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Riau, **4**, 42–55. <https://doi.org/10.31258/JAMT.4.2.42-55>.
- 6 Yavartanoo, F. and Kang, T.H.K. (2022) Retrofitting of Unreinforced Masonry Structures and Considerations for Heritage-Sensitive Constructions. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **49**, 103993. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.103993>.
- 7 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>.
- 8 Jayabalakrishnan, D., Naga Muruga, D.B., Bhaskar, K., Pavan, P., Balaji, K., Rajakumar, P.S., Priya, C., Deepa, R.A.B., Sendilvelan, S. and Prabhakar, M. (2021) Self-Healing Materials—A Review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **45**, 7195–7199. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.02.415>.
- 9 Song, T., Jiang, B., Li, Y., Ji, Z., Zhou, H., Jiang, D., Seok, I., Murugadoss, V., Wen, N. and Colorado, H. (2021) Self-Healing Materials: A Review of Recent Developments. *ES Mater. Manuf*, **14**, 1–19. <https://doi.org/10.30919/esmm5f465>.
- 10 Shah, K.W. and Huseien, G.F. (2020) Biomimetic Self-Healing Cementitious Construction Materials for Smart Buildings. *Biomimetics* 2020, Vol. 5, Page 47, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **5**, 47. <https://doi.org/10.3390/BIOMIMETICS5040047>.
- 11 Islam, S. and Bhat, G. (2021) Progress and Challenges in Self-Healing Composite Materials. *Materials Advances*, Royal Society of Chemistry, **2**, 1896–1926. <https://doi.org/10.1039/D0MA00873G>.
- 12 Santos, A.N.B., Santos, D.J. do. and Carastan, D.J. (2021) Microencapsulation of Reactive Isocyanates for Application in Self-Healing Materials: A Review. *Journal of Microencapsulation*, Taylor & Francis, **38**, 338–356. <https://doi.org/10.1080/02652048.2021.1921068>.
- 13 Wang, X., Xie, W., Li, L.Y., Zhu, J. and Xing, F. (2022) Molecular Simulation Study on Mechanical Properties of Microcapsule-Based Self-Healing Cementitious Materials. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 611, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 611. <https://doi.org/10.3390/POLYM14030611>.
- 14 Kitchen, G., Sun, B. and Kang, S.H. (2023) Bioinspired Nanocomposites with Self-Adaptive Mechanical Properties. *Nano Research*, Tsinghua University, 1–16. <https://doi.org/10.1007/S12274-023-6141-9/METRICS>.
- 15 Kumar, E.K., Patel, S.S., Kumar, V., Panda, S.K., Mahmoud, S.R. and Balubaid, M. (2022) State of Art Review on Applications and Mechanism of Self-Healing Materials and Structure. *Archives of Computational Methods in Engineering* 2022 30:2, Springer, **30**, 1041–1055. <https://doi.org/10.1007/S11831-022-09827-3>.
- 16 Xu, J.H., Ding, C. Di, Chen, P., Tan, L.H., Chen, C.B. and Fu, J.J. (2020) Intrinsic Self-Healing Polymers for Advanced Lithium-Based Batteries: Advances and Strategies. *Applied Physics Reviews*, American Institute of Physics Inc., **7**. <https://doi.org/10.1063/5.0008206/124009>.
- 17 Willocq, B., Odent, J., Dubois, P. and Raquez, J.M. (2020) Advances in Intrinsic Self-Healing Polyurethanes and Related Composites. *RSC Advances*, Royal Society of Chemistry, **10**, 13766–13782. <https://doi.org/10.1039/D0RA01394C>.
- 18 Zheng, X., Wang, Q., Li, Y., Luan, J. and Wang, N. (2020) Microcapsule-Based Visualization Smart Sensors for Damage Detection: Principles and Applications. *Advanced Materials Technologies*, John Wiley & Sons, Ltd, **5**, 1900832. <https://doi.org/10.1002/ADMT.201900832>.
- 19 Wang, X., Chen, Z., Ren, J., Chen, S. and Xing, F. (2022) Object Status Identification of X-Ray CT Images of Microcapsule-Based Self-Healing Mortar. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **125**, 104294. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104294>.
- 20 Wang, X., Liang, J., Ren, J., Wang, W., Liu, J. and Xing, F. (2022) Performance of Microcapsule-Based Self-Healing Concrete under Multiaxial Compression with Large Axial Strain: Mechanical Properties Failure Mode, and Pore Structure. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **350**, 128866. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128866>.
- 21 Beglarigale, A., Eyice, D., Seki, Y., Yalçinkaya, Ç., Çopuroğlu, O. and Yazıcı, H. (2021) Sodium

Vafaeva, K.M.; Vatin, N.I.; Kordas, G.

Self-healing building materials: The future of construction;  
2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2912. doi: 10.57728/ALF.29.12



- Silicate/Polyurethane Microcapsules Synthesized for Enhancing Self-Healing Ability of Cementitious Materials: Optimization of Stirring Speeds and Evaluation of Self-Healing Efficiency. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **39**, 102279. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102279>.
- 22 Jiang, S., Lin, Z., Tang, C. and Hao, W. (2021) Preparation and Mechanical Properties of Microcapsule-Based Self-Healing Cementitious Composites. *Materials 2021, Vol. 14, Page 4866*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 4866. <https://doi.org/10.3390/MA14174866>.
- 23 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>.
- 24 Oh, S.R., Lee, K.M., Choi, S. and Choi, Y.W. (2022) Fundamental Properties and Self-Healing Performance of Repair Mortar with Solid Capsules Made Using Inorganic Reactive Powder. *Materials 2022, Vol. 15, Page 1710*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 1710. <https://doi.org/10.3390/MA15051710>.
- 25 Ribeiro De Souza, L. and Al-Tabbaa, A. (2021) High Throughput Production of Microcapsules Using Microfluidics for Self-Healing of Cementitious Materials. *Lab on a Chip*, Royal Society of Chemistry, **21**, 4652–4659. <https://doi.org/10.1039/D1LC00569C>.
- 26 Hu, H.L., Zhang, L., Yu, R.L., Yuan, L.Y., Yang, Y.H., He, X.D., Wang, J.M. and Li, Z.P. (2020) Microencapsulation of Ethylenediamine and Its Application in Binary Self-Healing System Using Dual-Microcapsule. *Materials & Design*, Elsevier, **189**, 108535. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2020.108535>.
- 27 Du, W., Yu, J., Gu, Y., Li, Y., Han, X. and Liu, Q. (2019) Preparation and Application of Microcapsules Containing Toluene-Di-Isocyanate for Self-Healing of Concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **202**, 762–769. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.007>.
- 28 Sadabadi, H., Allahkaram, S.R., Kordijazi, A. and Rohatgi, P.K. (2022) Self-Healing Coatings Loaded by Nano/Microcapsules: A Review. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces 2022 58:2*, Springer, **58**, 287–307. <https://doi.org/10.1134/S2070205122020162>.
- 29 Wang, X., Li, Y., Zhang, C. and Zhang, X. (2022) Visualization and Quantification of Self-Healing Behaviors of Microcracks in Cement-Based Materials Incorporating Fluorescence-Labeled Self-Healing Microcapsules. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **315**, 125668. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125668>.
- 30 Apolinário de Oliveira, T., D'Orey Gaivão Portela Bragança, M., Miguel Pinkoski, I. and Carrera, G. (2021) The Effect of Silica Nanocapsules on Self-Healing Concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **300**, 124010. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124010>.
- 31 Taheri, S. and Clark, S.M. (2021) Preparation of Self-Healing Additives for Concrete via Miniemulsion Polymerization: Formulation and Production Challenges. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Springer, **15**, 1–15. <https://doi.org/10.1186/S40069-020-00449-2/FIG.S/9>.
- 32 Ouarga, A., Lebaz, N., Tarhini, M., Noukrati, H., Barroug, A., Elaissari, A. and Ben Youcef, H. (2022) Towards Smart Self-Healing Coatings: Advances in Micro/Nano-Encapsulation Processes as Carriers for Anti-Corrosion Coatings Development. *Journal of Molecular Liquids*, Elsevier, **354**, 118862. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2022.118862>.
- 33 Kilicli, V., Yan, X., Salowitz, N. and Rohatgi, P.K. (2018) Recent Advancements in Self-Healing Metallic Materials and Self-Healing Metal Matrix Composites. *JOM, Minerals, Metals and Materials Society*, **70**, 846–854. <https://doi.org/10.1007/S11837-018-2835-Y/FIG.S/6>.
- 34 Dawei, S., Zheng, Y., Lan, M., Wang, Z., Cui, S. and Yang, J. (2021) Robust and Impermeable Metal Shell Microcapsules for One-Component Self-Healing Coatings. *Applied Surface Science*, North-Holland, **546**, 149114. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2021.149114>.
- 35 Sun, D., Yan, J., Ma, X., Lan, M., Wang, Z., Cui, S. and Yang, J. (2021) Tribological Investigation of Self-Healing Composites Containing Metal/Polymer Microcapsules. *ES Materials and Manufacturing*, Engineered Science Publisher, **14**, 59–72. <https://doi.org/10.30919/ESMM5F469>.
- 36 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>.
- 37 Zhang, W., Zheng, Q., Ashour, A. and Han, B. (2020) Self-Healing Cement Concrete Composites for Resilient Infrastructures: A Review. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **189**, 107892.



- <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2020.107892>.
- 38 Souradeep, G. and Kua, H.W. (2016) Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, **28**, 04016165. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001687](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001687).
- 39 Aouadi, S.M., Gu, J. and Berman, D. (2020) Self-Healing Ceramic Coatings That Operate in Extreme Environments: A Review. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, American Vacuum Society, **38**, 50802. [https://doi.org/10.1116/6.0000350/15959333/050802\\_1\\_ACCEPTED\\_MANUSCRIPT.PDF](https://doi.org/10.1116/6.0000350/15959333/050802_1_ACCEPTED_MANUSCRIPT.PDF).
- 40 Van Tittelboom, K., Tsangouri, E., Van Hemelrijck, D. and De Belie, N. (2015) The Efficiency of Self-Healing Concrete Using Alternative Manufacturing Procedures and More Realistic Crack Patterns. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **57**, 142–152. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2014.12.002>.
- 41 Li, L., Liu, T., Jiang, G., Fang, C., Qu, B., Zheng, S., Yang, G. and Tang, C. (2022) Insight into the Temperature Stimulation on the Self-Healing Properties of Cement-Based Materials. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **361**, 129704. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129704>.
- 42 Yin, K., Luo, Z., Liu, X., Pan, H., Zhi, T., Feng, H., Song, Y. and Su, Y. (2023) Preparation and Application of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>@EC Microcapsules for Self-Healing Alkali-Activated Slag. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **400**, 132651. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132651>.
- 43 Ren, J., Wang, X., Li, D., Xu, S., Dong, B. and Xing, F. (2021) Performance of Temperature Adaptive Microcapsules in Self-Healing Cementitious Materials under Different Mixing Temperatures. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **299**, 124254. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124254>.
- 44 Lu, T., Li, B., Sun, D., Hu, M., Ma, J. and Sun, G. (2021) Advances in Controlled Release of Microcapsules and Promising Applications in Self-Healing of Asphalt Materials. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **294**, 126270. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126270>.
- 45 Yin, H., Zhang, E., Zhu, Z., Han, L., Zheng, P., Zeng, H. and Chen, N. (2021) Soy-Based Adhesives Functionalized with Pressure-Responsive Crosslinker Microcapsules for Enhanced Wet Adhesion. *ACS Applied Polymer Materials*, American Chemical Society, **3**, 1032–1041. [https://doi.org/10.1021/ACSAPM.0C01295/SUPPL\\_FILE/AP0C01295\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/ACSAPM.0C01295/SUPPL_FILE/AP0C01295_SI_001.PDF).
- 46 Li, G., Huang, X., Lin, J., Jiang, X. and Zhang, X. (2019) Activated Chemicals of Cementitious Capillary Crystalline Waterproofing Materials and Their Self-Healing Behaviour. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **200**, 36–45. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.093>.
- 47 Wen, N., Song, T., Ji, Z., Jiang, D., Wu, Z., Wang, Y. and Guo, Z. (2021) Recent Advancements in Self-Healing Materials: Mechanicals, Performances and Features. *Reactive and Functional Polymers*, Elsevier, **168**, 105041. <https://doi.org/10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2021.105041>.
- 48 Mao, Q., Chen, J., Wu, W., Li, R., Shi, S., Wang, Z. and Cui, S. (2023) Multiple Self-Healing Effects of Water-Absorbing Microcapsules in Cementitious Materials. *Polymers 2023, Vol. 15, Page 428*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 428. <https://doi.org/10.3390/POLYM15020428>.
- 49 Choi, Y.W., Kim, C.G., Nam, E.J. and Oh, S.R. (2022) An Experimental Study on the Healing Performance of Complex Capsules Using Multiphase Inorganic Materials for Crack Self-Healing of Cement Mortars. *Materials 2022, Vol. 15, Page 8819*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 8819. <https://doi.org/10.3390/MA15248819>.
- 50 Amran, M., Onaizi, A.M., Fediuk, R., Vatin, N.I., Rashid, R.S.M., Abdelgader, H. and Ozbakkaloglu, T. (2022) Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review. *Materials 2022, Vol. 15, Page 3214*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 3214. <https://doi.org/10.3390/MA15093214>.
- 51 Alghamri, R. and Al-Tabbaa, A. (2020) Self-Healing of Cracks in Mortars Using Novel PVA-Coated Pellets of Different Expansive Agents. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **254**, 119254. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119254>.
- 52 Lv, Z., Yao, J., Cui, G. and Chen, H. (2022) Geometrical Probability of a Capsule Hitting Irregular Crack Networks: Application to Capsule-Based Self-Healing Materials. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, **101**, 406–419. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2021.08.031>.
- 53 Diesendruck, C.E., Sottos, N.R., Moore, J.S. and White, S.R. (2015) Biomimetic Self-Healing. *Angewandte Chemie International Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, **54**, 10428–10447. <https://doi.org/10.1002/ANIE.201500484>.

Vafaeva, K.M.; Vatin, N.I.; Kordas, G.

Self-healing building materials: The future of construction;  
2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2912. doi: 10.57728/ALF.29.12



- 54 Özada, Ç., Ünal, M., Kuzu Şahin, E., Özer, H., Motorcu, A.R. and Yazıcı, M. (2022) Development and Characterization of Self-Healing Microcapsules, and Optimization of Production Parameters for Microcapsule Diameter and Core Content. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, Emerald Publishing, **18**, 1049–1077. <https://doi.org/10.1108/MMMS-08-2022-0145/FULL/XML>.
- 55 Ahmed, A., Ali, A., Alzahrani, B. and Sanada, K. (2023) Evaluation of the Viscoelastic Behavior, Thermal Transitions, and Self-Healing Efficiency of Microcapsules-Based Composites with and without a Catalyst Using Dynamic Mechanical Analysis Technique. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **140**, e54323. <https://doi.org/10.1002/APP.54323>.
- 56 Raimondo, M., Longo, P., Mariconda, A. and Guadagno, L. (2015) Healing Agent for the Activation of Self-Healing Function at Low Temperature. *Advanced Composite Materials*, Taylor & Francis, **24**, 519–529. <https://doi.org/10.1080/09243046.2014.937135>.
- 57 Hamdy, T.M. (2023) Dental Biomaterial Scaffolds in Tooth Tissue Engineering: A Review. *Current Oral Health Reports*, Springer Science and Business Media B.V., **10**, 14–21. <https://doi.org/10.1007/S40496-023-00329-0/FIG.S/4>.
- 58 Zhu, Y.; Zhang, Y.; Zhou, Y., Zhu, Y., Zhang, Y. and Zhou, Y. (2022) Application Progress of Modified Chitosan and Its Composite Biomaterials for Bone Tissue Engineering. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, Vol. 23, Page 6574, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **23**, 6574. <https://doi.org/10.3390/IJMS23126574>.
- 59 Sikdar, P., Uddin, M.M., Dip, T.M., Islam, S., Hoque, M.S., Dhar, A.K. and Wu, S. (2021) Recent Advances in the Synthesis of Smart Hydrogels. *Materials Advances*, Royal Society of Chemistry, **2**, 4532–4573. <https://doi.org/10.1039/D1MA00193K>.
- 60 Shawon, Z.B.Z., Khan, M.R., Takia, N.A., Khan, T.H., Rahman, A. and Hoque, M.E. (2023) Structure-Property-Function Relationships of Sustainable Hydrogels. *Sustainable Hydrogels: Synthesis, Properties, and Applications*, Elsevier, 79–111. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91753-7.00017-X>.
- 61 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>.
- 62 Ilyaei, S., Sourki, R. and Akbari, Y.H.A. (2021) Capsule-Based Healing Systems in Composite Materials: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Taylor & Francis, **46**, 491–531. <https://doi.org/10.1080/10408436.2020.1852912>.
- 63 Ullah, H., Azizli, K.A.M., Man, Z.B., Che Ismail, M.B. and Khan, M.I. (2016) The Potential of Microencapsulated Self-Healing Materials for Microcracks Recovery in Self-Healing Composite Systems: A Review. *Polymer Reviews*, Taylor & Francis, **56**, 429–485. <https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1107098>.
- 64 Nguyen, M.T., Fernandez, C.A., Haider, M.M., Chu, K.H., Jian, G., Nassiri, S., Zhang, D., Rousseau, R. and Glezakou, V.A. (2023) Toward Self-Healing Concrete Infrastructure: Review of Experiments and Simulations across Scales. *Chemical Reviews*, American Chemical Society, **123**, 10838–10876. [https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.2C00709/ASSET/IMAGES/MEDIUM/CR2C00709\\_0033.GIF](https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.2C00709/ASSET/IMAGES/MEDIUM/CR2C00709_0033.GIF).
- 65 Aïssa, B., Therriault, D., Haddad, E. and Jamroz, W. (2012) Self-Healing Materials Systems: Overview of Major Approaches and Recent Developed Technologies. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2012**. <https://doi.org/10.1155/2012/854203>.
- 66 Romero-Sabat, G., Gago-Benedí, E., Roa Rovira, J.J., González-Gálvez, D., Mateo, A., Medel, S. and Tolentino Chivite, A. (2021) Development of a Highly Efficient Extrinsic and Autonomous Self-Healing Polymeric System at Low and Ultra-Low Temperatures for High-Performance Applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, **145**, 106335. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2021.106335>.
- 67 Chu, K., Gwon Song, B., Yang, H.-I., Kim, D.-M., Seung Lee, C., Park, M., Chung, C.-M., Chu, K., Song, B.G., Lee, C.S., Yang, H., Kim, D., Chung, C. and Park, M. (2018) Smart Passivation Materials with a Liquid Metal Microcapsule as Self-Healing Conductors for Sustainable and Flexible Perovskite Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **28**, 1800110. <https://doi.org/10.1002/ADFM.201800110>.
- 68 Hia, I.L., Lam, W.H., Chai, S.P., Chan, E.S. and Pasbakhsh, P. (2018) Surface Modified Alginate Multicore Microcapsules and Their Application in Self-Healing Epoxy Coatings for Metallic



- Protection. *Materials Chemistry and Physics*, Elsevier, **215**, 69–80. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2018.05.021>.
- 69 Ahmed, A. and Sanada, K. (2019) Micromechanical Modeling and Experimental Verification of Self-Healing Microcapsules-Based Composites. *Mechanics of Materials*, Elsevier, **131**, 84–92. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMAT.2019.01.020>.
- 70 Zhang, L., Wang, H., He, F., Chen, H., Xie, G., Wei, B., Luo, J., He, B. and Wu, Z.P. (2022) Wear In-Situ Self-Healing Polymer Composites Incorporated with Bifunctional Microcapsules. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **232**, 109566. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109566>.
- 71 Mirabedini, S.M. and Alizadegan, F. (2020) Self-Healing Polymeric Coatings Containing Microcapsules Filled with Active Materials. *Self-Healing Polymer-Based Systems*, Elsevier, 235–258. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818450-9.00009-X>.
- 72 Sun, D., Pang, Q., Zhu, X., Tian, Y., Lu, T. and Yang, Y. (2017) Enhanced Self-Healing Process of Sustainable Asphalt Materials Containing Microcapsules. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, American Chemical Society, **5**, 9881–9893. [https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.7B01850/ASSET/IMAGES/MEDIUM/SC-2017-018508\\_0017.GIF](https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.7B01850/ASSET/IMAGES/MEDIUM/SC-2017-018508_0017.GIF).
- 73 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>.
- 74 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>.
- 75 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>.
- 76 Ghorbanpour Arani, A., Miralaei, N., Farazin, A. and Mohammadimehr, M. (2023) An Extensive Review of the Repair Behavior of Smart Self-Healing Polymer Matrix Composites. *Journal of Materials Research*, Springer Nature, **38**, 617–632. <https://doi.org/10.1557/S43578-022-00884-9/FIG.S/12>.
- 77 Han, Y., Zhen, X. and Huang, Y. (2021) Hybrid Dynamic Risk Modelling for Safety Critical Equipment on Offshore Installations. *Process Safety and Environmental Protection*, Institution of Chemical Engineers, **156**, 482–495. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.038>.
- 78 Ostapiuk, M. (2023) Microcapsules in Fiber Metal Laminates for Self-Healing at the Interface between Magnesium and Carbon Fiber-Reinforced Epoxy. *Materials 2023, Vol. 16, Page 6524*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **16**, 6524. <https://doi.org/10.3390/MA16196524>.
- 79 Kosarli, M., Bekas, D., Tsirka, K. and Paipetis, A.S. (2020) Capsule-Based Self-Healing Polymers and Composites. *Self-Healing Polymer-Based Systems*, Elsevier, 259–278. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818450-9.00010-6>.
- 80 Shinde, V. V., Shelke, S.D., Celestine, A.D.N. and Beckingham, B.S. (2022) Self-Healing in High Impact Polystyrene (HIPS) Composites via Embedded Non-Toxic Solvent-Filled Microcapsules. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **139**, 51463. <https://doi.org/10.1002/APP.51463>.
- 81 Priyadarsini, M., Rekha Sahoo, D. and Biswal, T. (2021) A New Generation Self-Healing Composite Materials. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **47**, 1229–1233. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.06.456>.
- 82 Li, K., Liu, Z., Wang, C., Fan, W., Liu, F., Li, H., Zhu, Y. and Wang, H. (2020) Preparation of Smart Coatings with Self-Healing and Anti-Wear Properties by Embedding PU-Fly Ash Absorbing Linseed Oil Microcapsules. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **145**, 105668. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2020.105668>.
- 83 Mohonee, V.K., Lim Goh, K., Mishnaevsky, L. and Pasbakhsh, P. (2021) Capsule Based Self-Healing Composites: New Insights on Mechanical Behaviour Based on Finite Element Analysis. *Computational Materials Science*, Elsevier, **192**, 110203. <https://doi.org/10.1016/J.COMMATSCI.2020.110203>.
- 84 Tornabene, F., Triantafillou, T., Luhar, S., Luhar, I., Uddin, F. and Shaikh, A. (2022) A Review on the Performance Evaluation of Autonomous Self-Healing Bacterial Concrete: Mechanisms, Strength, Durability, and Microstructural Properties. *Journal of Composites Science 2022, Vol. 6*,



- 85 *Page 23*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **6**, 23. <https://doi.org/10.3390/JCS6010023>.  
Mohan Rao Pannem, R., Bashaveni, B. and Kalaiselvan, S. (2024) The Effect of Fly Ash Aggregates on the Self-Healing Capacity of Bacterial Concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, Elsevier, **15**, 102261. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2023.102261>.
- 86 Aytekin, B., Mardani, A. and Yazıcı, Ş. (2023) State-of-Art Review of Bacteria-Based Self-Healing Concrete: Biomineralization Process, Crack Healing, and Mechanical Properties. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **378**, 131198. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131198>.
- 87 Althoey, F., Zaid, O., Arbili, M.M., Martínez-García, R., Alhamami, A., Shah, H.A. and Yosri, A.M. (2023) Physical, Strength, Durability and Microstructural Analysis of Self-Healing Concrete: A Systematic Review. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier, **18**, e01730. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01730>.
- 88 Pratap Singh Rajawat, S., Singh Rajput, B., Sharma, M. and Jain, G. (2023) Exploring the Potential of Bacterial Concrete: An Analysis of Self-Healing Capabilities and Compressive Strength. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.07.358>.
- 89 Shen, L., Yu, W., Li, L., Zhang, T., Abshir, I.Y., Luo, P. and Liu, Z. (2021) Microorganism, Carriers, and Immobilization Methods of the Microbial Self-Healing Cement-Based Composites: A Review. *Materials 2021, Vol. 14, Page 5116*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 5116. <https://doi.org/10.3390/MA14175116>.
- 90 Feng, C., Zong, X., Cui, B., Guo, H., Zhang, W. and Zhu, J. (2022) Application of Carrier Materials in Self-Healing Cement-Based Materials Based on Microbial-Induced Mineralization. *Crystals 2022, Vol. 12, Page 797*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **12**, 797. <https://doi.org/10.3390/CRYST12060797>.
- 91 Da Costa, V.C., Aboelkheir, M.G., Pal, K., Filho, R.D.T. and Gomes, F. (2020) Smart Polymer Systems as Concrete Self-Healing Agents. *Nanofabrication for Smart Nanosensor Applications*, Elsevier, 399–413. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820702-4.00016-7>.
- 92 Reddy, K.R., El-Zein, A., Airey, D.W., Alonso-Marroquin, F., Schubel, P. and Manalo, A. (2020) Self-Healing Polymers: Synthesis Methods and Applications. *Nano-Structures & Nano-Objects*, Elsevier, **23**, 100500. <https://doi.org/10.1016/J.NANOSO.2020.100500>.
- 93 Fahimizadeh, M., Pasbakhsh, P., Mae, L.S., Tan, J.B.L. and Raman, R.K.S. (2022) Multifunctional, Sustainable, and Biological Non-Ureolytic Self-Healing Systems for Cement-Based Materials. *Engineering*, Elsevier, **13**, 217–237. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2021.11.016>.
- 94 Khadiyal, S., Rawat, A., Das, S.K. and Garg, N. (2022) Bacterial Concrete: A Review on Self-Healing Properties in the Light of Sustainability. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **60**, 136–143. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.12.277>.
- 95 Pinto, A., González-Fonteboa, B., Seara-Paz, S. and Martínez-Abella, F. (2023) Effects of Bacteria-Based Self-Healing Nutrients on Hydration and Rheology of Cement Pastes. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **404**, 133142. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133142>.
- 96 Singh, P., Kaur, I. and Singh, N. (2020) A Review of Different Bacteria Carriers Used in Self-Healing Mechanism. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **32**, 955–960. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.05.100>.
- 97 Kim, H., Son, H.M., Seo, J. and Lee, H.K. (2021) Recent Advances in Microbial Viability and Self-Healing Performance in Bacterial-Based Cementitious Materials: A Review. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **274**, 122094. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.122094>.
- 98 Su, Y., Qian, C., Rui, Y. and Feng, J. (2021) Exploring the Coupled Mechanism of Fibers and Bacteria on Self-Healing Concrete from Bacterial Extracellular Polymeric Substances (EPS). *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **116**, 103896. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103896>.
- 99 Rossi, E., Vermeer, C.M., Mors, R., Kleerebezem, R., Copuroglu, O. and Jonkers, H.M. (2021) On the Applicability of a Precursor Derived from Organic Waste Streams for Bacteria-Based Self-Healing Concrete. *Frontiers in Built Environment*, Frontiers Media S.A., **7**, 632921. <https://doi.org/10.3389/FBUIL.2021.632921/BIBTEX>.
- 100 Pourfallahi, M., Nohegoo-Shahvari, A. and Salimizadeh, M. (2020) Effect of Direct Addition of Two Different Bacteria in Concrete as Self-Healing Agent. *Structures*, Elsevier, **28**, 2646–2660. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.10.070>.

Vafaeva, K.M.; Vatin, N.I.; Kordas, G.

Self-healing building materials: The future of construction;  
2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2912. doi: 10.57728/ALF.29.12



- 101 Ryparová, P., Prošek, Z., Schreiberová, H., Bílý, P. and Tesárek, P. (2021) The Role of Bacterially Induced Calcite Precipitation in Self-Healing of Cement Paste. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **39**, 102299. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102299>.
- 102 Li, P., Zhong, Y., Wang, X. and Hao, J. (2020) Enzyme-Regulated Healable Polymeric Hydrogels. *ACS Central Science*, American Chemical Society, **6**, 1507–1522. [https://doi.org/10.1021/ACSCENTSCI.0C00768/ASSET/IMAGES/LARGE/OC0C00768\\_0008.JPEG](https://doi.org/10.1021/ACSCENTSCI.0C00768/ASSET/IMAGES/LARGE/OC0C00768_0008.JPEG).
- 103 Mollajavadi, M.Y., Tarigheh, F.F. and Eslami-Farsani, R. (2023) Self-Healing Polymers Containing Nanomaterials for Biomedical Engineering Applications: A Review. *Polymer Composites*, John Wiley & Sons, Ltd, **44**, 6869–6889. <https://doi.org/10.1002/PC.27603>.
- 104 Wong, E.C., Lim, Y.H., Siew, M.P., Chong, W.C., Ong, Y.H., Pang, Y.L. and Chong, K.C. (2023) A Review of Self-Healing Composite Films and Its Development in Membrane for Water Filtration. *Journal of Water Process Engineering*, Elsevier, **55**, 104123. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2023.104123>.
- 105 Li, P., Hao, J. and Wang, X. (2021) Systems Chemistry in Self-Healing Materials. *ChemSystemsChem*, John Wiley & Sons, Ltd, **3**, e2100016. <https://doi.org/10.1002/SYST.202100016>.
- 106 Wang, S., Scarlata, S. and Rahbar, N. (2022) Curing and Self-Healing of Enzymatic Construction Materials Using Nanoparticles. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101039>.
- 107 Rosewitz, J.A., Wang, S., Scarlata, S.F. and Rahbar, N. (2021) An Enzymatic Self-Healing Cementitious Material. *Applied Materials Today*, Elsevier, **23**, 101035. <https://doi.org/10.1016/J.APMT.2021.101035>.
- 108 Li, X., Zhang, T., Song, B., Yang, K., Hao, X. and Ma, J. (2024) Polyurethane Toughened Covalent Adaptive Networks Epoxy Composite Based on Thermoreversible Diels-Alder Reaction: Self-Healable, Shape Memory, and Recyclable. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **141**, e54762. <https://doi.org/10.1002/APP.54762>.
- 109 Cao, Y., Zhang, J., Zhang, D., Lv, Y., Li, J., Xu, Y., He, K., Chen, G., Yuan, C., Zeng, B. and Dai, L. (2020) A Novel Shape Memory-Assisted and Thermo-Induced Self-Healing Boron Nitride/Epoxy Composites Based on Diels–Alder Reaction. *Journal of Materials Science*, Springer, **55**, 11325–11338. <https://doi.org/10.1007/S10853-020-04842-W/FIG.S/9>.
- 110 Ehrhardt, D., Van Durme, K., Jansen, J.F.G.A., Van Mele, B. and Van den Brande, N. (2020) Self-Healing UV-Curable Polymer Network with Reversible Diels-Alder Bonds for Applications in Ambient Conditions. *Polymer*, Elsevier, **203**, 122762. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2020.122762>.
- 111 Lin, C., Ge, H., Wang, T., Huang, M., Ying, P., Zhang, P., Wu, J., Ren, S. and Levchenko, V. (2020) A Self-Healing and Recyclable Polyurethane/Halloysite Nanocomposite Based on Thermoreversible Diels-Alder Reaction. *Polymer*, Elsevier, **206**, 122894. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2020.122894>.
- 112 Yang, S., Du, X., Deng, S., Qiu, J., Du, Z., Cheng, X. and Wang, H. (2020) Recyclable and Self-Healing Polyurethane Composites Based on Diels-Alder Reaction for Efficient Solar-to-Thermal Energy Storage. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **398**, 125654. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.125654>.
- 113 Wang, X., Cao, L., Xu, C., Fan, B., Lin, Z., Li, W. and Zhang, P. (2022) Novel Dual Dynamic Boronate Ester Bond Regulated Bio-Based Polymer with Rapid Self-Healing and Multiple Recyclability. *Industrial Crops and Products*, Elsevier, **189**, 115855. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.115855>.
- 114 Chen, P., Ding, Y., Wang, Y., Zhao, H., Li, P., Liu, Y. and Gao, C. (2023) Functional Bio-Based Vitrimer with Excellent Healing and Recyclability Based on Conjugated Deflection Self-Toughening. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **474**, 145680. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.145680>.
- 115 An, Z.W., Xue, R., Ye, K., Zhao, H., Liu, Y., Li, P., Chen, Z.M., Huang, C.X. and Hu, G.H. (2023) Recent Advances in Self-Healing Polyurethane Based on Dynamic Covalent Bonds Combined with Other Self-Healing Methods. *Nanoscale*, The Royal Society of Chemistry, **15**, 6505–6520. <https://doi.org/10.1039/D2NR07110J>.
- 116 Zhu, J., Shen, D., Xie, J., Jin, B. and Wu, S. (2022) Transformation Mechanism of Carbamic Acid Elimination and Hydrolysis Reaction in Microbial Self-Healing Concrete. *Molecular Simulation*, Taylor & Francis, **48**, 719–735. <https://doi.org/10.1080/08927022.2022.2049773>.

Vafaeva, K.M.; Vatin, N.I.; Kordas, G.

Self-healing building materials: The future of construction;  
2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2912. doi: 10.57728/ALF.29.12



- 117 Xu, M., Cheng, B., Sheng, Y., Zhou, J., Wang, M., Jiang, X. and Lu, X. (2020) High-Performance Cross-Linked Self-Healing Material Based on Multiple Dynamic Bonds. *ACS Applied Polymer Materials*, American Chemical Society, **2**, 2228–2237. [https://doi.org/10.1021/ACSAPM.0C00154/SUPPL\\_FILE/AP0C00154\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/ACSAPM.0C00154/SUPPL_FILE/AP0C00154_SI_001.PDF).
- 118 Tadge, T., Garje, S., Saxena, V. and Raichur, A.M. (2023) Application of Shape Memory and Self-Healable Polymers/Composites in the Biomedical Field: A Review. *ACS Omega*, American Chemical Society, **8**, 32294–32310. [https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.3C04569/ASSET/IMAGES/LARGE/AO3C04569\\_0008.JPEG](https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.3C04569/ASSET/IMAGES/LARGE/AO3C04569_0008.JPEG).
- 119 Zhang, H., Wang, D., Wu, N., Li, C., Zhu, C., Zhao, N. and Xu, J. (2020) Recyclable, Self-Healing, Thermadappt Triple-Shape Memory Polymers Based on Dual Dynamic Bonds. *ACS Applied Materials and Interfaces*, American Chemical Society, **12**, 9833–9841. [https://doi.org/10.1021/ACSAMI.9B22613/SUPPL\\_FILE/AM9B22613\\_SI\\_008.MP4](https://doi.org/10.1021/ACSAMI.9B22613/SUPPL_FILE/AM9B22613_SI_008.MP4).
- 120 Abedinzadeh, R. and Faraji Nejad, M. (2021) Effect of Embedded Shape Memory Alloy Wires on the Mechanical Behavior of Self-Healing Graphene-Glass Fiber-Reinforced Polymer Nanocomposites. *Polymer Bulletin*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **78**, 3009–3022. <https://doi.org/10.1007/S00289-020-03253-W/FIG.S/7>.
- 121 Mondal, P., Behera, P.K., Voit, B., Böhme, F., Singha, N.K., Mondal, P., Behera, P.K., Singha, N.K., Voit, B. and Böhme, F. (2020) Tailor-Made Functional Polymethacrylates with Dual Characteristics of Self-Healing and Shape-Memory Based on Dynamic Covalent Chemistry. *Macromolecular Materials and Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, **305**, 2000142. <https://doi.org/10.1002/MAME.202000142>.
- 122 Xu, Y., Dai, S., Bi, L., Jiang, J., Zhang, H. and Chen, Y. (2021) Catalyst-Free Self-Healing Bio-Based Polymers: Robust Mechanical Properties, Shape Memory, and Recyclability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, American Chemical Society, **69**, 9338–9349. [https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.1C01885/SUPPL\\_FILE/JF1C01885\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.1C01885/SUPPL_FILE/JF1C01885_SI_001.PDF).
- 123 Zhang, C., Lu, X., Wang, Z. and Xia, H. (2022) Progress in Utilizing Dynamic Bonds to Fabricate Structurally Adaptive Self-Healing, Shape Memory, and Liquid Crystal Polymers. *Macromolecular Rapid Communications*, John Wiley & Sons, Ltd, **43**, 2100768. <https://doi.org/10.1002/MARC.202100768>.
- 124 Wang, X., Xu, J., Zhang, Y., Wang, T., Wang, Q., Li, S., Yang, Z. and Zhang, X. (2023) A Stretchable, Mechanically Robust Polymer Exhibiting Shape-Memory-Assisted Self-Healing and Clustering-Triggered Emission. *Nature Communications* 2023 14:1, Nature Publishing Group, **14**, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40340-8>.
- 125 Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., Eslami-Farsani, R. and Mirzamohammadi, S. (2022) The Effect of Capsulated Nanosilica-Epoxy Healing Agents on the Self-Healing Ability of Glass Fibers-Epoxy Composites under Mechanical Loading. *Journal of Industrial Textiles*, SAGE Publications Ltd, **52**, 1–19. [https://doi.org/10.1177/15280837221119833/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_15280837221119833-FIG11.JPEG](https://doi.org/10.1177/15280837221119833/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_15280837221119833-FIG11.JPEG).
- 126 Anupam, B.R., Sahoo, U.C. and Chandrappa, A.K. (2022) A Methodological Review on Self-Healing Asphalt Pavements. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **321**, 126395. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126395>.
- 127 Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., Eslami-Farsani, R., Mirzamohammadi, S. and Chirani, S.A. (2022) The Simultaneous Effect of Microcapsules and Silica Nanoparticles on the Mechanical-Healing Properties of Glass Fibers-Epoxy Smart Composites. *Fibers and Polymers*, Korean Fiber Society, **23**, 2907–2915. <https://doi.org/10.1007/S12221-022-4365-Z/METRICS>.
- 128 Huseien, G.F., Nehdi, M.L., Faridmehr, I., Ghoshal, S.K., Hamzah, H.K., Benjeddou, O. and Alrshoudi, F. (2022) Smart Bio-Agents-Activated Sustainable Self-Healing Cementitious Materials: An All-Inclusive Overview on Progress, Benefits and Challenges. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 1980, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 1980. <https://doi.org/10.3390/SU14041980>.
- 129 Gao, D., Fan, Y., Lyu, B., Ma, J. and Zhang, J. (2023) Polyacrylate/Prussian Blue Nanoparticles Composite Emulsion Applied to Photothermal Self-Healing Leather Coatings. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **183**, 107753. <https://doi.org/10.1016/J.PORGOAT.2023.107753>.
- 130 Beach, M., Davey, T., Subramanian, P. and Such, G. (2023) Self-Healing Organic Coatings – Fundamental Chemistry to Commercial Application. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **183**,





107759. <https://doi.org/10.1016/J.PORGOAT.2023.107759>.
- 131 Xiong, C., Li, B., Liu, H., Zhao, W., Duan, C., Wu, H. and Ni, Y. (2020) A Smart Porous Wood-Supported Flower-like NiS/Ni Conjunction with Vitrimer Co-Effect as a Multifunctional Material with Reshaping, Shape-Memory, and Self-Healing Properties for Applications in High-Performance Supercapacitors, Catalysts, and Sensors. *Journal of Materials Chemistry A*, The Royal Society of Chemistry, **8**, 10898–10908. <https://doi.org/10.1039/D0TA03664A>.
- 132 Menikheim, S.D. and Lavik, E.B. (2020) Self-Healing Biomaterials: The next Generation Is Nano. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, John Wiley & Sons, Ltd, **12**, e1641. <https://doi.org/10.1002/WNAN.1641>.
- 133 Thorarinsdottir, A.E., Veroneau, S.S. and Nocera, D.G. (2022) Self-Healing Oxygen Evolution Catalysts. *Nature Communications* 2022 13:1, Nature Publishing Group, **13**, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28723-9>.
- 134 Georgopoulou, A., Bosman, A.W., Brancart, J., Vanderborght, B. and Clemens, F. (2021) Supramolecular Self-Healing Sensor Fiber Composites for Damage Detection in Piezoresistive Electronic Skin for Soft Robots. *Polymers*, MDPI, **13**, 2983. <https://doi.org/10.3390/POLYM13172983/S1>.
- 135 Yu, X., Zhang, H., Wang, Y., Fan, X., Li, Z., Zhang, X., Liu, T., Yu, X., Zhang, H., Wang, Y., Fan, X., Liu, T., Li, Z. and Zhang, X. (2022) Highly Stretchable, Ultra-Soft, and Fast Self-Healable Conductive Hydrogels Based on Polyaniline Nanoparticles for Sensitive Flexible Sensors. *Advanced Functional Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **32**, 2204366. <https://doi.org/10.1002/ADFM.202204366>.
- 136 Khatib, M., Zohar, O., Saliba, W., Haick, H., Khatib, M., Zohar, O., Saliba, W. and Haick, H. (2020) A Multifunctional Electronic Skin Empowered with Damage Mapping and Autonomic Acceleration of Self-Healing in Designated Locations. *Advanced Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **32**, 2000246. <https://doi.org/10.1002/ADMA.202000246>.
- 137 Thakur, A. and Kumar, A. (2022) Self-Healing Nanocoatings for Automotive Application. *Nanotechnology in the Automotive Industry*, Elsevier, 403–427. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90524-4.00019-0>.
- 138 Kausar, A. (2021) Self-Healing Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposite: A Review. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, SAGE Publications Ltd, **37**, 160–181. [https://doi.org/10.1177/8756087920960195/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_8756087920960195-FIG11.JPEG](https://doi.org/10.1177/8756087920960195/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_8756087920960195-FIG11.JPEG).
- 139 McMillan, L. and Fcabe, L.V. (2022) Towards Self-Healing in Water Infrastructure Systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Smart Infrastructure and Construction*, ICE Publishing, **176**, 53–61. <https://doi.org/10.1680/JSMIC.22.00006/ASSET/IMAGES/SMALL/JSMIC176-0053-F4.GIF>.
- 140 Nalbandian, K.M., Carpio, M. and González, Á. (2021) Analysis of the Scientific Evolution of Self-Healing Asphalt Pavements: Toward Sustainable Road Materials. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **293**, 126107. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126107>.
- 141 Mircea, A.C., Szilagyi, H., Hegyi, A. and Baera, C. (2020) Study of Self-Healing Engineered Cementitious Composites for Durable and Sustainable Infrastructure. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, **46**, 871–878. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.05.002>.
- 142 Nainwal, A. and Professor, A. (2021) Innovative Use of Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure. *Mathematical Statistician and Engineering Applications*, Auricle Technologies, Pvt., Ltd., **70**, 713–719. <https://doi.org/10.17762/MSEA.V70I1.2529>.
- 143 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/FIG.S/13>.
- 144 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>.
- 145 Shields, Y., De Belie, N., Jefferson, A. and Van Tittelboom, K. (2021) A Review of Vascular Networks for Self-Healing Applications. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, **30**, 063001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ABF41D>.
- 146 Mai, W., Yu, Q., Han, C., Kang, F. and Li, B. (2020) Self-Healing Materials for Energy-Storage

Vafaeva, K.M.; Vatin, N.I.; Kordas, G.

Self-healing building materials: The future of construction; 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2912. doi: 10.57728/ALF.29.12



Devices. *Advanced Functional Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **30**, 1909912.  
<https://doi.org/10.1002/ADFM.201909912>.