



Review Article

Received: October 17, 2023

Accepted: November 26, 2023

Published: December 6, 2023

ISSN 2658-5553

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties

Vafaeva, Khristina Maksudovna^{1*} Zegait, Rachid² Munawar, Shah³ 

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; vafaeva.khm@gmail.com

² Kasdi Merbah University of Ouargla, Ouargla, Algeria; zegait.rachid@gmail.com

³ Tongji University, Shanghai, China; munawar@tongji.edu.cn

Correspondence: * email vafaeva.khm@gmail.com

Keywords:

Self-healing; Nanostructures; Particle size; Restorative properties; Composites; Nanotechnology; Smart materials; Sustainability; Infrastructure; Innovative materials; Structural longevity

Abstract:

The object of research is the influence of particle size on the therapeutic properties of self-healing composites. This work aims to comprehensively analyze particle size's influence on the self-healing properties of nanostructures embedded in composites. The study evaluates the effectiveness of various self-healing mechanisms across diverse materials and applications, aiming to understand their implications for improving self-healing composites. **Method.** This research utilizes a critical and comparative approach to scrutinize the technical aspects of self-healing mechanisms within nanostructured composites. 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 assessed, considering their applicability to different material types and construction scenarios. Additionally, the research discusses the potential of nanotechnology to augment self-healing capabilities and introduce novel functionalities. **Results.** The findings reveal the intricate interplay between particle size within nanostructures and their restorative properties in self-healing composites. The diverse mechanisms showcased the promise of prolonged structural longevity, decreased maintenance requirements, and heightened sustainability. However, the study identifies challenges in optimizing healing efficiencies, overcoming cost barriers, and ensuring the enduring durability of materials.

1 Introduction

Самовосстанавливающиеся композиты — это материалы, которые способны самостоятельно восстанавливать структурную целостность после повреждения [1]–[3]. Этот потенциал имеет важные преимущества для различных применений, включая строительные конструкции [4], [5], медицинские имплантаты [6], [7] и электронику [8], [9]. Существует несколько различных механизмов самовосстановления, которые могут быть использованы в композитах. Одним из наиболее распространенных методов является использование микрокапсул, содержащих регенерирующие агенты [10], [11]. При повреждении композита микрокапсулы разрушаются, высвобождая регенерирующие агенты, которые заполняют и восстанавливают поврежденную область.

Другим перспективным подходом к самовосстановлению является использование наноструктур [12]–[14]. Наноструктуры обладают уникальными свойствами, которые могут быть

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties 2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10



использованы для повышения эффективности самовосстановления. Например, наноструктуры могут быть использованы для увеличения концентрации регенерирующих агентов или для улучшения их доставки к поврежденной области [15]–[17]. Размер наноструктур является важным фактором, влияющим на их эффективность в самовосстанавливающихся композитах. В целом, уменьшение размера частиц приводит к улучшению восстановительных свойств. Это связано с тем, что меньшие частицы обладают большей удельной поверхностью, что облегчает их взаимодействие с регенерирующими агентами.

Исследования показали, что уменьшение размера частиц наноструктур может привести к следующим улучшениям восстановительных свойств самовосстанавливающихся композитов [18]–[21]:

- улучшенная скорость восстановления;
- более полное восстановление структурной целостности;
- повышенная долговечность;
- улучшенные механические свойства после восстановления

Однако, в некоторых случаях, уменьшение размера частиц может привести к снижению эффективности самовосстановления. Это связано с тем, что меньшие частицы могут быть более подвержены агрегации или осаждению, что может затруднить их взаимодействие с регенерирующими агентами. В целом, влияние размера частиц на восстановительные свойства самовосстанавливающихся композитов является сложным и зависит от различных факторов, включая тип материала, механизм самовосстановления и концентрацию наноструктур [22–24]. Требуется дополнительные исследования с целью углубленного выяснения данной взаимосвязи и разработки самовосстанавливающихся композитов с оптимальными эксплуатационными характеристиками.

Актуальность данного исследования обусловлена не только растущим интересом к самовосстанавливающимся композитам, но и тем, что размер частиц в наномасштабе может существенно изменить механические и химические свойства материалов. Понимание воздействия размера частиц на восстановительные характеристики позволит наиболее эффективно применять самовосстанавливающиеся композиты в различных сферах. Ожидается, что полученные результаты не только расширят понимание в области самовосстанавливающихся материалов, но и предоставят ключевые результаты для разработки более эффективных и устойчивых композитных материалов. Исследование предполагает, что размер частиц, оптимизированный в соответствии с конкретными требованиями, может значительно улучшить способность композитов к восстановлению после механических повреждений. Возможность управления размером частиц и, следовательно, улучшение восстановительных свойств, предоставит инженерам новые инструменты для создания материалов с расширенным сроком службы и сниженной потребностью в техническом обслуживании. Таким образом, исследование направлено не только на заполнение пробелов в знаниях области самовосстанавливающихся композитов, но и на создание основы для инновационных технологий в области материаловедения и строительства.

В настоящее время существует несколько методов самовосстановления, включая микрокапсульные системы [25], [26], биоинспирированные подходы [27]–[29] и внутреннее восстановление с использованием полимеров с памятью формы [30]–[32]. Микрокапсульные системы представляют собой микроскопические капсулы, содержащие реактивные вещества, которые могут активироваться при повреждении материала и восстанавливать его структуру. Они обладают высоким уровнем точности и контроля восстановления, однако ограничены в своей применимости к материалам с низкими температурами плавления.

Биоинспирированные подходы основаны на принципах, заимствованных из природы, где процессы самовосстановления воспроизводятся через биологические механизмы. Эти методы обладают высокой эффективностью восстановления и применимы к широкому спектру материалов, но требуют сложных механизмов и ресурсов для их реализации. Внутреннее восстановление с помощью полимеров с памятью формы основано на способности материала к возвращению к исходной форме после механического деформирования. Этот метод хорошо подходит для материалов, испытывающих повторные нагрузки и обладающих высокой эластичностью, но ограничен восстановлением только до определенных уровней повреждений.

Дополнительно, перспективным подходом является использование наноструктур, обладающих уникальными свойствами, способными повысить эффективность самовосстановления. Размер наноструктур играет ключевую роль в этом контексте, влияя на их



взаимодействие с регенерирующими агентами и общую эффективность. Несмотря на обширные исследования в данной области, вопросы эффективности и оптимизации размера частиц остаются открытыми. В данном контексте настоящее исследование стремится к более глубокому пониманию взаимосвязи размера частиц и восстановительных свойств самовосстанавливающихся композитов.

Основная цель настоящего исследования заключается в осуществлении всестороннего анализа воздействия размера частиц наноструктур на самовосстанавливающиеся свойства композитов. Для достижения этой цели ставятся следующие конкретные задачи:

- исследование эффективности различных механизмов самовосстановления;
- провести обширный анализ разнообразных механизмов самовосстановления, выявляя их эффективность для различных типов материалов и областей применения.
- определение оптимального диапазона размеров частиц;
- установить оптимальные размеры частиц наноструктур, обеспечивающие максимальную эффективность процесса восстановления.
- оценка влияния размера частиц на скорость и эффективность восстановления;
- исследование долговечности и устойчивости композитов с различными размерами частиц;
- анализировать долговечность и устойчивость самовосстанавливающихся композитов, учитывая разнообразие размеров частиц.

2 Materials and Methods

В данном разделе предоставляется детальное описание методологии исследования, начиная с формулировки целей и задач. Поиск научной литературы осуществлялся с использованием баз данных Scopus и поисковой системы Google Scholar с целью проведения комплексного анализа соответствующих научных работ. Полученные данные подвергались тщательному анализу с использованием языка программирования Python и инструмента VOSviewer. Python был задействован для обработки данных, статистического анализа и визуализации результатов, в то время как VOSviewer служил средством создания наглядного представления научного ландшафта, выделяя ключевые темы и авторов. Общая схема методологии представлена на Рисунке 1.

А. Поиск литературы

Проведенный поиск литературы был направлен на два основных источника: библиографическую и реферативную базу данных Scopus и поисковую систему Google Scholar. Поиск осуществлялся с использованием сочетания ключевых слов и фраз, строго отобранных для полного охвата соответствующей научной литературы. В Таблице 1 представлены 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 nanocomposites	954	без ограничений по датам	выгружены 954
2	nanostructures AND self-healing	387	без ограничений по датам	выгружены 387
3	self-healing AND mechanisms AND nanotechnology	58	без ограничений по датам	выгружены 58
4	(self-healing AND composites) AND (particle AND size)	188	без ограничений по датам	выгружены 188
5	(self-healing AND composites) AND (nanoparticles) AND (carbon AND nanotubes)	33	без ограничений по датам	выгружены 33
6	shape-memory AND polymers AND nanostructures	134	без ограничений по датам	выгружены 134
7	(self-healing AND composites) AND (polymers) AND (shape-memory)	251	без ограничений по датам	выгружены 251
8	restorative AND properties AND nanostructures	59	без ограничений по датам	выгружены 59
9	particle AND size AND nanostructures AND self-healing	20	без ограничений по датам	выгружены 20
Итого:		2 084	Выгружено результатов: 2 084	

V. Извлечение данных

После получения результатов поиска из базы данных Scopus, информация была экспортирована в формат RIS, который широко используется для обмена библиографическими данными. Это позволило удобно подготовить данные для последующего анализа.

C. Анализ данных на Python

Анализ данных выполнялся с использованием языка программирования Python и различных библиотек для работы с данными. Для очистки, преобразования и подготовки данных использовались популярные библиотеки Python, такие как Pandas и NumPy.

D. Анализ в VOSviewer

Помимо анализа данных на Python, данные были также проанализированы с помощью программного обеспечения VOSviewer. Это позволило визуализировать ключевые слова и публикации в наборе данных, а также выявить взаимосвязи между различными концепциями.

E. Интеграция результатов

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

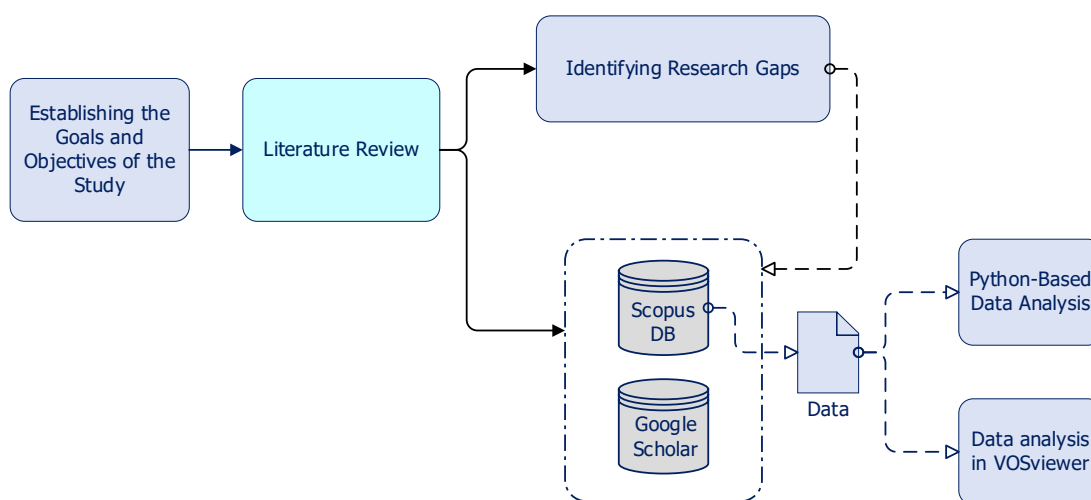


Рис. 1 – Схема методологии
Fig. 1 - Methodology Scheme

Предложенная методология предоставляет возможность извлечь ценную информацию по тематике исследования. Полученные данные обладают высокой достоверностью и могут быть успешно включены в последующие исследовательские работы 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 из Таблицы 1. Информация была извлечена из базы данных Scopus и объединена для проведения комплексного анализа за весь доступный период без применения временных фильтров. Как отражено на Рисунке 2, наблюдается стабильный рост количества научных публикаций с 2010 года по предметной области данного исследования. Пик активности в публикациях приходится на 2023 год. Этот устойчивый восходящий тренд может быть объяснен несколькими факторами:

- развитие тематики: постепенное углубление и расширение исследований в данной тематической области может привести к увеличению числа публикаций;
- технологический прогресс: развитие новых технологий и методов исследования может стимулировать активность в сфере научных исследований;
- международное сотрудничество: увеличение международного сотрудничества может способствовать обмену знаниями и опытом, что сказывается на росте научных публикаций;

- финансирование и инвестиции: повышенное финансирование и вложения в исследовательские проекты могут стимулировать увеличение научных публикаций.

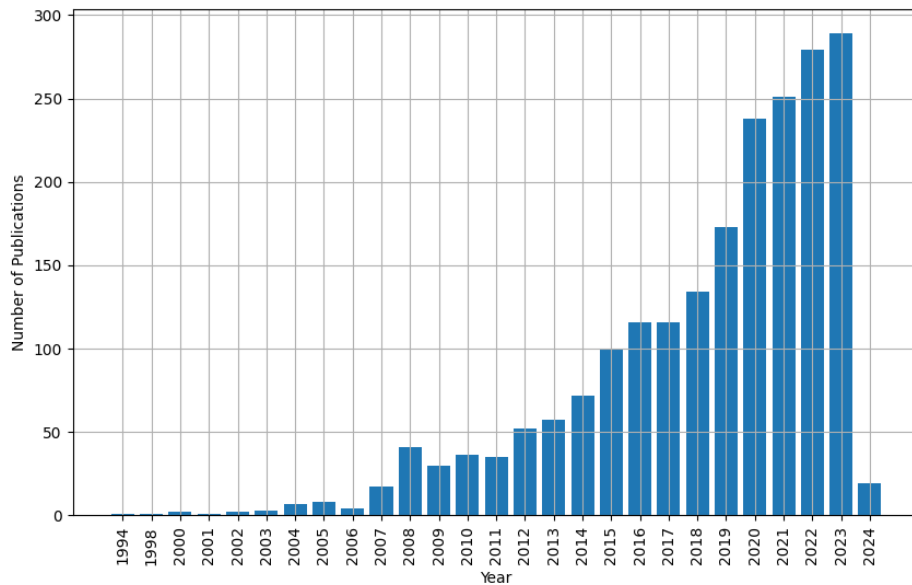


Рис. 2 – Общее количество публикаций по годам
Fig. 2 - Total number of publications by year

Диаграмма (Рис. 3) показывает распределение типов документов, где можно отметить, преобладание статей, которое отражает тот факт, что статьи являются основным способом распространения результатов исследований. Статьи публикуются в рецензируемых журналах, что обеспечивает их высокую степень достоверности и актуальности. За статьями следуют обзоры (186) и конференционные статьи (136), что свидетельствует о разнообразии исследовательских форматов. Также в значительной мере представлены главы книг (131). Это разнообразие типов документов указывает на широкий спектр научных подходов и форм коммуникации в данной тематике исследований.

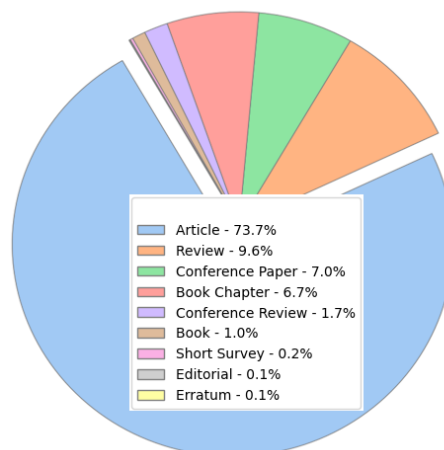


Рис. 3 – Распределение по типам документов
Fig. 3 - Document type distribution

Рис. 4 представляет собой фрагмент VOSviewer - граф взаимосвязей ключевых слов в исследованиях. Анализируя по фрагменту с "nanocomposite" в VOSviewer можно прийти к следующим выводам:

- фокус на нанокompозитах и их свойствах, в том числе: покрытия - гидрофобные поверхности, контактный угол, спектроскопия, ультраструктура (Cluster 1); механические свойства - прочность, деформация, модуль упругости (Cluster 2, 3); химические и физические явления: рентгеновская спектроскопия, изоляция, микрокапсулы, кремнезем (Cluster 1, 3); биосовместимость - заживление ран, антибактериальные свойства, биоразлагаемость (Cluster 3, 5); структура и состав: полимеризация, графен, анилин, наноструктуры, сканирующая

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties
2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10

электронная микроскопия, химическая структура (Cluster 2, 3, 4, 5); функциональные свойства - адсорбция, эластичность, адгезия, проводимость, прочность, память формы, самовосстановление (Cluster 3, 4, 5); применения - доставка лекарств, биоматериалы, тканевой инженерии, регенерация костей, мышц, строительство (Cluster 3, 5).

- сопутствующие тематики: наноструктуры, наноматериалы, покрытия, пористость, свойства поверхностей, испытания материалов, химические реакции, физические процессы.

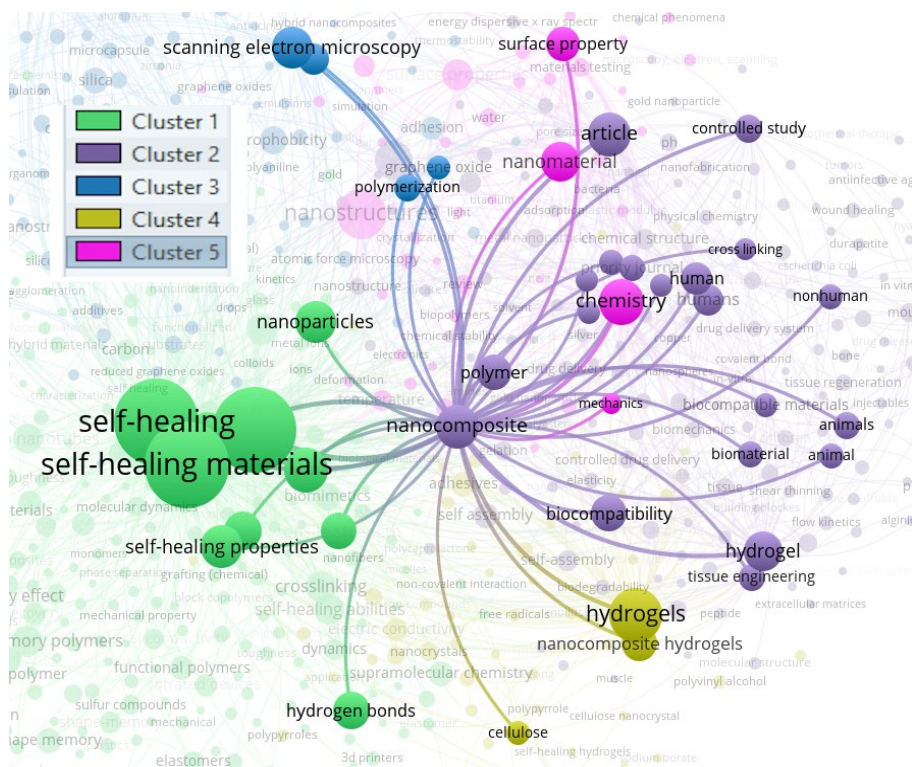


Рис. 4 – Фрагмент аналитики взаимосвязей в VOSviewer (выделено «nanocomposite»)
 Fig. 4 - Fragment of a VOSviewer relationship analysis (nanocomposite highlighted)

Рис. 5 демонстрирует фрагмент аналитики взаимосвязей по ключевому слову «self-healing», где можно сформулировать следующее:

- фокус на самовосстанавливающихся покрытиях и материалов, в том числе: *защита от коррозии* - электрохимическая коррозия, эпоксидные покрытия, ингибиторы коррозии, эмали, сравнительные исследования, адгезия (Cluster 1, 2, 3); *механические свойства* - контактный угол, спектроскопия, ультраструктура, прочность, деформация (Cluster 1, 2, 5); *химический состав и процессы* - золь-гель, свойства поверхности, анализ, эпоксидные смолы, силикаты, нанотрубки, микроструктуры, наноструктурированные материалы, силикон, гидрофобность, симуляция, адсорбция, полимеризация, наноструктуры, наноматериал (Cluster 1, 2, 4, 5); *биосовместимость и медицинские применения* - стоматологические материалы, композитные смолы, заживление ран, биоматериал, доставка лекарств, полиэлектролиты, тканевая инженерия, биосовместимость, костная регенерация (Cluster 3, 5); *функциональные свойства* - самовосстановление трещин, тонких пленок и материалов, эластичность, адгезия, биомеханика, ковалентная связь, управляемая доставка лекарств, внеклеточные матрицы, нанокompозитные гидрогели, оптимизация формы, полиуретановые композиты, память формы, 3D-печать (Cluster 3, 4, 5).

- сопутствующие тематики: нанокомпозиты, химические реакции, физические процессы, механические испытания, биомедицина, материаловедение.

Таким образом можно отметить, что исследования в области нанокомпозитов и самовосстанавливающихся материалов сосредоточены на следующих аспектах:

- разработка новых материалов и конструкций с улучшенными свойствами;
- исследование химических и физических механизмов формирования и свойств материалов;
- разработка методов применения материалов в различных областях;

Эти исследования имеют значительный потенциал для создания новых материалов и технологий с улучшенными свойствами.

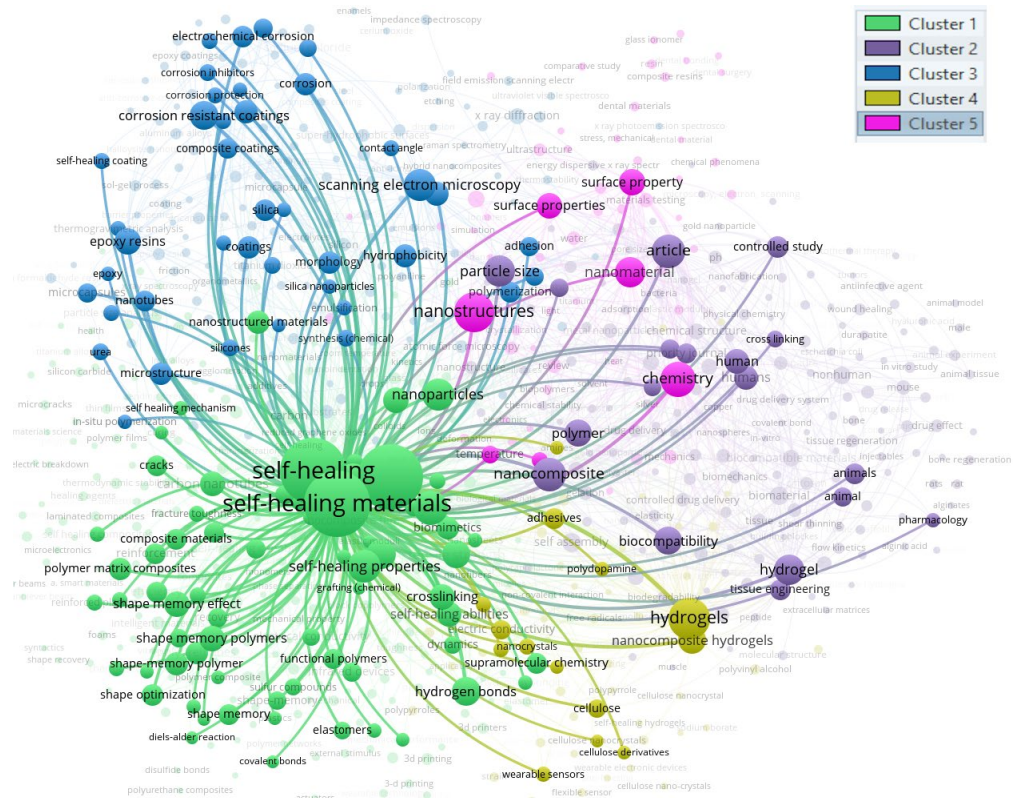


Рис. 5 – Фрагмент аналитики взаимосвязей в VOSviewer (выделено «self-healing»)
Fig. 5 - Fragment of a VOSviewer relationship analysis (self-healing highlighted)

На основании анализа графика топ-ключевых слов с распределением по годам (Рис. 6) можно сделать следующие выводы:

- тема самовосстанавливающихся материалов (self-healing) является наиболее актуальной в последние годы. В 2022 году она заняла первое место по количеству упоминаний;
- тема нанокompозитов (nanocomposite) также является актуальной, но ее популярность снижается. В 2022 году она заняла второе место по количеству упоминаний, но в 2023 году ее обошла тема самовосстанавливающихся материалов;
- тема биосовместимости (biocompatibility) также является актуальной, но ее популярность снижается.

Подытоживая вышесказанное, можно выделить следующие тенденции в исследованиях в области наноматериалов и самовосстанавливающихся материалов:

- возрастающий интерес к самовосстанавливающимся материалам. Это связано с их потенциальным применением в различных областях, включая защиту от коррозии, биомедицину и строительство;
- возрастающий интерес к биосовместимости материалов. Это связано с тем, что биосовместимость является важным фактором для применения материалов в биомедицине.

Можно также выделить следующие возможные направления исследований в области наноматериалов и самовосстанавливающихся материалов:

- разработка новых материалов и конструкций самовосстанавливающихся материалов с улучшенными свойствами;
- исследование химических и физических механизмов самовосстановления.

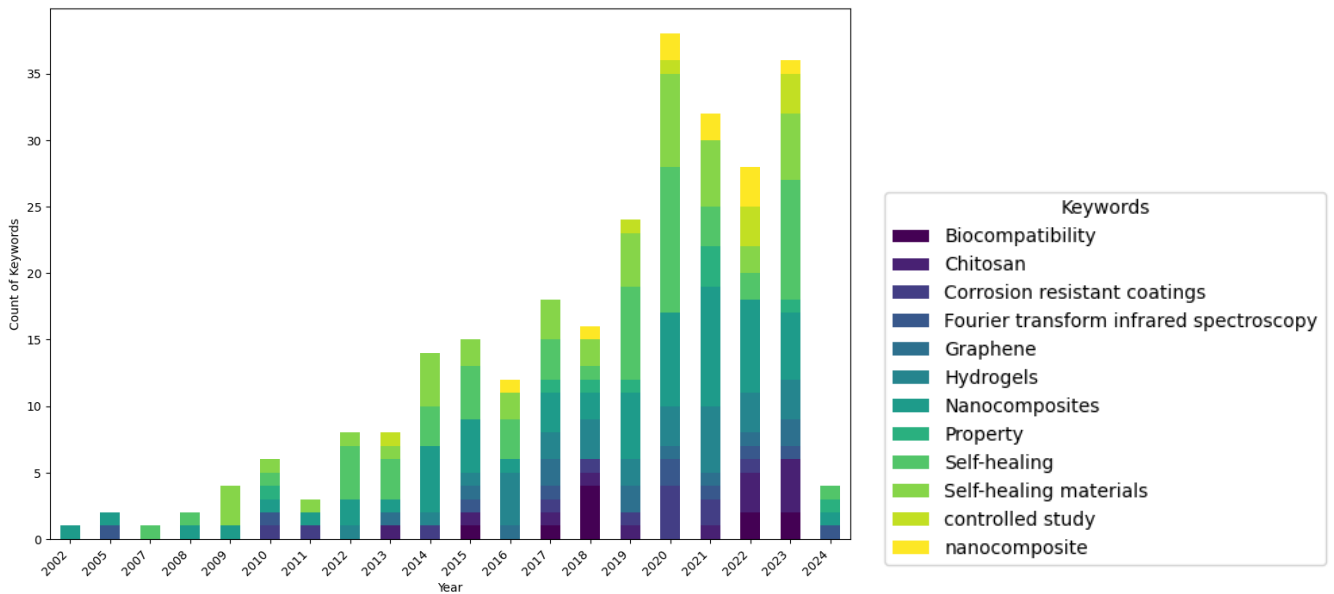


Рис. 6 – Наиболее высокочастотные ключевые слова по годам
Fig. 6 - Most Frequently Used Keywords by Year

Анализ облаков ключевых слов показывает (Рис. 7), что область самовосстанавливающихся материалов является активно развивающейся и перспективной. Исследования фокусируются на совершенствовании материалов, понимании механизмов самовосстановления и расширении их применения в различных сферах.

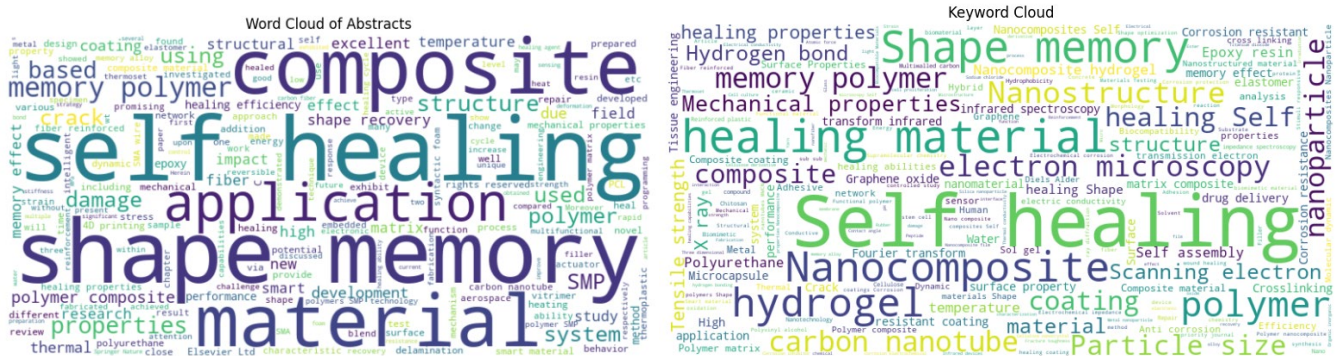


Рис. 7 – Облака слов по аннотациям (слева) и по ключевым словам (справа)
Fig. 7 - Word Clouds by Abstracts (Left) and by Keywords (Right)

Диаграмма на Рис. 8 также демонстрирует, что доминирующими темами в исследованиях являются: самовосстанавливающиеся материалы - наибольший процент занимают термины "самовосстанавливающиеся материалы" (25%) и "нанокомпозиты" (26.4%). Это указывает на то, что разработка и свойства самовосстанавливающихся материалов на основе нанокомпозитов являются центральными темами исследований; химические и физические аспекты - значительное присутствие терминов "водородные связи" (4.3%) и "механические свойства" (4.7%) подчеркивает интерес к пониманию внутренних процессов и прочности материалов; функциональные свойства - термины "коррозионностойкие покрытия" (4.4%) и "гидрогели" (13%) указывают на исследования функциональных характеристик самовосстанавливающихся материалов для конкретных применений.

Круговая диаграмма распределения ключевых слов (Рис.8) подтверждает активное развитие области самовосстанавливающихся материалов. Исследования сосредоточены на разработке материалов с улучшенными свойствами, понимании процессов самовосстановления и расширении их применения в различных сферах.

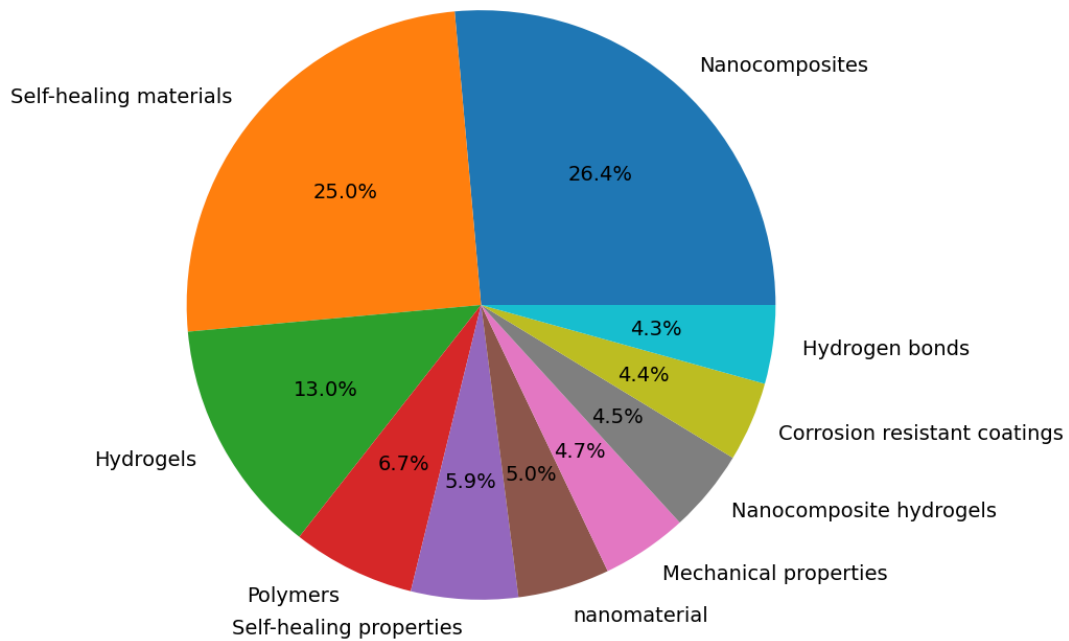


Рис. 8 – Круговая диаграмма распределения ключевых слов
Fig. 8 - Pie chart of keyword distribution

Диаграмма рассеяния, построенная на основе количества научных документов по странам (Рис. 9), предоставляет следующий анализ:

- Китай, Соединенные Штаты и Индия являются тройкой лидеров со значительным отрывом от других стран в количестве научных публикаций;
- кроме Китая и Индии, Южная Корея, Тайвань и Сингапур также заметно выделяются, что указывает на активное участие азиатских стран в научных исследованиях;
- разнообразие стран в топе указывает на многообразие научных интересов и направлений исследований, отражая глобальный характер научного сообщества.

Стоит отметить, что для построения диаграммы рассеяния из выборки стран были отброшены страны с количеством публикаций менее 10.

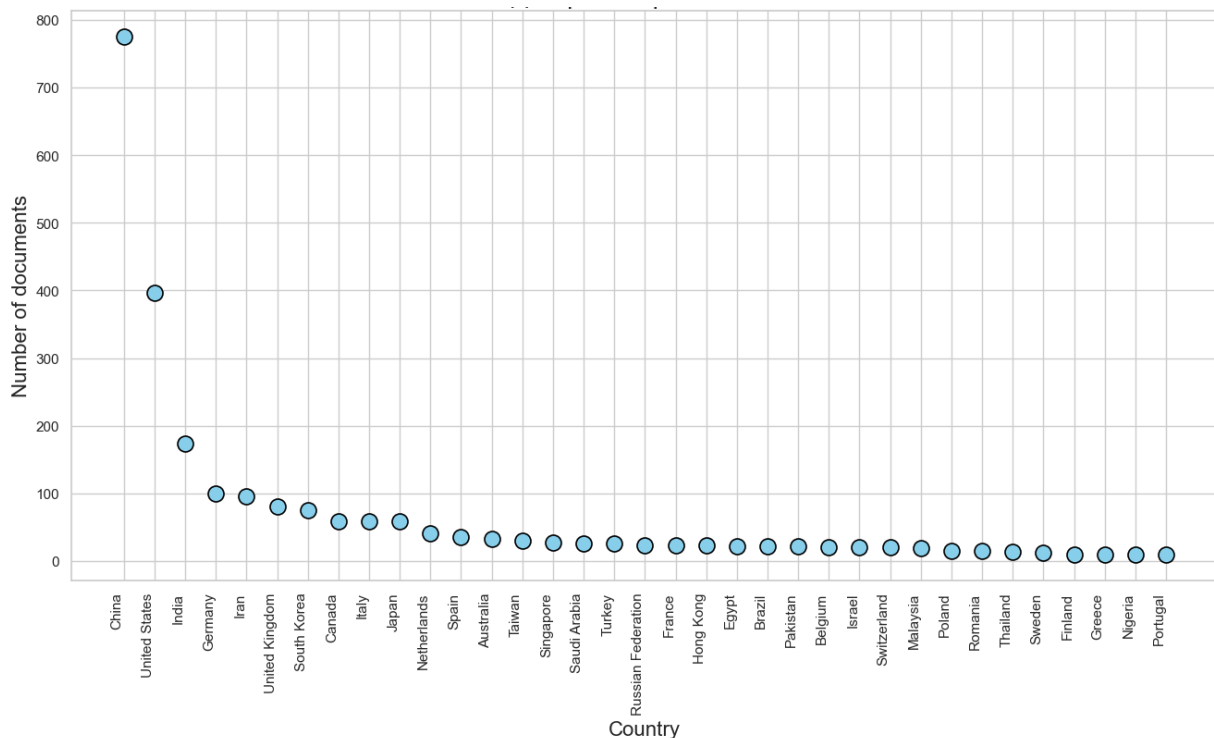


Рис. 9 – Диаграмма рассеяния по странам
Fig. 9 - Country-level scatter plot



3.2 Влияние размера частиц на способность самовосстановления материалов

Разработка самовосстанавливающихся композитов неразрывно связана с нанотехнологиями. Именно наночастицы наделяют материалы способностью к автономному восстановлению повреждений. Этот раздел фокусируется на том, как размер наночастиц влияет на эффективность различных механизмов самовосстановления, раскрывая его основополагающее значение для будущего этой перспективной технологии.

Микрокапсулированные системы. Системы с микрокапсулами, содержащими регенерирующие агенты, широко применяются в самовосстанавливающихся композитах. Размер этих микрокапсул и самих наполнителей играет ключевую роль: уменьшение размера капсул увеличивает отношение площади к объему, что улучшает диффузию и доставку активных веществ к повреждениям, ускоряя процесс самовосстановления; наноразмерные капсулы обеспечивают более равномерное распределение в матрице, что позволяет восстанавливать даже микроскопические дефекты; мелкие капсулы минимизируют внутреннее напряжение на матрицу, снижая риск образования новых трещин и сохраняя структурную целостность материала.

Однако миниатюризация сопряжена с некоторыми трудностями. Уменьшение размера капсулы снижает объем регенерирующего агента, ограничивая глубину и масштаб возможного восстановления. Кроме того, прочность оболочки капсулы становится критически важной для предотвращения преждевременной утечки содержимого.

Биомиметическая регенерация. Биоинспирированные подходы к самовосстановлению используют наночастицы как носители ферментов и других биомолекул, имитируя природные системы регенерации. Размер носителей напрямую влияет на эффективность процесса: большая площадь поверхности наночастиц предоставляет множество активных площадок для связывания биомолекул и запуска регенеративных реакций; контролируя размер наночастиц, можно тонко регулировать активность ферментов, предотвращая нежелательные реакции и оптимизируя процесс самовосстановления; наночастицы, совместимые с биологическими агентами, легко интегрируются в композитную матрицу, способствуя более естественному и эффективному самовосстановлению.

Несмотря на привлекательность, биоинспирированные методы сталкиваются с проблемами долгосрочной стабильности и активации биомолекул в неблагоприятных условиях. Разработка биосовместимых интерфейсов между наночастицами и матрицей также остается актуальной задачей.

Внутреннее самовосстановление с полимерами с памятью формы. Полимеры с памятью формы обладают уникальным свойством восстанавливать исходную форму при определенных стимулах. Интеграция их наночастиц в композиты открывает новый путь к самовосстановлению: мелкие наночастицы полимеров с памятью формы способны самовыравниваться и соединяться под воздействием соответствующего стимула, заполняя микротрещины до их дальнейшего распространения; внутреннее самовосстановление за счет этих полимеров улучшает сопротивление материала циклическим нагрузкам и усталости, продлевая срок службы; размер и состав наночастиц можно контролировать, адаптируя температуру активации и регенеративные свойства под конкретные потребности и нагрузки.

В Таблице 2 представлены параметры, которые могут быть использованы для поиска самовосстанавливающихся материалов. Эти параметры включают механизм самовосстановления, размер наночастиц и эффективность. Например, уменьшение размера капсулы в микрокапсулированных системах может привести к увеличению отношения площади к объему, что может улучшить процесс доставки активных веществ и ускорить самовосстановление.

Таблица 2. Влияние размера наночастиц на эффективность самовосстановления
Table 2. Effect of nanoparticle size on self-healing efficiency

Механизм самовосстановления	Размер наночастиц	Эффективность
Микрокапсулированные системы [21], [33]–[35]	Уменьшение размера капсулы	Увеличение отношения площади к объему, улучшение процесса доставки активных веществ, ускорение самовосстановления (при определенных условиях)
Микрокапсулированные системы [36–39]	Наноразмерные капсулы	Более равномерное распределение в матрице, способность восстанавливать микроскопические



Механизм самовосстановления	Размер наночастиц	Эффективность
		дефекты (при определенных условиях), сохранение структурной целостности
Биомиметическая регенерация [40–43]	Большая площадь поверхности наночастиц	Множество активных площадок для связывания биомолекул и запуска регенеративных реакций
Биомиметическая регенерация [44–47]	Контролируемый размер наночастиц	Тонкое регулирование активности ферментов, оптимизация процесса самовосстановления (при определенных условиях)
Внутреннее самовосстановление с полимерами с памятью формы [48–50]	Мелкие наночастицы	Самовыравнивание и соединение, заполнение микротрещин, устранение дальнейшего распространения (при определенных условиях)
Внутреннее самовосстановление с полимерами с памятью формы [51–53]	Контролируемый размер и состав наночастиц	Адаптация под конкретные потребности и нагрузки

Таблица 3 предоставляет обзор различных методов самовосстановления материалов. Эти методы могут быть использованы для улучшения эксплуатационных свойств материалов, таких как долговечность, надежность и ремонтпригодность. В таблице представлены различные методы самовосстановления материалов. Эти методы основаны на различных принципах действия и имеют различные преимущества и ограничения.

Таблица 3. Методы самовосстановления материалов
Table 3. Methods of Material Self-Repair

Метод	Принцип действия	Преимущества	Ограничения
Микрокапсулирование [54–57]	Освобождение вещества ремонтанта из микрокапсул	Универсальность, долговременность, возможность восстановления в труднодоступных местах	Распределение капсул в матрице, прочность оболочки капсул
Полимерная регенерация [7], [58]–[61]	Заполнение трещин полимером гелематрицей	Высокая прочность материала, возможность восстановления больших повреждений	Ограничения на размер трещин, сложность процесса
Электрокатализ [62–65]	Использование электрохимии для восстановления материала	Быстрый процесс ремонта, возможность восстановления в труднодоступных местах	Низкая устойчивость результата, сложность процесса
Биоинспирированный метод [66–68]	Имитация биологических процессов восстановления	Высокая эффективность ремонта, возможность восстановления сложных структур	Биологическая совместимость, сложность процесса
Супрамолекулярная самосборка [69–73]	Автоматическое восстановление благодаря взаимодействию молекул	Простота процесса восстановления, возможность восстановления сложных структур	Ограничение на сложность структуры материала

В Таблице 4 представлены различные параметры, которые могут влиять на процессы самовосстановления материалов. Эти параметры включают размер наночастиц, состав наночастиц, распределение капсул, концентрацию ремонтанта, температуру, влажность окружающей среды и вид матрицы. К примеру, размер наночастиц может влиять на эффективность самовосстановления, поскольку уменьшение размера наночастиц может привести к увеличению общей поверхности.

Таблица 4. Влияние параметров на процессы самовосстановления материала
Table 4. Impact of Parameters on Material Self-Repair Processes

Параметр	Влияние на самовосстановление материала
Размер наночастиц	Увеличение общей поверхности, улучшение ремонта



Параметр	Влияние на самовосстановление материала
Состав наночастиц	Оптимизация взаимодействия с матрицей
Распределение капсул	Равномерное покрытие матрицы ремонтантами
Концентрация ремонтанта	Высокая концентрация обогащает восстановление
Температура	Повышение температуры активирует ремонт
Влажность окружающей среды	Влажные условия способствуют самовосстановлению
Вид матрицы	Разная матрица требует разных подходов к восстановлению

Таблица 5 предоставляет обзор влияния типа и размера наночастиц на процессы самовосстановления материалов. Эти параметры могут быть использованы для оптимизации процессов самовосстановления для конкретных материалов и применений.

Таблица 5. Влияние типа и размера наночастиц
Table 5. Impact of Nanoparticle Type and Size

Тип наночастиц	Размер (нм)	Влияние на диффузию	Равномерность распределения	Минимизация внутреннего напряжения	Прочность оболочки
Микрокапсулы [74–77]	100-1000	Уменьшен	Увеличено	-	Снижено
Наноразмерные [78–82]	1-100	-	Обеспечивает равномерность	-	-
Мелкие [83–86]	0.1-1	-	-	Минимизируется	-

Ограничениями данного метода являются потенциальное снижение эффективности для масштабных повреждений и ухудшение памяти формы после многократного восстановления. Кроме того, внедрение наночастиц полимеров с памятью формы в крупномасштабные композитные структуры требует дальнейшего развития экономически эффективных методов. Исследование влияния размера наночастиц представляет собой критически важный этап для раскрытия полного потенциала самовосстанавливающихся материалов.

3.3 Описание основных механизмов самовосстановления в наноструктурированных композитах

В данном разделе перечисляются и подробно описываются основные механизмы самовосстановления, которые обеспечивают наноструктурированным композитам способность восстанавливать свою структуру и функциональные свойства после возникновения повреждений.

Фазовый переход и рекристаллизация. В наноструктурированных композитах фазовые переходы и рекристаллизация обеспечивают механизмы самовосстановления. При возникновении повреждений, таких как трещины или деформации, внутренняя энергия материала изменяется, что приводит к инициированию фазовых переходов или рекристаллизации. Эти процессы позволяют композиту восстановить свою структуру путем образования новых кристаллических зерен или изменения формы фаз.

Диффузия молекул и ионов. Диффузия является одним из важнейших механизмов самовосстановления в наноструктурированных композитах. Наноструктуры и/или наночастицы в матрице обеспечивают более высокую поверхность и активность поверхности, что увеличивает скорость и равномерность диффузии молекул и ионов. Это позволяет ремонтным агентам перемещаться к местам повреждений и инициировать процессы самовосстановления.

Автокаталитические реакции. Некоторые наноструктурированные композиты содержат ремонтные материалы или реагенты, которые могут проводить автокаталитические реакции. Эти реакции запускаются при возникновении повреждений и приводят к образованию новых связей или полимерных структур в поврежденной области. Автокаталитические реакции обеспечивают эффективное и точечное самовосстановление, минимизируя воздействие на окружающую среду композита.



Микрокапсулированные ремонтные агенты. Этот механизм самовосстановления основан на инкорпорации микрокапсулированных ремонтных агентов в наноструктурированный композит. При возникновении повреждений микрокапсулы разрушаются, и ремонтные агенты высвобождаются, инфильтруя поврежденные области и усиливающие процессы самовосстановления.

Эластичность и пластичность материала. Улучшенные эластичные и пластичные свойства наноструктурированных композитов позволяют им эффективно поглощать и распределять напряжения, снижая вероятность образования повреждений. Это способствует запуску процессов самовосстановления, а также предотвращает распространение повреждений и расширение уже существующих дефектов. Эластичность и пластичность материала обеспечивают композиту способность восстанавливать свою форму и структуру после деформации.

Самоорганизация и ремоделирование. Наноструктурированные композиты могут обладать способностью к самоорганизации и ремоделированию своей структуры. Это происходит благодаря действию внутренних сил и энергий, которые приводят к перераспределению наночастиц, рекристаллизации и реконфигурации материала. Результатом является восстановление поврежденной области и восстановление функциональных свойств композита.

Управляемое высвобождение ремонтных агентов. В некоторых случаях, наноструктурированные композиты могут быть способными контролировать высвобождение ремонтных агентов. Это достигается путем инкорпорации специальных систем контроля и регулирования. Ремонтные агенты могут быть освобождены только в местах повреждений, что повышает эффективность и энергетическую эффективность процесса самовосстановления.

В Таблице 6 представлены основные механизмы самовосстановления, которые могут быть реализованы в наноструктурированных композитах. Каждый механизм кратко описан и приведены примеры его применения в наноструктурированных композитах.

Таблица 6. Механизмы самовосстановления в наноструктурированных композитах
Table 6. Self-Repair Mechanisms in Nanostructured Composites

Механизм самовосстановления	Принцип работы	Примеры применения в наноструктурированных композитах
Фазовый переход и рекристаллизация [87–91]	Изменение формы фазы материала при повреждении	Композиты на основе оксидов металлов, композиты на основе полимеров с кристаллическими фазами
Диффузия молекул и ионов [92–95]	Увеличение скорости и равномерности диффузии благодаря наличию наноструктур и наночастиц	Композиты с наночастицами катализаторов, композиты с наночастицами полимеров с памятью формы
Автокаталитические реакции [96–100]	Запуск автокаталитических реакций при повреждении, образование новых связей или полимерных структур	Композиты с наночастицами металлов, композиты с наночастицами ферментов
Микрокапсулированные ремонтные агенты [26], [101]	Инкорпорация микрокапсул с ремонтными агентами, их высвобождение при повреждении	Композиты с микрокапсулами, заполненными полимерами, композиты с микрокапсулами, заполненными смолами
Улучшение эластичности и пластичности материала [56], [102]–[104]	Повышение прочности и трещиностойкости материала, снижение вероятности повреждения	Композиты с наночастицами графена, композиты с наночастицами углеродных нанотрубок
Самоорганизация и ремоделирование [105–108]	Перераспределение наночастиц, рекристаллизация и реконфигурация для восстановления поврежденной области	Композиты с наночастицами магнитных материалов, композиты с наночастицами пьезоэлектрических материалов
Управляемое высвобождение ремонтных агентов [109–113]	Способность контролировать высвобождение ремонтных агентов в местах повреждений	Применение в транспортных средствах, электронике, строительстве и других отраслях

Примеры того, как управляемое высвобождение ремонтных агентов может быть использовано в различных областях применения:



В транспортных средствах: управляемое высвобождение ремонтных агентов может быть использовано для восстановления поврежденных деталей транспортных средств, таких как кузова, колеса и двигатели. Это позволит повысить надежность и долговечность транспортных средств, а также снизить расходы на их обслуживание.

В электронике: управляемое высвобождение ремонтных агентов может быть использовано для восстановления поврежденных электронных компонентов, таких как дисплеи, батареи и чипы. Это позволит повысить надежность и долговечность электронных устройств, а также снизить риски, связанные с их отказом.

В строительстве: управляемое высвобождение ремонтных агентов может быть использовано для восстановления поврежденных строительных материалов, таких как бетон, кирпич и краска. Это позволит повысить надежность и долговечность зданий и сооружений, а также снизить расходы на их ремонт.

В Таблице 7 представлены основные механизмы самовосстановления, классифицированные по типу и эффективности. Для каждого механизма указаны характеристики повреждения, скорость восстановления, эффективность восстановления и возможность применения.

Таблица 7. Механизмы самовосстановления в зависимости от типа и эффективности
Table 7. Self-Repair Mechanisms Based on Type and Effectiveness

Механизм самовосстановления	Тип механизма	Характеристика повреждения	Скорость восстановления	Эффективность восстановления	Возможность применения
Фазовый переход и рекристаллизация	Физико-химический	Любая	Медленная	Высокая	Широкая
Диффузия молекул и ионов	Физико-химический	Любая	Быстрая	Высокая	Широкая
Автокаталитические реакции	Химический	Любая	Быстрая	Высокая	Широкая
Микрокапсулированные ремонтные агенты	Физико-химический	Любая	Быстрая	Высокая	Широкая
Эластичность и пластичность материала	Физико-механический	Деформация	Быстрая	Средняя	Узкая
Самоорганизация и ремоделирование	Физико-химический	Любая	Медленная	Средняя	Узкая
Управляемое высвобождение ремонтных агентов	Физико-химический	Любая	Быстрая	Высокая	Широкая

Комбинация этих механизмов самовосстановления обеспечивает наноструктурированным композитам высокую степень надежности и долговечности, позволяя им сохранять свою структуру и функциональные свойства даже при возникновении повреждений. Такие материалы имеют широкий спектр применений в различных отраслях, включая технику безопасности, автомобильную промышленность, аэрокосмическую индустрию, медицину и другие.

3.4 Оценка эффективности наноструктур в самовосстанавливающихся композитах

Методы оценки эффективности. Для оценки эффективности наноструктур в самовосстанавливающихся композитах проводятся эксперименты, в которых сравниваются свойства самовосстанавливающихся композитов с наноструктурами и без них. В таких экспериментах обычно измеряются следующие характеристики: скорость самовосстановления, эффективность самовосстановления, эффективность самовосстановления.

В Таблице 8 представлены достоинства и ограничения различных видов наноструктур в материалах. Например, наночастицы, обладающие значительной поверхностью, проявляют высокую активность в различных процессах, таких как катализ. Тем не менее, они подвержены образованию агрегатов, что может снижать их эффективность. Кроме того, диффузия молекул и ионов внутри наночастиц может столкнуться с трудностями, что ограничивает их применение в некоторых областях. Нанотрубки обладают высокой прочностью и увеличенной поверхностью, но их производство является затратным и сложным, а также возникают трудности с контролем формы и размеров. Нанокристаллы, имеющие контролируемый размер и форму, обладают



уникальными свойствами, однако их синтез в крупных масштабах представляет трудности, а температура синтеза может быть высокой.

Таблица 8. Типы наноструктур в материалах: преимущества и ограничения
Table 8. Types of Nanostructures in Materials: Advantages and Limitations

Тип наноструктуры	Преимущества	Ограничения
Наночастицы [114–117]	Большая площадь поверхности, повышение активности катализаторов	Образование агрегатов, диффузионные ограничения
Нанотрубки [116], [118], [119]	Высокая прочность, увеличение площади поверхности	Высокая стоимость производства, сложность контроля формы и размеров
Нанокристаллы [120–123]	Повышенная активность, контролируемый размер и форма	Трудность синтеза в больших масштабах, высокая температура синтеза

Таблица 9 предоставляет обзор доступных методов оценки процессов самовосстановления материалов. Их применение в исследованиях может варьироваться в зависимости от конкретных потребностей и характеристик материалов.

Таблица 9. Методы оценки самовосстановления материалов
Table 9. Methods for Assessing Material Self-Repair

Метод	Преимущества	Ограничения
Испытания на растяжение [124–126]	Оценка скорости самовосстановления, прочности и эффективности восстановления	Трудность контроля начального состояния материала, влияние внешних факторов на результаты испытаний
Микроскопия [127–129]	Визуализация структурных изменений и распределения наноструктур в материале	Ограниченный объем образцов, высокая стоимость оборудования
Спектроскопия [130–133]	Определение химического состава материала	Влияние окружающей среды на результаты измерений
Наноиндентация [134–138]	Измерение механических свойств материала	Влияние геометрии наноструктур на результаты измерений

Влияние наноструктур на процессы самовосстановления. Наноструктуры могут оказывать положительное влияние на процессы самовосстановления материалов по следующим причинам:

- увеличение площади поверхности: наноструктуры имеют большую площадь поверхности, чем макроскопические частицы, что увеличивает скорость диффузии молекул и ионов, а также эффективность автокаталитических реакций;
- повышение активности катализаторов: наноструктуры могут повышать активность катализаторов, что приводит к ускорению автокаталитических реакций;
- повышение прочности и стабильности микрокапсул: наноструктуры могут повышать прочность и стабильность микрокапсул, что снижает вероятность их разрушения при повреждении материала;
- способствование самоорганизации и ремоделированию: наноструктуры могут способствовать самоорганизации и ремоделированию материала, что приводит к более эффективному самовосстановлению.

В Таблице 10 представлены характеристики наноструктур, которые могут влиять на процессы самовосстановления материалов. В целом, влияние характеристик наноструктур на самовосстановление материалов является сложным и многофакторным процессом. Однако понимание этих влияний может способствовать разработке новых материалов с улучшенными свойствами самовосстановления.

Таблица 10. Влияние характеристик наноструктур на процессы
Table 10. Influence of Nanoscale Characteristics on Processes

Характеристика наноструктур	Влияние на самовосстановление
Площадь поверхности	Увеличивает скорость диффузии молекул и ионов, а также эффективность автокаталитических реакций
Активность катализаторов	Повышает активность катализаторов, что приводит к ускорению автокаталитических реакций
Прочность и стабильность микрокапсул	Повышает прочность и стабильность микрокапсул, что снижает вероятность их разрушения при повреждении материала



Характеристика наноструктур	Влияние на самовосстановление
Способствование самоорганизации и ремоделированию	Способствует самоорганизации и ремоделированию материала, что приводит к более эффективному самовосстановлению

В Таблице 11 представлены усредненные значения влияния размеров наночастиц на характеристики самовосстановления материалов.

Таблица 11. Влияние размеров наночастиц на характеристики самовосстановления материалов
Table 11. Impact of Nanoparticle Sizes on Self-Repair Characteristics of Materials

Размеры частиц	Эффективность восстановления	Скорость восстановления	Эффективность восстановления	Долговечность
Меньше 100 нм	Низкая	Низкая	Средняя	Средняя
100–500 нм	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
500–1000 нм	Очень высокая	Очень высокая	Очень высокая	Очень высокая
Больше 1000 нм	Низкая	Низкая	Средняя	Низкая

Проведенные исследования показали, что наноструктуры могут оказывать положительное влияние на процессы самовосстановления материалов. Использование наноструктур позволяет ускорить, повысить эффективность самовосстановления, что приводит к повышению надежности и долговечности материалов.

Дальнейшие исследования в этой области направлены на повышение эффективности и надежности самовосстановления, а также на расширение спектра применяемых материалов и технологий. Перспективными направлениями исследований являются разработка новых материалов с самовосстанавливающимися свойствами, а также создание систем управления самовосстановлением.

3.5 Потенциал нанотехнологий для улучшения свойств самовосстановления и введения новых функциональностей

Исследования, проведенные в последние годы, показали, что использование наноструктур может значительно улучшить свойства самовосстанавливающихся композитов. В частности, было установлено, что наноструктуры могут:

- ускорить скорость самовосстановления: наноструктуры имеют большую площадь поверхности, что увеличивает скорость диффузии молекул и ионов, а также эффективность автокаталитических реакций;
- повысить эффективность самовосстановления: наноструктуры могут способствовать самоорганизации и ремоделированию материала, что приводит к более полному восстановлению;
- снизить затраты энергии на самовосстановление: наноструктуры могут повышать эффективность самовосстановления, что приводит к снижению затрат энергии на восстановление;

В дальнейшем исследования в этой области будут направлены на дальнейшее улучшение свойств самовосстанавливающихся композитов с помощью наноструктур. Перспективными направлениями являются:

- разработка новых механизмов самовосстановления: наноструктуры могут использоваться для создания новых механизмов самовосстановления, которые не могут быть реализованы в материалах без наноструктур;
- повышение эффективности существующих механизмов самовосстановления: наноструктуры могут использоваться для повышения эффективности существующих механизмов самовосстановления, таких как диффузия, автокатализ и самоорганизация;
- разработка новых материалов с самовосстанавливающимися свойствами: наноструктуры могут использоваться для разработки новых материалов с самовосстанавливающимися свойствами, которые имеют улучшенные эксплуатационные характеристики;



Наноструктуры могут использоваться для введения новых функциональностей в самовосстанавливающиеся материалы. Например, наноструктуры могут быть использованы для: повышения износостойкости, улучшения теплопроводности, повышения электропроводности, улучшения оптических свойств. Таблица 12 сравнивает различные методы наноструктурирования для материалов с функцией самовосстановления. Из таблицы видно, что каждый метод имеет свои преимущества и ограничения. Выбор метода наноструктурирования зависит от конкретных требований к материалу и условиям его эксплуатации.

Таблица 12. Сравнение методов наноструктурирования
Table 12. Comparison of Nanostructuring Methods

Метод	Преимущества	Ограничения
Наночастицы	Легкость нанесения, равномерное распределение	Выпадение наночастиц из матрицы, слабая связь между ними, агрегация
Нановолокна	Высокая площадь поверхности, легкость нанесения, металлическое или межфазное соединение	Риск попадания в легкие или другие органы при вдыхании
Нанокapsулы	Защита восстанавливающих веществ от окружающей среды, возможность равномерного распределения	Необходимость контроля размера и распределения нанокapsул
Нанокomпозиты	Улучшенные механические свойства, высокая стойкость к разрушению	Сложность получения, изменение реологических свойств материала

Нанотехнологии имеют большой потенциал для улучшения свойств самовосстанавливающихся композитов. Использование наноструктур может значительно улучшить скорость, эффективность самовосстановления, а также ввести новые функциональности в самовосстанавливающиеся материалы. Дальнейшие исследования в этой области будут направлены на разработку новых способов использования нанотехнологий для создания инновационных самовосстанавливающихся материалов, которые имеют улучшенные эксплуатационные характеристики и могут использоваться в различных областях применения.

3.6 Оценка перспектив применения наноструктур в самовосстанавливающихся композитах

Исследования, проведенные в последние годы, показали, что использование наноструктур может значительно улучшить свойства самовосстанавливающихся композитов. В частности, было установлено, что наноструктуры могут:

- ускорить скорость самовосстановления: наноструктуры имеют большую площадь поверхности, что увеличивает скорость диффузии молекул и ионов, а также эффективность автокаталитических реакций.

- повысить эффективность самовосстановления: наноструктуры могут способствовать самоорганизации и ремоделированию материала, что приводит к более полному восстановлению;

- снизить затраты энергии на самовосстановление: наноструктуры могут повышать эффективность самовосстановления, что приводит к снижению затрат энергии на восстановление.

Кроме того, наноструктуры могут использоваться для введения новых функциональностей в самовосстанавливающиеся материалы, такие как повышение износостойкости, улучшение теплопроводности, повышение электропроводности и улучшения оптических свойств. Эти результаты показывают, что использование наноструктур имеет большой потенциал для улучшения свойств самовосстанавливающихся композитов и расширения их областей применения.

Результаты исследований в области использования наноструктур в самовосстанавливающихся композитах имеют большой потенциал для применения в различных технологических областях. Например, самовосстанавливающиеся композиты могут быть использованы для: изготовления деталей транспортных средств, таких как кузова, колеса и двигатели. Это позволит повысить надежность и долговечность транспортных средств, а также снизить расходы на их обслуживание: самовосстанавливающиеся композиты могут использоваться для изготовления электронных компонентов, таких как дисплеи, батареи и чипы.



Это позволит повысить надежность и долговечность электронных устройств, а также снизить риски, связанные с их отказом; в производстве строительных материалов - для изготовления строительных материалов, таких как бетон, кирпич и краска. Это позволит повысить надежность и долговечность зданий и сооружений, а также снизить расходы на их ремонт.

Применение наноструктур в самовосстанавливающихся композитах имеет ряд потенциальных выигрышей, которые могут привести к следующим преимуществам:

- повышение надежности и долговечности материалов: использование наноструктур может значительно улучшить способность материалов восстанавливаться после повреждений, что приведет к повышению их надежности и долговечности;

- снижение затрат на обслуживание и ремонт: самовосстанавливающиеся материалы требуют меньшего обслуживания и ремонта, что может привести к снижению затрат на эти операции;

- расширение областей применения материалов: самовосстанавливающиеся материалы могут применяться в новых областях, где требуется высокая надежность и долговечность материалов.

Однако при внедрении нанотехнологий в производство самовосстанавливающихся композитов необходимо учитывать ряд вызовов, таких как: увеличение стоимости производства: производство самовосстанавливающихся композитов может быть более дорогостоящим, чем производство обычных материалов; ограничения масштабируемости - производство самовосстанавливающихся композитов в промышленных масштабах может быть сопряжено с определенными трудностями; необходимость обеспечения безопасности - необходимо обеспечить безопасность использования самовосстанавливающихся композитов, в том числе в отношении их воздействия на окружающую среду.

Таким образом, для дальнейшего развития исследований в области использования наноструктур в самовосстанавливающихся композитах необходимо сосредоточиться на следующих направлениях:

- разработка новых методов нанесения наноструктур: разработка новых методов нанесения наноструктур позволит обеспечить более равномерное распределение наноструктур в материале и повысить эффективность введения новых функциональностей.

- исследование новых механизмов самовосстановления: исследование новых механизмов самовосстановления позволит создать самовосстанавливающиеся материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

- разработка новых материалов с самовосстанавливающимися свойствами: разработка новых материалов с самовосстанавливающимися свойствами позволит расширить области применения самовосстанавливающихся материалов.

Реализация этих направлений исследований позволит создать новые самовосстанавливающиеся материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками и расширить их области применения.

4 Conclusions

На основе библиометрического анализа литературы, охватывающего 2084 статьи, можно сформулировать следующие выводы:

1. Исследования в области самовосстанавливающихся нанокомпозитов являются перспективным направлением, имеющим значительный потенциал для создания новых материалов и технологий с улучшенными свойствами. Китай, Соединенные Штаты и Индия являются лидерами в области исследований самовосстанавливающихся нанокомпозитов. Это связано с наличием в этих странах крупных исследовательских центров, финансирующих организаций и предприятий, заинтересованных в развитии этой области.

2. Размер наночастиц играет ключевую роль в эффективности самовосстанавливающихся материалов. Уменьшение размера наночастиц приводит к улучшению следующих свойств:

- диффузия: уменьшение размера наночастиц увеличивает отношение площади к объему, что улучшает диффузию активных веществ к повреждениям, ускоряя процесс самовосстановления.



- равномерность распределения: наноразмерные частицы обеспечивают более равномерное распределение в матрице, что позволяет восстанавливать даже микроскопические дефекты.
- минимизация внутреннего напряжения: мелкие частицы минимизируют внутреннее напряжение на матрице, снижая риск образования новых трещин и сохраняя структурную целостность материала.

В целом, уменьшение размера наночастиц приводит к повышению эффективности самовосстанавливающихся материалов. Однако, это также может привести к снижению прочности оболочки капсул или полимеров с памятью формы, что может ограничить масштаб повреждений, которые можно восстановить. Кроме того, внедрение наночастиц в крупномасштабные композитные структуры требует дальнейшего развития экономически эффективных методов. Исследование влияния размера наночастиц представляет собой критически важный этап для раскрытия полного потенциала самовосстанавливающихся материалов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методов, позволяющих получать наночастицы с заданными размерами и свойствами, а также на разработку экономически эффективных методов внедрения наночастиц в крупномасштабные композитные структуры.

3. Наноструктурированные композиты обладают способностью к самовосстановлению, что позволяет им сохранять свою структуру и функциональные свойства даже при возникновении повреждений. Существует множество различных механизмов самовосстановления, которые могут быть реализованы в наноструктурированных композитах. Комбинация различных механизмов самовосстановления позволяет создавать наноструктурированные композиты с высокой степенью надежности и долговечности.

4. На основе анализа литературы можно сделать также следующие дополнительные выводы:

- развитие самовосстанавливающихся нанокомпозитов имеет важное значение для различных отраслей промышленности, включая строительство, медицину и электронику. Самовосстанавливающиеся материалы могут использоваться для создания более надежных и долговечных конструкций, медицинских имплантатов и электронных устройств.

- исследования в области самовосстанавливающихся нанокомпозитов находятся на ранней стадии развития. Дальнейшие исследования должны быть направлены на решение следующих задач:

- разработка новых методов получения наночастиц с заданными размерами и свойствами.
- разработка экономически эффективных методов внедрения наночастиц в крупномасштабные композитные структуры.
- исследование влияния других факторов, таких как состав и концентрация наночастиц, на эффективность самовосстановления.

Решение этих задач позволит создать самовосстанавливающиеся нанокомпозиты с улучшенными эксплуатационными характеристиками, которые будут широко использоваться в различных областях промышленности.

5. На основе полученных результатов можно дать следующие рекомендации для дальнейших исследований в области самовосстанавливающихся нанокомпозитов:

- следует сосредоточиться на разработке новых методов получения наночастиц с заданными размерами и свойствами. Это позволит создать самовосстанавливающиеся нанокомпозиты с более высокой эффективностью и надежностью.

- необходимо разработать экономически эффективные методы внедрения наночастиц в крупномасштабные композитные структуры, что позволит снизить стоимость производства самовосстанавливающихся материалов и сделать их более доступными для широкого применения.

- следует изучить влияние других факторов, таких как состав и концентрация наночастиц, на эффективность самовосстановления для оптимизирования состава и структуры самовосстанавливающихся нанокомпозитов для конкретных применений.

Реализация этих рекомендаций позволит ускорить развитие самовосстанавливающихся нанокомпозитов и сделать их более доступными для практического применения.



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 Scheiner, M., Dickens, T.J. and Okoli, O. (2016) Progress towards Self-Healing Polymers for Composite Structural Applications. *Polymer*, Elsevier, **83**, 260–282. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2015.11.008>.
- 2 Idumah, C.I. (2021) Recent Advancements in Self-Healing Polymers, Polymer Blends, and Nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, SAGE Publications Ltd, **29**, 246–258. https://doi.org/10.1177/0967391120910882/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0967391120910882-FIG8.JPEG.
- 3 Snyder, A.D., Phillips, Z.J., Turicek, J.S., Diesendruck, C.E., Nakshatrala, K.B. and Patrick, J.F. (2022) Prolonged in Situ Self-Healing in Structural Composites via Thermo-Reversible Entanglement. *Nature Communications* 2022 *13:1*, Nature Publishing Group, **13**, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33936-z>.
- 4 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>.
- 5 Cheng, M., Fu, Q., Tan, B., Ma, Y., Fang, L., Lu, C. and Xu, Z. (2022) Build a Bridge from Polymeric Structure Design to Engineering Application of Self-Healing Coatings: A Review. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **167**, 106790. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2022.106790>.
- 6 Liu, Y. and Xiong, D. (2021) A Tannic Acid-Reinforced PEEK-Hydrogel Composite Material with Good Biotribological and Self-Healing Properties for Artificial Joints. *Journal of Materials Chemistry B*, The Royal Society of Chemistry, **9**, 8021–8030. <https://doi.org/10.1039/D1TB01357B>.
- 7 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>.
- 8 Mashkoor, F., Lee, S.J., Yi, H., Noh, S.M. and Jeong, C. (2022) Self-Healing Materials for Electronics Applications. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, Vol. 23, Page 622, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **23**, 622. <https://doi.org/10.3390/IJMS23020622>.
- 9 Tutika, R., Haque, A.B.M.T. and Bartlett, M.D. (2021) Self-Healing Liquid Metal Composite for Reconfigurable and Recyclable Soft Electronics. *Communications Materials* 2021 *2:1*, Nature Publishing Group, **2**, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43246-021-00169-4>.
- 10 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/FIGURES/12>.
- 11 Jiang, W., Zhou, G., Duan, J., Liu, D., Zhang, Q. and Tian, F. (2021) Synthesis and Characterization of a Multifunctional Sustained-Release Organic-Inorganic Hybrid Microcapsule with Self-Healing and Flame-Retardancy Properties. *ACS Applied Materials and Interfaces*, American Chemical Society, **13**, 15668–15679. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.1C01540/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AM1C01540_0014.GIF.
- 12 Zhai, L., Narkar, A. and Ahn, K. (2020) Self-Healing Polymers with Nanomaterials and Nanostructures. *Nano Today*, Elsevier, **30**, 100826. <https://doi.org/10.1016/J.NANTOD.2019.100826>.
- 13 Wang, Y., Huang, X. and Zhang, X. (2021) Ultrarobust, Tough and Highly Stretchable Self-Healing Materials Based on Cartilage-Inspired Noncovalent Assembly Nanostructure. *Nature Communications* 2021 *12:1*, Nature Publishing Group, **12**, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21577-7>.
- 14 Liu, Y., Liu, X., Liu, P., Chen, X. and Yu, D.G. (2020) Electrospun Multiple-Chamber Nanostructure



- and Its Potential Self-Healing Applications. *Polymers* 2020, Vol. 12, Page 2413, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **12**, 2413. <https://doi.org/10.3390/POLYM12102413>.
- 15 Li, L., Hao, R., Qin, J., Song, J., Chen, X., Rao, F., Zhai, J., Zhao, Y., Zhang, L. and Xue, J. (2022) Electrospun Fibers Control Drug Delivery for Tissue Regeneration and Cancer Therapy. *Advanced Fiber Materials* 2022 4:6, Springer, **4**, 1375–1413. <https://doi.org/10.1007/S42765-022-00198-9>.
- 16 Barroso, A., Mestre, H., Ascenso, A., Simões, S. and Reis, C. (2020) Nanomaterials in Wound Healing: From Material Sciences to Wound Healing Applications. *Nano Select*, John Wiley & Sons, Ltd, **1**, 443–460. <https://doi.org/10.1002/NANO.202000055>.
- 17 Makvandi, P., Josic, U., Delfi, M., Pinelli, F., Jahed, V., Kaya, E., Ashrafizadeh, M., Zarepour, A., Rossi, F., Zarrabi, A., Agarwal, T., Zare, E.N., Ghomi, M., Kumar Maiti, T., Breschi, L. and Tay, F.R. (2021) Drug Delivery (Nano)Platforms for Oral and Dental Applications: Tissue Regeneration, Infection Control, and Cancer Management. *Advanced Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **8**, 2004014. <https://doi.org/10.1002/ADVS.202004014>.
- 18 Yu, C., Salzano de Luna, M., Marotta, A., Ponti, C., Esposito, I., Scherillo, F., Wang, Z., Zhang, X., Xia, H. and Lavorgna, M. (2021) NIR Light-Triggered Self-Healing Waterborne Polyurethane Coatings with Polydopamine-Coated Reduced Graphene Oxide Nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **161**, 106499. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2021.106499>.
- 19 Zhang, H. and Guo, Z. (2023) Recent Advances in Self-Healing Superhydrophobic Coatings. *Nano Today*, Elsevier, **51**, 101933. <https://doi.org/10.1016/J.NANTOD.2023.101933>.
- 20 Cui, H., Jiang, W., Wang, C., Ji, X., Liu, Y., Yang, G., Chen, J., Lyu, G. and Ni, Y. (2021) Lignin Nanofiller-Reinforced Composites Hydrogels with Long-Lasting Adhesiveness, Toughness, Excellent Self-Healing, Conducting, Ultraviolet-Blocking and Antibacterial Properties. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **225**, 109316. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109316>.
- 21 Malekhouyan, R., Neisiany, R.E., Khorasani, S.N., Das, O., Berto, F. and Ramakrishna, S. (2021) The Influence of Size and Healing Content on the Performance of Extrinsic Self-Healing Coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **138**, 49964. <https://doi.org/10.1002/APP.49964>.
- 22 Chen, K., Wang, F., Liu, S., Wu, X., Xu, L. and Zhang, D. (2020) In Situ Reduction of Silver Nanoparticles by Sodium Alginate to Obtain Silver-Loaded Composite Wound Dressing with Enhanced Mechanical and Antimicrobial Property. *International Journal of Biological Macromolecules*, Elsevier, **148**, 501–509. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.01.156>.
- 23 Shen, Y., Cai, Z., Tao, J., Li, K., Chen, H., Wu, Z., Jia, Z. and Li, H. (2021) Multi-Type Nanoparticles in Superhydrophobic PU-Based Coatings towards Self-Cleaning, Self-Healing and Mechanochemical Durability. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **159**, 106451. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2021.106451>.
- 24 Zhong, F., He, Y., Wang, P., Chen, C. and Wu, Y. (2022) Novel PH-Responsive Self-Healing Anti-Corrosion Coating with High Barrier and Corrosion Inhibitor Loading Based on Reduced Graphene Oxide Loaded Zeolite Imidazole Framework. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Elsevier, **642**, 128641. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2022.128641>.
- 25 Wu, K., Chen, Y., Luo, J., Liu, R., Sun, G. and Liu, X. (2021) Preparation of Dual-Chamber Microcapsule by Pickering Emulsion for Self-Healing Application with Ultra-High Healing Efficiency. *Journal of Colloid and Interface Science*, Academic Press, **600**, 660–669. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2021.05.066>.
- 26 Yuan, W., Zhang, Z., Li, Y., Huang, Y., Zhong, Z. and Hu, Z. (2024) Self-Healing and in-Situ Real-Time Damage-Reporting Fiber-Reinforced Composite. *Composites Science and Technology*, Elsevier, **245**, 110344. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2023.110344>.
- 27 Kanwal, M., Adnan, F., Khushnood, R.A., Jalil, A., Khan, H.A., Wattoo, A.G. and Rasheed, S. (2024) Biomineralization and Corrosion Inhibition of Steel in Simulated Bio-Inspired Self-Healing Concrete. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **82**, 108224. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.108224>.
- 28 Luo, Z., Bian, F., Cao, X., Shang, L., Zhao, Y. and Bi, Y. (2024) Bio-Inspired Self-Adhesive Microparticles with Melanin Nanoparticles Integration for Wound Closure and Healing. *Nano Today*, Elsevier, **54**, 102138. <https://doi.org/10.1016/J.NANTOD.2023.102138>.
- 29 Zhang, L., Zhao, T. and Liu, M. (2024) Bioinspired Multiphase Gels Using Spatial Confinement Strategy. *Accounts of Materials Research*, ShanghaiTech University and American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/ACCOUNTSMR.3C00174>.

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10



- 30 Xu, X., Ma, X., Cui, M., Zhao, H., Stott, N.E., Zhu, J., Yan, N. and Chen, J. (2024) Fully Biomass-Derived Polyurethane Based on Dynamic Imine with Self-Healing, Rapid Degradability, and Editable Shape Memory Capabilities. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **479**, 147823. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.147823>.
- 31 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>.
- 32 Shi, M., Liu, J., Qin, J., Wang, D. and Liang, L. (2024) Reprocessed, Shape-Memory and Self-Healing Robust Epoxy Resin by Hindered Urea Bond. *Polymer*, Elsevier, **290**, 126565. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2023.126565>.
- 33 Zotiadis, C., Patrikalos, I., Loukaidou, V., Korres, D.M., Karantonis, A. and Vouyiouka, S. (2021) Self-Healing Coatings Based on Poly(Urea-Formaldehyde) Microcapsules: In Situ Polymerization, Capsule Properties and Application. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **161**, 106475. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2021.106475>.
- 34 Pittala, R.K., Ben, B.S. and Ben, B.A. (2021) Self-Healing Performance Assessment of Epoxy Resin and Amine Hardener Encapsulated Polymethyl Methacrylate Microcapsules Reinforced Epoxy Composite. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **138**, 50550. <https://doi.org/10.1002/APP.50550>.
- 35 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>.
- 36 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>.
- 37 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>.
- 38 Sun, J., Wang, Y., Li, N. and Tian, L. (2019) Tribological and Anticorrosion Behavior of Self-Healing Coating Containing Nanocapsules. *Tribology International*, Elsevier, **136**, 332–341. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2019.03.062>.
- 39 Sun, C., Yarmohammadi, A., Isfahani, R.B., Nejad, M.G., Toghraie, D., Fard, E.K., Saber-Samandari, S. and Khandan, A. (2021) Self-Healing Polymers Using Electrospayed Microcapsules Containing Oil: Molecular Dynamics Simulation and Experimental Studies. *Journal of Molecular Liquids*, Elsevier, **325**, 115182. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2020.115182>.
- 40 Ni, X., Gao, Y., Zhang, X., Lei, Y., Sun, G. and You, B. (2021) An Eco-Friendly Smart Self-Healing Coating with NIR and PH Dual-Responsive Superhydrophobic Properties Based on Biomimetic Stimuli-Responsive Mesoporous Polydopamine Microspheres. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **406**, 126725. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126725>.
- 41 Li, Q., Wen, J., Liu, C., Jia, Y., Wu, Y., Shan, Y., Qian, Z. and Liao, J. (2019) Graphene-Nanoparticle-Based Self-Healing Hydrogel in Preventing Postoperative Recurrence of Breast Cancer. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/ACSBOMATERIALS.8B01475/SUPPL_FILE/AB8B01475_SI_001.PDF.
- 42 Han, F., Meng, Q., Xie, E., Li, K., Hu, J., Chen, Q., Li, J. and Han, F. (2023) Engineered Biomimetic Micro/Nano-Materials for Tissue Regeneration. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Frontiers Media SA, **11**. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2023.1205792>.
- 43 Rashid, M., Roni, M.A. and Rahman, M. (2021) Clinical Status of Bioinspired and Biomimetic Materials. *Bioinspired and Biomimetic Materials for Drug Delivery*, Woodhead Publishing, 277–294. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821352-0.00009-5>.
- 44 Azevedo, H.S. and Pashkuleva, I. (2015) Biomimetic Supramolecular Designs for the Controlled Release of Growth Factors in Bone Regeneration. *Advanced Drug Delivery Reviews*, Elsevier, **94**, 63–76. <https://doi.org/10.1016/J.ADDR.2015.08.003>.
- 45 Meyer, R.A., Sunshine, J.C. and Green, J.J. (2015) Biomimetic Particles as Therapeutics. *Trends in Biotechnology*, Elsevier, **33**, 514–524. <https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2015.07.001>.
- 46 Ebrahimi, M., Botelho, M., Lu, W. and Monmaturapoj, N. (2019) Synthesis and Characterization

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10



- of Biomimetic Bioceramic Nanoparticles with Optimized Physicochemical Properties for Bone Tissue Engineering. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, John Wiley & Sons, Ltd, **107**, 1654–1666. <https://doi.org/10.1002/JBM.A.36681>.
- 47 Sridhar, R., Lakshminarayanan, R., Madhaiyan, K., Barathi, V.A., Limh, K.H.C. and Ramakrishna, S. (2015) Electrospayed Nanoparticles and Electrospun Nanofibers Based on Natural Materials: Applications in Tissue Regeneration, Drug Delivery and Pharmaceuticals. *Chemical Society Reviews*, The Royal Society of Chemistry, **44**, 790–814. <https://doi.org/10.1039/C4CS00226A>.
- 48 Hornat, C.C. and Urban, M.W. (2020) Shape Memory Effects in Self-Healing Polymers. *Progress in Polymer Science*, Pergamon, **102**, 101208. <https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2020.101208>.
- 49 Tang, D., Zhang, L., Zhang, X., Xu, L., Li, K. and Zhang, A. (2022) Bio-Mimetic Actuators of a Photothermal-Responsive Vitrimer Liquid Crystal Elastomer with Robust, Self-Healing, Shape Memory, and Reconfigurable Properties. *ACS Applied Materials and Interfaces*, American Chemical Society, **14**, 1929–1939. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.1C19595/SUPPL_FILE/AM1C19595_SI_004.MP4.
- 50 Dzhardimalieva, G.I., Yadav, B.C., Singh, S. and Uflyand, I.E. (2020) Self-Healing and Shape Memory Metallopolymers: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Dalton Transactions*, The Royal Society of Chemistry, **49**, 3042–3087. <https://doi.org/10.1039/C9DT04360H>.
- 51 Bhanushali, H., Amrutkar, S., Mestry, S. and Mhaske, S.T. (2021) Shape Memory Polymer Nanocomposite: A Review on Structure–Property Relationship. *Polymer Bulletin 2021 79:6*, Springer, **79**, 3437–3493. <https://doi.org/10.1007/S00289-021-03686-X>.
- 52 Namathoti, S., Ravindra, R. kumar and Rama, R.S. (2022) A Review on Progress in Magnetic, Microwave, Ultrasonic Responsive Shape-Memory Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **56**, 1182–1191. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.11.151>.
- 53 Liu, Y., Huang, J., Zhou, J., Wang, Y., Cao, L. and Chen, Y. (2020) Influence of Selective Distribution of SiO₂ Nanoparticles on Shape Memory Behavior of Co-Continuous PLA/NR/SiO₂ TPVs. *Materials Chemistry and Physics*, Elsevier, **242**, 122538. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2019.122538>.
- 54 Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Perez, L.E., Guadarrama-Lezama, A.Y., Briones, R., Vivanco, J.F. and Gonzalez-Torre, I. (2020) Microencapsulated Bio-Based Rejuvenators for the Self-Healing of Bituminous Materials. *Materials 2020, Vol. 13, Page 1446*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 1446. <https://doi.org/10.3390/MA13061446>.
- 55 Zamal, H.H., Barba, D., Aïssa, B., Haddad, E. and Rosei, F. (2020) Recovery of Electro-Mechanical Properties inside Self-Healing Composites through Microencapsulation of Carbon Nanotubes. *Scientific Reports 2020 10:1*, Nature Publishing Group, **10**, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59725-6>.
- 56 Zhang, C., Guan, X., Chen, X., Liu, C., Li, J. and Huo, Y. (2024) Effect of Self-Healing Behavior and Self-Healing Technologies on the Structural Characteristics of Cracked RC/ECC Composite Beams. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **411**, 134575. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134575>.
- 57 Gujar, J., Patil, S. and Sonawane, S. (2023) Review on the Encapsulation, Microencapsulation, and Nano- Encapsulation: Synthesis and Applications in the Process Industry for Corrosion Inhibition. *Current Nanoscience*, Bentham Science Publishers Ltd., **20**, 314–327. <https://doi.org/10.2174/1573413719666230223142832>.
- 58 Mo, C., Xiang, L. and Chen, Y. (2021) Advances in Injectable and Self-Healing Polysaccharide Hydrogel Based on the Schiff Base Reaction. *Macromolecular Rapid Communications*, John Wiley & Sons, Ltd, **42**, 2100025. <https://doi.org/10.1002/MARC.202100025>.
- 59 Shang, X., Wang, Q., Li, J., Zhang, G., Zhang, J., Liu, P. and Wang, L. (2021) Double-Network Hydrogels with Superior Self-Healing Properties Using Starch Reinforcing Strategy. *Carbohydrate Polymers*, Elsevier, **257**, 117626. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2021.117626>.
- 60 Xue, C., Li, W., Qu, F., Sun, Z. and Shah, S.P. (2020) Self-Healing Efficiency and Crack Closure of Smart Cementitious Composite with Crystalline Admixture and Structural Polyurethane. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **260**, 119955. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119955>.
- 61 Lopes, P.A., Santos, B.C., de Almeida, A.T. and Tavakoli, M. (2021) Reversible Polymer-Gel Transition for Ultra-Stretchable Chip-Integrated Circuits through Self-Soldering and Self-Coating and Self-Healing. *Nature Communications 2021 12:1*, Nature Publishing Group, **12**, 1–10.

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10



- <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25008-5>.
- 62 Mohammadi, M.R., Loos, S., Chernev, P., Pasquini, C., Zaharieva, I., González-Flores, D., Kubella, P., Klingan, K., Smith, R.D.L. and Dau, H. (2020) Exploring the Limits of Self-Repair in Cobalt Oxide Films for Electrocatalytic Water Oxidation. *ACS Catalysis*, American Chemical Society, **10**, 7990–7999. https://doi.org/10.1021/ACSCATAL.0C01944/SUPPL_FILE/CS0C01944_SI_001.PDF.
- 63 Zhang, G.R., Shen, L.L., Schmatz, P., Krois, K. and Etzold, B.J.M. (2020) Cathodic Activated Stainless Steel Mesh as a Highly Active Electrocatalyst for the Oxygen Evolution Reaction with Self-Healing Possibility. *Journal of Energy Chemistry*, Elsevier, **49**, 153–160. <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2020.01.025>.
- 64 Hou, Y., Wang, F., Qin, C., Wu, S., Cao, M., Yang, P., Huang, L. and Wu, Y. (2022) A Self-Healing Electrocatalytic System via Electrohydrodynamics Induced Evolution in Liquid Metal. *Nature Communications* 2022 13:1, Nature Publishing Group, **13**, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35416-w>.
- 65 Feng, C., Wang, F., Liu, Z., Nakabayashi, M., Xiao, Y., Zeng, Q., Fu, J., Wu, Q., Cui, C., Han, Y., Shibata, N., Domen, K., Sharp, I.D. and Li, Y. (2021) A Self-Healing Catalyst for Electrocatalytic and Photoelectrochemical Oxygen Evolution in Highly Alkaline Conditions. *Nature Communications* 2021 12:1, Nature Publishing Group, **12**, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26281-0>.
- 66 Qi, M., Yang, R., Wang, Z., Liu, Y., Zhang, Q., He, B., Li, K., Yang, Q., Wei, L., Pan, C., Chen, M., Qi, M., Yang, R., Yang, Q., Chen, M., Wang, Z., Liu, Y., He, B., Wei, L., Zhang, Q., Pan, C. and Li, K. (2023) Bioinspired Self-Healing Soft Electronics. *Advanced Functional Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **33**, 2214479. <https://doi.org/10.1002/ADFM.202214479>.
- 67 Zhong, Y., Li, P., Hao, J. and Wang, X. (2020) Bioinspired Self-Healing of Kinetically Inert Hydrogels Mediated by Chemical Nutrient Supply. *ACS Applied Materials and Interfaces*, American Chemical Society, **12**, 6471–6478. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.9B20445/SUPPL_FILE/AM9B20445_SI_003.AVI.
- 68 Hu, P., Xie, R., Xie, Q., Ma, C. and Zhang, G. (2022) Simultaneous Realization of Antifouling, Self-Healing, and Strong Substrate Adhesion via a Bioinspired Self-Stratification Strategy. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **449**, 137875. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.137875>.
- 69 Yang, J., Zhao, D., Yao, D., Wang, Y. and Li, H. (2021) Self-Healable Luminescent Materials via a Supramolecular Self-Assembly Design. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **426**, 131595. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.131595>.
- 70 Sinawang, G., Osaki, M., Takashima, Y., Yamaguchi, H. and Harada, A. (2020) Supramolecular Self-Healing Materials from Non-Covalent Cross-Linking Host–Guest Interactions. *Chemical Communications*, The Royal Society of Chemistry, **56**, 4381–4395. <https://doi.org/10.1039/D0CC00672F>.
- 71 Sikder, A., Esen, C. and O'Reilly, R.K. (2022) Nucleobase-Interaction-Directed Biomimetic Supramolecular Self-Assembly. *Accounts of Chemical Research*, American Chemical Society, **55**, 1609–1619. https://doi.org/10.1021/ACS.ACCOUNTS.2C00135/ASSET/IMAGES/LARGE/AR2C00135_0009.JPEG.
- 72 Xu, J., Wang, X., Zhang, X., Zhang, Y., Yang, Z., Li, S., Tao, L., Wang, Q. and Wang, T. (2023) Room-Temperature Self-Healing Supramolecular Polyurethanes Based on the Synergistic Strengthening of Biomimetic Hierarchical Hydrogen-Bonding Interactions and Coordination Bonds. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **451**, 138673. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.138673>.
- 73 Ahmed, F., Muzammal Hussain, M., Ullah Khan, W. and Xiong, H. (2024) Exploring Recent Advancements and Future Prospects on Coordination Self-Assembly of the Regulated Lanthanide-Doped Luminescent Supramolecular Hydrogels. *Coordination Chemistry Reviews*, Elsevier, **499**, 215486. <https://doi.org/10.1016/J.CCR.2023.215486>.
- 74 Barhoum, A., García-Betancourt, M.L., Jeevanandam, J., Hussien, E.A., Mekkawy, S.A., Mostafa, M., Omran, M.M., Abdalla, M.S. and Bechelany, M. (2022) Review on Natural, Incidental, Bioinspired, and Engineered Nanomaterials: History, Definitions, Classifications, Synthesis, Properties, Market, Toxicities, Risks, and Regulations. *Nanomaterials* 2022, Vol. 12, Page 177, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **12**, 177. <https://doi.org/10.3390/NANO12020177>.
- 75 Mingear, J., Farrell, Z., Hartl, D. and Tabor, C. (2021) Gallium–Indium Nanoparticles as Phase

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10



- Change Material Additives for Tunable Thermal Fluids. *Nanoscale*, The Royal Society of Chemistry, **13**, 730–738. <https://doi.org/10.1039/D0NR06526A>.
- 76 Yu, J., Shang, Q., Zhang, M., Hu, L., Jia, P. and Zhou, Y. (2024) Tung Oil-Based Waterborne UV-Curable Coatings via Cellulose Nanofibril Stabilized Pickering Emulsions for Self-Healing and Anticorrosion Application. *International Journal of Biological Macromolecules*, Elsevier, **256**, 128114. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.128114>.
- 77 Davoodi, S., Al-Shargabi, M., Wood, D.A. and Rukavishnikov, V.S. (2024) Recent Advances in Polymers as Additives for Wellbore Cementing Applications: A Review. *Fuel*, Elsevier, **357**, 129692. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.129692>.
- 78 Habib, S., Fayyad, E., Nawaz, M., Khan, A., Shakoor, R.A., Kahraman, R. and Abdullah, A. (2020) Cerium Dioxide Nanoparticles as Smart Carriers for Self-Healing Coatings. *Nanomaterials 2020*, Vol. 10, Page 791, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **10**, 791. <https://doi.org/10.3390/NANO10040791>.
- 79 Idumah, C.I., Obele, C.M., Emmanuel, E.O. and Hassan, A. (2020) Recently Emerging Nanotechnological Advancements in Polymer Nanocomposite Coatings for Anti-Corrosion, Anti-Fouling and Self-Healing. *Surfaces and Interfaces*, Elsevier, **21**, 100734. <https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2020.100734>.
- 80 Das, P.P., Chaudhary, V., Ahmad, F. and Manral, A. (2021) Effect of Nanotoxicity and Enhancement in Performance of Polymer Composites Using Nanofillers: A State-of-the-Art Review. *Polymer Composites*, John Wiley & Sons, Ltd, **42**, 2152–2170. <https://doi.org/10.1002/PC.25968>.
- 81 Ahire, S.A., Bachhav, A.A., Pawar, T.B., Jagdale, B.S., Patil, A.V. and Koli, P.B. (2022) The Augmentation of Nanotechnology Era: A Concise Review on Fundamental Concepts of Nanotechnology and Applications in Material Science and Technology. *Results in Chemistry*, Elsevier, **4**, 100633. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2022.100633>.
- 82 Formoso, I., Shegokar, R., Zielinska, A., Eder, P., Silva, A.M. and Souto, E.B. (2023) Progress of Nanotechnology in the Development of Medicines. *Nanotechnology and Regenerative Medicine: History, Techniques, Frontiers, and Applications*, Academic Press, 1–21. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90471-1.00001-3>.
- 83 Tang, Y. and Xu, J. (2021) Application of Microbial Precipitation in Self-Healing Concrete: A Review on the Protection Strategies for Bacteria. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **306**, 124950. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124950>.
- 84 Smirnov, M.A., Nikolaeva, A.L., Bobrova, N. V., Vorobiov, V.K., Smirnov, A. V., Lahderanta, E. and Sokolova, M.P. (2021) Self-Healing Films Based on Chitosan Containing Citric Acid/Choline Chloride Deep Eutectic Solvent. *Polymer Testing*, Elsevier, **97**, 107156. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2021.107156>.
- 85 Puzder, A., Williamson, A.J., Gygi, F. and Galli, G. (2004) Self-Healing of CdSe Nanocrystals: First-Principles Calculations. *Physical Review Letters*, American Physical Society, **92**, 217401. <https://doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.92.217401/FIGURES/3/MEDIUM>.
- 86 Borisova, D., Akçakayiran, D., Schenderlein, M., Möhwald, H. and Shchukin, D.G. (2013) Nanocontainer-Based Anticorrosive Coatings: Effect of the Container Size on the Self-Healing Performance. *Advanced Functional Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **23**, 3799–3812. <https://doi.org/10.1002/ADFM.201203715>.
- 87 Jeong, H.J., Kim, M.J., Choi, S.J., Park, J.W., Choi, H., Luu, V.T., Hong, S.T. and Han, H.N. (2020) Microstructure Reset-Based Self-Healing Method Using Sub-Second Electric Pulsing for Metallic Materials. *Applied Materials Today*, Elsevier, **20**, 100755. <https://doi.org/10.1016/J.APMT.2020.100755>.
- 88 Zhang, H., Han, D., Yan, Q., Fortin, D., Xia, H. and Zhao, Y. (2014) Light-Healable Hard Hydrogels through Photothermally Induced Melting–Crystallization Phase Transition. *Journal of Materials Chemistry A*, The Royal Society of Chemistry, **2**, 13373–13379. <https://doi.org/10.1039/C4TA02463J>.
- 89 Du, X., Jin, L., Deng, S., Zhou, M., Du, Z., Cheng, X. and Wang, H. (2021) Recyclable, Self-Healing, and Flame-Retardant Solid-Solid Phase Change Materials Based on Thermally Reversible Cross-Links for Sustainable Thermal Energy Storage. *ACS Applied Materials and Interfaces*, American Chemical Society, **13**, 42991–43001. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.1C14862/SUPPL_FILE/AM1C14862_SI_001.PDF.
- 90 Guo, S., Yun, H., Nair, S., Jalan, B. and Mkhoyan, K.A. (2023) Self-Healing Crystallization via

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10



- Radiolysis-Driven Constructive Twist in Rutile-TiO₂. *Microscopy and Microanalysis*, Oxford Academic, **29**, 1790–1791. <https://doi.org/10.1093/MICMIC/OZAD067.926>.
- 91 Zhou, G., Gu, Q., Sun, H., Zhou, K., Yu, S., Zhou, K., Han, F., Peng, W., Zhong, Z. and Xing, W. (2024) High-Temperature Self-Healing Behavior of Reaction-Bonded Silicon Carbide Porous Ceramic Membrane Supports. *Journal of the European Ceramic Society*, Elsevier, **44**, 1959–1971. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2023.11.065>.
- 92 Xu, J., Peng, C., Wan, L., Wu, Q. and She, W. (2020) Effect of Crack Self-Healing on Concrete Diffusivity: Mesoscale Dynamics Simulation Study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, **32**, 04020149. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003214).
- 93 Zhang, W., Jiang, H., Chang, Z., Wu, W., Wu, G., Wu, R. and Li, J. (2020) Recent Achievements in Self-Healing Materials Based on Ionic Liquids: A Review. *Journal of Materials Science*, Springer, **55**, 13543–13558. <https://doi.org/10.1007/S10853-020-04981-0/FIGURES/13>.
- 94 Hai, M., Zhang, Q., Li, Z., Cheng, M., Kuehne, A.J.C. and Shi, F. (2022) Visualizing Polymer Diffusion in Hydrogel Self-Healing. *Supramolecular Materials*, Elsevier, **1**, 100009. <https://doi.org/10.1016/J.SUPMAT.2022.100009>.
- 95 Ma, H., Lv, F., Shen, L., Yang, K., Jiang, Y., Ma, J., Geng, X., Sun, T., Pan, Y., Xie, Z., Xue, M. and Zhu, N. (2022) Self-Healing All-in-One Energy Storage for Flexible Self-Powering Ammonia Smartsensors. *Energy & Environmental Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **5**, 986–995. <https://doi.org/10.1002/EEM2.12227>.
- 96 Jouyandeh, M., Tikhani, F., Hampp, N., Akbarzadeh Yazdi, D., Zarrintaj, P., Reza Ganjali, M. and Reza Saeb, M. (2020) Highly Curable Self-Healing Vitrimer-like Cellulose-Modified Halloysite Nanotube/Epoxy Nanocomposite Coatings. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **396**, 125196. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.125196>.
- 97 Kumar, R., Liu, Z., Lokitz, B., Chen, J., Carrillo, J.M., Jakowski, J., Collier, C.P., Retterer, S. and Advincula, R. (2021) Harnessing Autocatalytic Reactions in Polymerization and Depolymerization. *MRS Communications 2021 11:4*, Springer, **11**, 377–390. <https://doi.org/10.1557/S43579-021-00061-9>.
- 98 Shabani, P. and Shokrieh, M.M. (2023) Modeling of Crack Self-Healing in Thermally Remendable Fiber-Reinforced Composites. *Engineering Materials*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 239–276. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6038-3_9/FIGURES/26.
- 99 Guerra, É.S.S., Silva, B.L., Melo, J.D.D., Kalinka, G. and Barbosa, A.P.C. (2023) Microscale Evaluation of Epoxy Matrix Composites Containing Thermoplastic Healing Agent. *Composites Science and Technology*, Elsevier, **232**, 109843. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2022.109843>.
- 100 Liu, J., Wang, F., Zhao, Q. and Liu, Y. (2023) Multifunctional Conductive Hydrogels Based on the Alkali Lignin-Fe³⁺-Mediated Fenton Reaction for Bioelectronics. *International Journal of Biological Macromolecules*, Elsevier, **235**, 123817. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.123817>.
- 101 Wang, R., Yu, F., Feng, H., Yan, Z., Xiao, L. and Zhu, W. (2023) Preparation of Two-Component Micro-Encapsulated Epoxy Self-Healing Materials Based on Pickering Emulsion Method. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **140**, e54350. <https://doi.org/10.1002/APP.54350>.
- 102 Qi, X., Zhang, J., Zhang, L. and Yue, D. (2021) Bio-Based, Robust, Shape Memory, Self-Healing and Recyclable Elastomers Based on a Semi-Interpenetrating Dynamic Network. *Journal of Materials Chemistry A*, The Royal Society of Chemistry, **9**, 25399–25407. <https://doi.org/10.1039/D1TA06299A>.
- 103 Chen, W., Han, C., Xie, Y., Lin, B. and Cui, S. (2023) Evaluation of Compression Self-Healing Performance of a Smart Cementitious Composite SMA-ECC. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **409**, 133917. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133917>.
- 104 Li, Y., Wu, S., Dai, Y., Li, C., Song, W., Li, H., Li, C. and Shu, B. (2020) Transitions of Component, Physical, Rheological and Self-Healing Properties of Petroleum Bitumen from the Loose Bituminous Mixture after UV Irradiation. *Fuel*, Elsevier, **262**, 116507. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.116507>.
- 105 Wang, H., Liu, X., Gu, Q. and Zheng, X. (2023) Vascularized Organ Bioprinting: From Strategy to Paradigm. *Cell Proliferation*, John Wiley & Sons, Ltd, **56**, e13453. <https://doi.org/10.1111/CPR.13453>.
- 106 Chaudhary, K. and Kandasubramanian, B. (2022) Self-Healing Nanofibers for Engineering

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10



- Applications. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, American Chemical Society, **61**, 3789–3816. https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.1C04602/SUPPL_FILE/IE1C04602_SI_001.PDF.
- 107 Chen, Y., Zhang, M., Chen, L., Pan, M., Qin, M., Guo, Y., Zhang, Y., Pan, H. and Zhou, Y. (2022) Self-Organization of Zinc Ions with a Photosensitizer in Vivo for Enhanced Antibiofilm and Infected Wound Healing. *Nanoscale*, The Royal Society of Chemistry, **14**, 7837–7848. <https://doi.org/10.1039/D2NR01404A>.
- 108 Brassard, J.A., Nikolaev, M., Hübscher, T., Hofer, M. and Lutolf, M.P. (2020) Recapitulating Macro-Scale Tissue Self-Organization through Organoid Bioprinting. *Nature Materials* **20**:1, Nature Publishing Group, **20**, 22–29. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00803-5>.
- 109 Yu, Z., Yang, Y., Wang, C., Shi, G., Xie, J., Gao, B., Li, Y.C., Wan, Y., Cheng, D., Shen, T., Hou, S., Zhang, S., Ma, X., Yao, Y., Tang, Y. and Chen, J. (2021) Nano-Soy-Protein Microcapsule-Enabled Self-Healing Biopolyurethane-Coated Controlled-Release Fertilizer: Preparation, Performance, and Mechanism. *Materials Today Chemistry*, Elsevier, **20**, 100413. <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2020.100413>.
- 110 Zhang, S., Zhang, S., Zhang, S., Yang, Y., Yang, Y., Tong, Z., Gao, B., Gao, N., Shen, T., Wan, Y., Yu, Z., Liu, L., Ma, X., Guo, Y., Fugice, J. and Li, Y.C. (2020) Self-Assembly of Hydrophobic and Self-Healing Bionanocomposite-Coated Controlled-Release Fertilizers. *ACS Applied Materials and Interfaces*, American Chemical Society, **12**, 27598–27606. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.0C06530/SUPPL_FILE/AM0C06530_SI_001.PDF.
- 111 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>.
- 112 Pan, R., Liu, G., Zeng, Y., He, X., Ma, Z., Wei, Y., Chen, S., Yang, L. and Tao, L. (2021) A Multi-Responsive Self-Healing Hydrogel for Controlled Release of Curcumin. *Polymer Chemistry*, The Royal Society of Chemistry, **12**, 2457–2463. <https://doi.org/10.1039/D1PY00176K>.
- 113 Yang, C., Xu, W., Meng, X., Shi, X., Shao, L., Zeng, X., Yang, Z., Li, S., Liu, Y. and Xia, X. (2021) A PH-Responsive Hydrophilic Controlled Release System Based on ZIF-8 for Self-Healing Anticorrosion Application. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **415**, 128985. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.128985>.
- 114 Kong, Y., Hou, Z., Zhou, L., Zhang, P., Ouyang, Y., Wang, P., Chen, Y. and Luo, X. (2021) Injectable Self-Healing Hydrogels Containing CuS Nanoparticles with Abilities of Hemostasis, Antibacterial Activity, and Promoting Wound Healing. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, American Chemical Society, **7**, 335–349. https://doi.org/10.1021/ACSBIMATERIALS.0C01473/SUPPL_FILE/AB0C01473_SI_001.PDF.
- 115 Panahi, P., Khorasani, S.N., Mensah, R.A., Das, O. and Neisiany, R.E. (2024) A Review of the Characterization Methods for Self-Healing Assessment in Polymeric Coatings. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **186**, 108055. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2023.108055>.
- 116 Feng, H., Wang, T., Cao, L., Pu, Y., Zhao, Z. and Chen, S. (2024) Recent Achievements and Applications of Photothermal Self-Healing Coatings: A Review. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **187**, 108153. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2023.108153>.
- 117 Wang, C., Wu, S. and Weng, J. (2024) Integrating with a Tough Framework and Efficient Self-Healing Behavior Based on a Flexible Polymer Skeleton for Si Anode Binders in Lithium-Ion Cells. *Journal of Energy Storage*, Elsevier, **80**, 110314. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.110314>.
- 118 Ding, X., Yu, Y., Li, W., Bian, F., Gu, H. and Zhao, Y. (2024) Multifunctional Carbon Nanotube Hydrogels with On-Demand Removability for Wearable Electronics. *Nano Today*, Elsevier, **54**, 102124. <https://doi.org/10.1016/J.NANTOD.2023.102124>.
- 119 Wong, L.W., Pasbakhsh, P., Cheng, W.T., Goh, C.B.S. and Tan, J.B.L. (2023) One-Pot Synthesis of Injectable Self-Healing Thermoresponsive Halloysite Nanotube-Reinforced Nanocomposite Hydrogels for Tissue Engineering. *Applied Clay Science*, Elsevier, **232**, 106812. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2022.106812>.
- 120 Saddique, A., Kim, J.C., Bae, J. and Cheong, I.W. (2024) Low-Temperature, Ultra-Fast, and Recyclable Self-Healing Nanocomposites Reinforced with Non-Solvent Silylated Modified Cellulose Nanocrystals. *International Journal of Biological Macromolecules*, Elsevier, **254**, 127984. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.127984>.
- 121 Li, C., Hou, Z., Li, P., Zhang, G., Bai, L., Wang, W., Chen, H., Yang, H. and Yang, L. (2023) Phytic Acid-Assist for Self-Healing Nanocomposite Hydrogels with Surface Functionalization of Cellulose Nanocrystals via SI-AGET ATRP. *Cellulose*, Springer Science and Business Media B.V., **30**,

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10



- 1087–1102. <https://doi.org/10.1007/S10570-022-04936-5/FIGURES/8>.
- 122 Li, H., Zhou, J., Yu, J. and Zhao, J. (2023) Light-Activated Cellulose Nanocrystals/Fluorinated Polyacrylate-Based Waterborne Coating: Facile Preparation, Mechanical and Self-Healing Behavior. *International Journal of Biological Macromolecules*, Elsevier, **249**, 126062. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.126062>.
- 123 Liang, F.-C., Jhuang, F.-C., Fang, Y.-H., Benas, J.-S., Chen, W.-C., Yan, Z.-L., Lin, W.-C., Su, C.-J., Sato, Y., Chiba, T., Kido, J., Kuo, C.-C., Liang, F.-C., Jhuang, F.-C., Fang, Y.-H., Benas, J.-S., Chen, W.-C., Yan, Z.-L., Lin, W.-C., Kuo, C.-C., Su, C.-J., Sato, Y., Chiba, T. and Kido, J. (2023) Synergistic Effect of Cation Composition Engineering of Hybrid Cs_{1-x}F_xPbBr₃ Nanocrystals for Self-Healing Electronics Application. *Advanced Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **35**, 2207617. <https://doi.org/10.1002/ADMA.202207617>.
- 124 Zheng, Y., Cui, T., Wang, J., Ge, H. and Gui, Z. (2023) Unveiling Innovative Design of Customizable Adhesive Flexible Devices from Self-Healing Ionogels with Robust Adhesion and Sustainability. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **471**, 144617. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.144617>.
- 125 Xiong, C., Yang, Q., Dang, W., Zhou, Q., Jiang, X., Sun, X., Wang, Z., An, M. and Ni, Y. (2023) A Multifunctional Paper-Based Supercapacitor with Excellent Temperature Adaptability, Plasticity, Tensile Strength, Self-Healing, and High Thermoelectric Effects. *Journal of Materials Chemistry A*, The Royal Society of Chemistry, **11**, 4769–4779. <https://doi.org/10.1039/D2TA09654D>.
- 126 Wang, X., He, Q., Huang, Y., Song, Q., Zhang, X. and Xing, F. (2023) Mechanical Characteristics of Fiber-Reinforced Microcapsule Self-Healing Cementitious Composites by Orthogonal Tests. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **383**, 131377. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131377>.
- 127 Yin, J., Pan, S., Wu, L., Tan, L., Chen, D., Huang, S., Zhang, Y. and He, P. (2020) A Self-Adhesive Wearable Strain Sensor Based on a Highly Stretchable, Tough, Self-Healing and Ultra-Sensitive Ionic Hydrogel. *Journal of Materials Chemistry C*, The Royal Society of Chemistry, **8**, 17349–17364. <https://doi.org/10.1039/D0TC04144K>.
- 128 Ji, X., Wang, W., Zhao, X., Wang, L., Ma, F., Wang, Y., Duan, J. and Hou, B. (2022) Poly(Dimethyl Siloxane) Anti-Corrosion Coating with Wide PH-Responsive and Self-Healing Performance Based on Core-shell Nanofiber Containers. *Journal of Materials Science & Technology*, Elsevier, **101**, 128–145. <https://doi.org/10.1016/J.JMST.2021.06.014>.
- 129 Song, X., Wang, X., Zhang, J., Shen, S., Yin, W., Ye, G., Wang, L., Hou, H. and Qiu, X. (2021) A Tunable Self-Healing Ionic Hydrogel with Microscopic Homogeneous Conductivity as a Cardiac Patch for Myocardial Infarction Repair. *Biomaterials*, Elsevier, **273**, 120811. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2021.120811>.
- 130 Cheng, Y., Liu, X., Guan, Z., Li, M., Zeng, Z., Li, H.-W., Tsang, S.-W., Aberle, A.G., Lin, F., Cheng, Y., Li, H.-W., Aberle, A.G., Lin, F., Liu, X., Guan, Z., Li, M., Zeng, Z. and Tsang, S.-W. (2021) Revealing the Degradation and Self-Healing Mechanisms in Perovskite Solar Cells by Sub-Bandgap External Quantum Efficiency Spectroscopy. *Advanced Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, **33**, 2006170. <https://doi.org/10.1002/ADMA.202006170>.
- 131 Zhang, S., Cizek, J., Yao, Z., Oleksandr, M., Kong, X., Liu, C., van Dijk, N. and van der Zwaag, S. (2020) Self Healing of Radiation-Induced Damage in Fe–Au and Fe–Cu Alloys: Combining Positron Annihilation Spectroscopy with TEM and Ab Initio Calculations. *Journal of Alloys and Compounds*, Elsevier, **817**, 152765. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2019.152765>.
- 132 Ren, J., Zhang, J., Wang, X., Li, D., Han, N. and Xing, F. (2020) Electrochemical Impedance Spectroscopy: A Potential Approach for Detecting the Breakage Rate of Microcapsules for Self-Healing Cementitious Materials. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **114**, 103776. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103776>.
- 133 Guadagno, L., Raimondo, M., Longo, R., Aliberti, F., Passaro, J., Piccirillo, A. and Calabrese, E. (2023) Spectroscopic Investigation of Supramolecular Self-Healing Resins Based on Covalently Modified Carbon Nanotubes. *Macromolecular Symposia*, John Wiley & Sons, Ltd, **411**, 2200157. <https://doi.org/10.1002/MASY.202200157>.
- 134 Ren, Y., Abbas, N., Zhu, G. and Tang, J. (2020) Synthesis and Mechanical Properties of Large Size Silica Shell Microcapsules for Self-Healing Cementitious Materials. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Elsevier, **587**, 124347. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2019.124347>.
- 135 Pulikkalparambil, H., Parameswaranpillai, J., Pionteck, J., Nandi, D. and Siengchin, S. (2023)

Vafaeva, K.M.; Zegait, R.; Shah, M.

Nanostructures in Self-Healing Composites: Analyzing the Influence of Particle Size on Restorative Properties 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2910. doi: 10.57728/ALF.29.10



- Autonomous Self-Healing in Green Epoxy Thermosets for Flexible Functional Coatings. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **393**, 132090. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132090>.
- 136 Qiu, K., Hou, J., Chen, S., Li, X., Yue, Y., Xu, B., Hu, Q., Liu, L., Yang, Z., Nie, A., Gao, Y., Jin, T., Wang, J., Li, Y., Wang, Y., Tian, Y. and Guo, L. (2023) Self-Healing of Fractured Diamond. *Nature Materials* 2023 22:11, Nature Publishing Group, **22**, 1317–1323. <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01656-4>.
- 137 Chen, H., Wu, Z., Su, Z., Chen, S., Yan, C., Al-Mamun, M., Tang, Y. and Zhang, S. (2021) A Mechanically Robust Self-Healing Binder for Silicon Anode in Lithium Ion Batteries. *Nano Energy*, Elsevier, **81**, 105654. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2020.105654>.
- 138 Lin, C., Ying, P., Huang, M., Zhang, P., Yang, T., Liu, G., Wang, T., Wu, J. and Levchenko, V. (2021) Synthesis of Robust and Self-Healing Polyurethane/Halloysite Coating via in-Situ Polymerization. *Journal of Polymer Research*, Springer Science and Business Media B.V., **28**, 1–9. <https://doi.org/10.1007/S10965-021-02742-4/FIGURES/6>.