This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Review Article
Received: October 22, 2023 *Accepted: December 1, 2023* *Published: December 11, 2023*
ISSN 2658-5553

Fractal aspects in the technology of self-healing materials

Vafaeva, Khristina Maksudovna[1*]
Júnior, José Francisco de Oliveira[2]
Pizzo, Henrique da Silva[3]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; vafaeva.khm@gmail.com
[2] Federal University of Alagoas, Maceió, Brazil; jose.junior@icat.ufal.br
[3] Department of Hydraulic Measurements and Control of the Municipal Sanitation Company of Juiz de Fora, Minas Gerais, Brazil; henriquepizzo.estacio@gmail.com
Correspondence:* email vafaeva.khm@gmail.com;

Keywords:

Fractal; Self-healing materials; Nanotechnology; Smart materials; Structural longevity; Bioinspired; Sustainability; Innovative materials; Material durability; Technology

Abstract:

The object of research is fractal aspects in the technology of self-healing materials. This work aims to comprehensively scrutinize the role of fractal structures in enhancing self-healing capabilities, evaluating their effectiveness across various materials, and discerning their implications for innovative material applications. **Method.** This study employs a critical and comparative methodology to investigate the incorporation of fractal characteristics in self-healing materials. It analyzes their potential by considering diverse fractal-based systems and assessing their strengths, limitations, and applicability in different technological contexts. The study also explores how fractal patterns contribute to intrinsic healing mechanisms, fostering a deeper understanding of their role in material durability. **Results.** The findings reveal that integrating fractal aspects into the technology of self-healing materials holds considerable promise. Fractal structures contribute to improved healing efficiencies and offer opportunities for creating innovative and sustainable materials. The discussion extends to the application of nanotechnology, examining how it can synergize with fractal designs to introduce new functionalities and further enhance the overall performance of self-healing materials. The study highlights the potential transformative impact of fractal-enhanced self-healing materials in diverse technological applications, emphasizing their role in advancing material durability, sustainability, and innovation. However, challenges such as optimization and cost considerations necessitate continued research for practically implementing these advancements in real-world scenarios.

1 Introduction

Технологические и научные достижения привели к растущему интересу к разработке материалов, обладающих способностью к самовосстановлению. Самовосстанавливающиеся материалы представляют собой класс инновационных материалов, которые способны автоматически восстанавливать свою форму, структуру или функциональность после повреждений. Это свойство открывает новые перспективы в различных областях применения, таких как строительство [1]–[3], авиация [4]–[6], промышленность [7], [8] и Медицина [9]–[11].

Однако, несмотря на значительные достижения в области самовосстанавливающихся материалов, существуют проблемы, связанные с их производством и применением. Одной из таких проблем является недостаточная долговечность материалов в условиях эксплуатации. Повреждения и износы приводят к снижению эффективности и структурной целостности материалов, что требует замены или ремонта. Это не только связано с высокими затратами, но и

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

с экологическими проблемами, так как процесс производства и утилизации материалов оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

В этом контексте интеграция фрактальных аспектов в идентификацию технологии самовосстанавливающихся материалов представляет собой актуальную и перспективную область исследования.

Взаимосвязь между характеристиками строения реальных материалов и комплексом их физико-механических свойств остается одной из главных задач материаловедения. В работе упоминается, что к примеру, И.В. Тананаев, развивая представления Н.С. Курнакова о фазовых диаграммах и диаграммах состав – свойство, отметил потребность замены триады (состав материала – структура – свойства) на квадригу, в список которой относятся структурные параметры и дисперсность элементов структуры [12]. Подобный подход позволяет учитывать влияние элементов структуры материалов, в том числе и самовосстанавливающихся, на его свойства с целью их уточнения. Однако, трудности в получении подобной количественной оценки заключается в реальном сложном геометрическом строении и очень сложно количественно описаются (к примеру, микроструктуры материалов), что, в итоге, приводит к потере ценной информации о тандеме структура – свойства. В свою очередь это снижает точность моделей, описывающих связь структура-свойства.

Поскольку точного определения понятию фрактала [13] сегодняшний день не существует, то на основании анализа многочисленных фрактальных обзоров можно заключить, что под *фракталами* в материаловедении следует понимать линии, поверхности, тела, которые имеют изрезанную структуру и обладают свойством самоподобия (инвариантности по отношению к масштабу их представления). Фракталы характеризуются фрактальной *D* (дробной размерностью - размерностью Хаусдорфа-Безиковича):

$$D = -\lim_{\delta \to 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta} \tag{1}$$

где $N(\delta)$ количество клеток с линейными размерами δ, которыми покрывают объект исследования. Фрактальный объект имеет размерность меньше, чем размерность пространства, в котором он находится, однако строго больше его топологической размерности [14]. Например, извилистая фрактальная линия (топологическая размерность 1) на плоскости (топологическая размерность 2) может иметь фрактальную размерность, например, 1.32.

Фракталы описывают компактность заполнения объектом данного пространства. Фрактальная геометрия, основанная на понятии дробности пространства состояния системы, самоподобия и масштабируемости, предоставляет новые возможности для создания материалов, обладающих уникальными свойствами самовосстановления и повышенной долговечности.

Среди широко известных методик расчёта размерности следует отметить рассмотренный клеточный способ (1), точечный способ, способы “массовой” размерности, размерности периметр, размерности, определяемой с помощью малоуглового рентгеновского рассеяния [14].

Фрактальные аспекты могут быть интегрированы в самовосстанавливающиеся материалы на различных уровнях, начиная от наноструктур и поверхностей материалов до архитектуры его внутренней структуры. Фрактальные структуры обладают множеством преимуществ, таких как увеличение контактной поверхности за счет ее сложной формы, которая может характеризоваться улучшенными механическими свойствами и устойчивостью к повреждениям.

Однако, несмотря на потенциал фрактальных аспектов в области самовосстанавливающихся материалов, до сих пор существует ограниченное количество исследований, посвященных этой теме. Необходимо подробное изучение методов интеграции фрактальных структур и определение оптимальных условий для достижения максимальных выгод и эффективности. Поэтому проведение данного исследования направлено на оценку потенциала фрактальных аспектов в технологии самовосстанавливающихся материалов, что позволит глубже понять особенности и перспективы развития данного класса материалов, а также выявить возможности и вызовы, с которыми сталкиваются исследователи и инженеры в данной области.

При проведении предварительного исследования литературы, обнаружено, что хотя существует некоторое количество обзорных статей на тему самовосстанавливающихся материалов [15]–[17], описание и анализ интеграции фрактальных аспектов в технологию самовосстанавливающихся материалов остаётся недостаточным. Использование фрактальной геометрии в разработке самовосстанавливающихся материалов представляет собой

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

перспективную область исследований. Однако, несмотря на потенциал, существуют ограничения и пробелы в текущих обзорах. Например, существующие обзоры предоставляют ограниченное представление о методах интеграции фрактальных структур в материалы, острой необходимости в исследованиях оптимальных условий для достижения максимальных результатов, а также об оценке эффективности применения фрактальных аспектов в технологии самовосстанавливающихся материалов.

Проведение дополнительного обзора позволит подробно и всесторонне рассмотреть возможности интеграции фрактальных аспектов в самовосстанавливающиеся материалы, выявить преимущества и ограничения, а также определить направления дальнейших исследований. Такой обзор будет служить основой для разработки новых стратегий проектирования и создания самовосстанавливающихся материалов, с учетом фрактальных аспектов. Таким образом, проведение еще одного обзора является необходимым для получения полной картины о возможностях интеграции фрактальных аспектов в самовосстанавливающиеся материалы, а также для выявления пробелов и ограничений в существующем наборе обзоров. Заключительные выводы и рекомендации, полученные в результате такого обзора, будут полезны для инженеров и исследователей, работающих в области самовосстанавливающихся материалов, и способствуют развитию инновационных и эффективных материалов для различных отраслей промышленности.

Технологии стремятся к созданию интеллектуальных материалов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды. В этом контексте самовосстанавливающиеся материалы с фрактальными аспектами представляют собой уникальную область исследования, обещающую революцию в сфере материаловедения и технологии. Эти материалы, обладающие способностью автономного восстановления, предоставляют новые возможности для создания более долговечных, устойчивых и инновационных конструкций. Потенциал использования таких материалов охватывает широкий спектр отраслей, включая строительство, авиацию, электронику и медицину, предоставляя новые перспективы для решения различных вызовов и задач.

На основании вышеизложенного, целью данного исследования является всестороннее изучение потенциала фрактальных аспектов в технологии самовосстанавливающихся материалов. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- провести обзор существующих исследований самовосстанавливающихся материалов с фрактальными аспектами;
- исследовать влияние фрактальных структур на различные механизмы самовосстановления путем сопоставления фрактальной размерности элементов структуры, которые наиболее влияют на подобные механизмы;
- оценить эффективность фрактальных структур в различных материалах путем поиска взаимосвязи между спектром фрактальных размерностей составляющих (фаз) и физико-механическими свойствами;
- определить потенциальные приложения самовосстанавливающихся материалов с фрактальными аспектами.

Реализация этих задач позволит получить новые знания о свойствах и возможностях самовосстанавливающихся материалов с фрактальными аспектами, а также определить перспективы их применения в различных областях. В рамках данного исследования используется критическая и сравнительная методология для анализа и оценки роли фрактальных структур в самовосстанавливающихся материалах. Критический анализ разных фрактальных систем позволяет определить их преимущества, ограничения и применимость в различных технологических контекстах. В частности, исследование охватывает такие вопросы, как влияние фрактальных особенностей на интегральные механизмы самовосстановления материалов.

Полученные результаты показывают, что интеграция фрактальных аспектов в технологию самовосстанавливающихся материалов обладает значительным потенциалом. Фрактальные структуры способствуют не только улучшению эффективности процессов самовосстановления, но и созданию инновационных и устойчивых материалов. Также рассматривается влияние нанотехнологий на возможности применения фрактальных дизайнов для внедрения новых функциональностей и улучшения общей производительности самовосстанавливающихся материалов. Таким образом, данное исследование подчеркивает потенциальное трансформационное влияние фрактально-усовершенствованных самовосстанавливающихся материалов в различных технологических областях.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

2 Materials and Methods

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

A. Поиск литературы

Был проведен поиск литературы с использованием двух основных источников – библиографической и реферативной базы данных Scopus и поисковой системы Google Scholar. Поиск осуществлялся с использованием сочетания ключевых слов и фраз, тщательно отобранных для полного охвата соответствующей 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	("multiscale self-healing" OR "intrinsic healing" OR "fractal pattern") AND material science	31	без ограничений по датам	выгружены 31
2	(nanotechnology OR functionalized AND material) AND («fractal design" OR "sustainable material»)	209	без ограничений по датам	выгружены 209
3	("challenge" OR "limitation") AND ("fractal self-healing" OR "real-world application")	6 216	без ограничений по датам	выгружены 6 216
4	fractal AND self-healing AND materials	20	без ограничений по датам	выгружены 20
5	(self-healing OR self-repair) AND (fractal OR fractal-like)	38	без ограничений по датам	выгружены 38
6	(self-healing OR self-repair) AND (fractal OR fractal-like) AND (polymer OR composite OR metal OR ceramic OR biological)	17	без ограничений по датам	выгружены 17
7	fractal AND smart AND material	82	без ограничений по датам	выгружены 82
8	fractal AND self AND healing	60	без ограничений по датам	выгружены 60
Итого:		**6 673**	**Выгружено результатов: 6 673**	

B. Извлечение данных

После получения исходных результатов поиска, была произведена выгрузка необходимой информации из базы данных Scopus. Для удобства дальнейшего анализа, данные были экспортированы в формате RIS (Research Information Systems). RIS является широко используемым форматом для обмена библиографическими данными и совместим с различными инструментами анализа данных.

C. Анализ данных на Python

Для проведения анализа данных был использован язык программирования Python и различные библиотеки для работы и анализа данных. Применены популярные библиотеки, такие как Pandas и NumPy, для очистки, преобразования и предварительной обработки данных.

D. Анализ в VOSviewer

Для визуализации и дополнительного анализа данных было использовано программное обеспечение VOSviewer. С его помощью созданы визуальные представления ключевых слов и публикаций из набора данных. Это позволило получить информацию о тематиках исследований, выявить закономерности и взаимосвязи между различными концепциями.

E. Интеграция результатов

Результаты анализа данных, полученные с помощью Python и VOSviewer, были объединены для создания полного представления об исследуемой научной области. Обобщенные результаты

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

позволили выявить основные направления исследований и выделить крупные группы связанных публикаций.

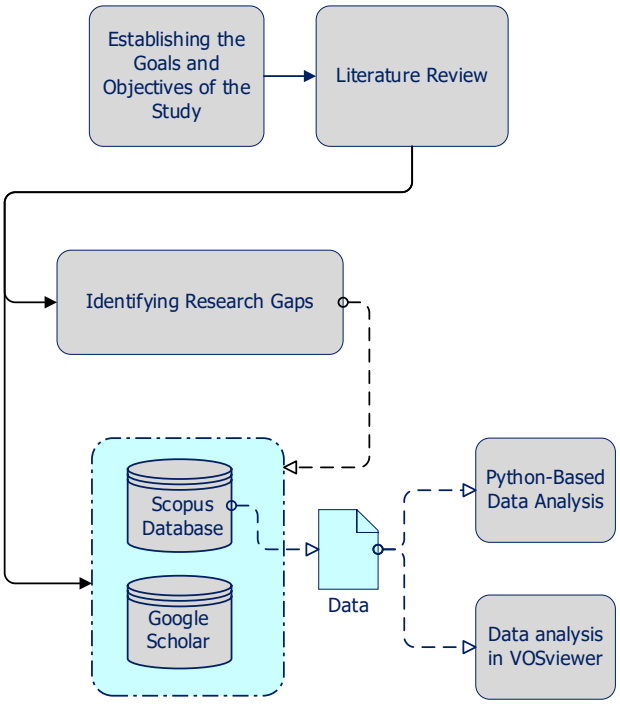

Рис. 1 – Схема методологии
Fig. 1 - Methodology diagram

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

3 Results and Discussion

3.1 Библиометрический анализ литературы

На Рисунке 2 представлен график, показывающий, количество статей, опубликованных с распределением по годам в соответствии с результатами поиска по запросам, указанным в Таблице 1. Анализируя график количества документов по годам, выделяются следующие ключевые точки:

- общий тренд роста: наблюдается устойчивый рост активности исследований с 2011 года, где достигается максимальное количество документов в 2021 году. Этот тренд может указывать на постоянный интерес и активность в области исследований;
- пики активности в 2019 и 2023 годах: в эти годы отмечается резкое увеличение числа документов. Эти периоды могут быть связаны с ключевыми событиями, новыми направлениями исследований или повышенным интересом к определенным темам;
- стабильная активность в 2018–2023 годах: в эти годы количество документов остается на относительно высоком уровне, что может свидетельствовать о стабильной научной активности и интересе к теме;
- ранние годы (1990-е): в начале периода наблюдается небольшое количество документов, что может быть связано с меньшей распространенностью научных публикаций и ограниченным доступом к информации.

Этот анализ предоставляет общее представление о динамике исследовательской активности в выбранной области за последние десятилетия, выделяя периоды роста, спада и стабильности.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

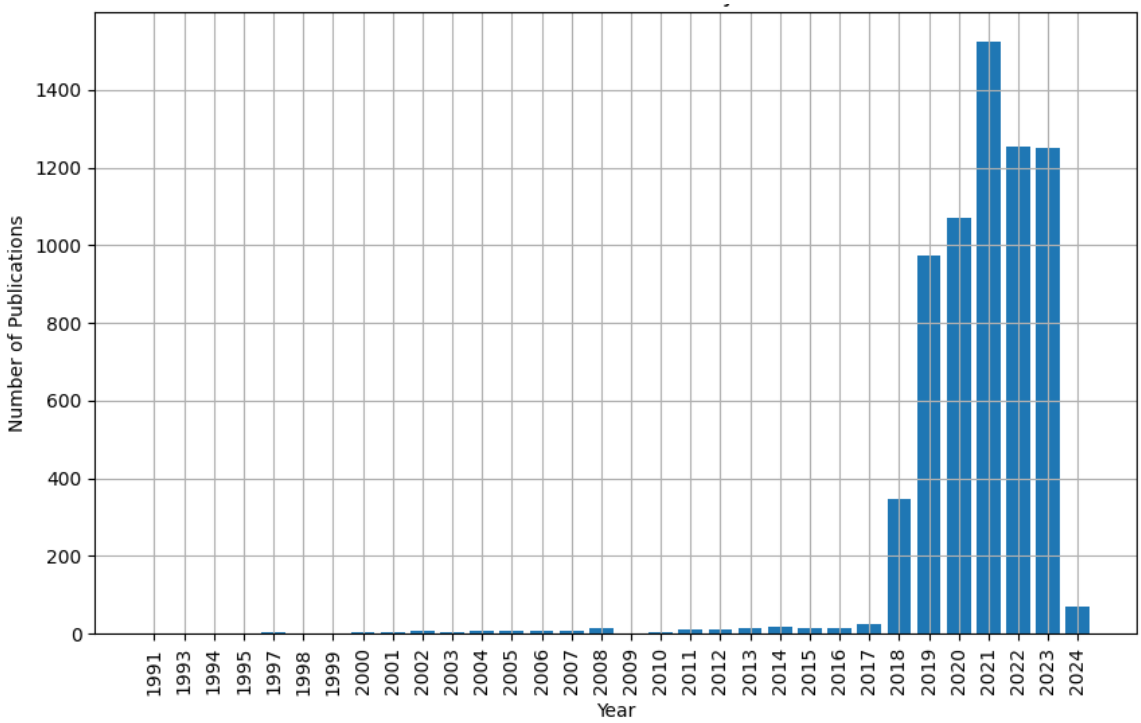

Рис. 2 – Количество публикаций по годам
Fig. 2 - Number of publications by year

Анализируя гистограмму количества документов по странам (Рис. 3), можно выделить следующие ключевые моменты:

- США, Китай и Индия являются тремя самыми активными странами в научных исследованиях с высокими значениями (1929, 1673 и 523 документов соответственно);
- среди лидеров также присутствуют Великобритания, Германия, Франция, Италия, которые демонстрируют значительную активность в научных исследованиях;
- кроме Китая и Индии, Южная Корея, Япония и Гонконг также представлены в топ-10, подчеркивая важность региона Азии в мировых научных исследованиях;
- несмотря на явное лидерство США, видно, что различные страны вносят свой вклад в научную активность, что свидетельствует о многообразии тем и направлений исследований;
- разница в количестве документов между лидерами и остальными странами указывает на неравномерность в распределении научной активности в мировом масштабе.

Этот анализ позволяет легко выделить ключевые участники исследовательской деятельности, а также оценить разнообразие и географическое распределение научных публикаций.

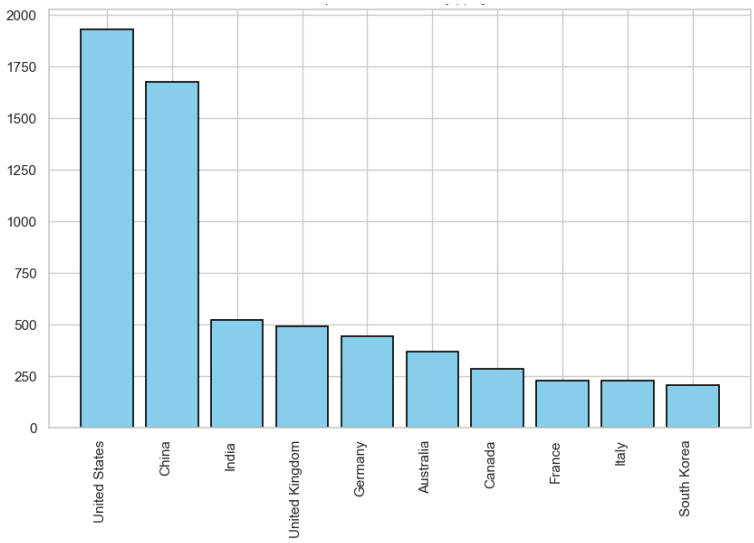

Рис. 3 – Количество статей по странам
Fig. 3 - Number of articles by country

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

На диаграмме (Рис. 4 слева) представлено количество документов каждого типа в процентном соотношении, опубликованных за период с 1982 по 2023 год. Основные тенденции:

- наиболее распространенный тип документа — это статьи (Article), их количество составляет более 44% от общего числа документов;
- вторым по распространенности типом документа являются конференции (Conference Paper), их количество составляет около 41% от общего числа документов;
- остальные типы документов менее распространены, их доля составляет менее 20% от общего числа документов.

Преобладание статей может быть связано с тем, что статьи являются наиболее распространенной формой научной публикации. Они обычно содержат более подробный анализ и обсуждение результатов исследования, чем другие типы документов. Преобладание конференций может быть связано с тем, что конференции являются важным форумом для обмена результатами исследований. Конференционные статьи обычно представляют собой краткий обзор исследования, который был представлен на конференции.

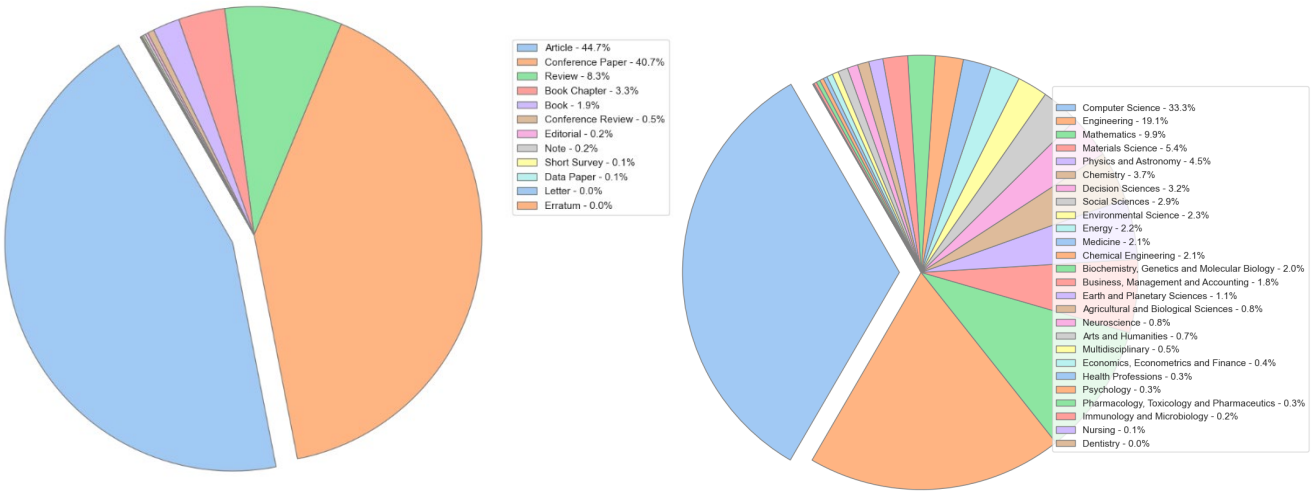

Рис. 4 – Доля публикаций по типу документа (слева) и доля публикаций по отраслям (справа)
Fig. 4 - Distribution of publications by document type (left) and distribution of publications by field (right)

Диаграмма справа (Рис. 4) демонстрирует распределение исследований по областям знаний, связанным с самовосстанавливающимися материалами. Основные тенденции:

- доминирование компьютерных наук и инженерии: информатика и инженерия составляют почти половину всех публикаций, отражая ключевую роль этих дисциплин в разработке, моделировании и анализе самовосстанавливающихся материалов;
- сильное присутствие естественных наук: математика, физика и астрономия, химия и материаловедение занимают значительные позиции, подчеркивая фундаментальное понимание материалов и физических процессов, лежащих в основе самовосстановления.

Рис. 5 представляет собой графическое изображение аналитических аспектов взаимосвязей в исследованиях, выполненных с использованием программного обеспечения VOSviewer. Взаимосвязи, отраженные на Рисунке 5, были рассчитаны с применением метода полного подсчета ключевых слов (Full counting). В данном методе каждое ключевое слово учитывается в полной мере и считается равнозначным, что означает, что каждое его упоминание приравнивается к одной единице. Такой подход к подсчету гарантирует равное внимание каждому упоминанию ключевого слова в анализе, учитывая их важность в равной степени. Это позволяет более объективно оценить влияние каждого ключевого слова на взаимосвязи исследований.

В VOSviewer, разделение на кластеры осуществляется на основе анализа сходства между ключевыми словами или терминами, используемыми в научных статьях. Кластеризация в VOSviewer позволяет выделить тематические группы ключевых слов на основе их взаимосвязей в научных публикациях.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

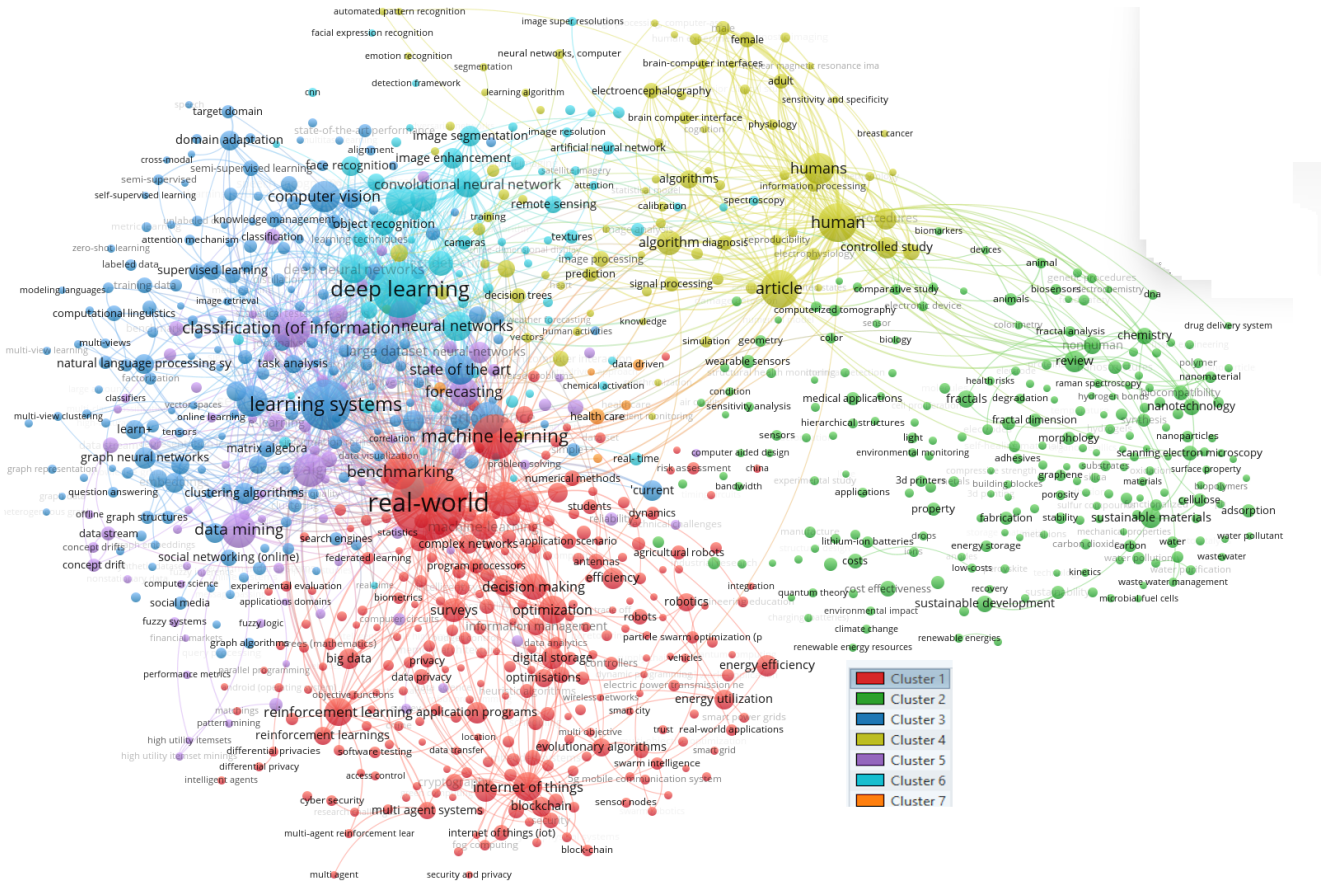

Рис. 5 – Общий вид взаимосвязей в VOSviewer
Fig. 5 - Overview of the relationships in VOSviewer

Взаимосвязи в данной аналитике (Рис. 5) позволяют выделить несколько основных тем:

- фрактальные аспекты: видно, что в одном из кластеров (Cluster 2) активно обсуждаются фрактальная размерность, деградация, пористость, устойчивость и управление структурой, что указывает на важность фрактальных характеристик в контексте технологии самовосстанавливающихся материалов;

- применение в различных областях: темы, связанные с энергосбережением, устойчивым развитием, материаловедением, химией и нанотехнологиями представлены в различных кластерах, указывая на многофункциональное применение технологии самовосстанавливающихся материалов;

- связь с нанотехнологиями: присутствие ключевых слов, таких как наноматериалы, нанотехнологии и нанотрубки, свидетельствует о взаимосвязи технологии самовосстанавливающихся материалов с разработкой и применением наноматериалов;

- смежные темы: в анализе также заметны темы, связанные с искусственным интеллектом, обработкой изображений, машинным обучением, окружающей средой и т. д., что указывает на широкий спектр интересов в исследованиях.

На графике наиболее высокочастотных ключевых слов по самовосстанавливающимся материалам за период с 2018 года (Рис. 6) можно выделить следующие тенденции:

- существенный рост частоты упоминания ключевых слов, связанных с нанотехнологиями. Это связано с тем, что нанотехнологии предлагают новые возможности для создания самовосстанавливающихся материалов с улучшенными свойствами;

- повышение интереса к биополимерам и возобновляемым ресурсам. Это связано с растущим вниманием к устойчивому развитию и необходимости создания материалов, которые не наносят вреда окружающей среде;

- увеличение числа исследований, посвященных адсорбции и функционализации. Это связано с тем, что адсорбция может использоваться для доставки регенерирующих агентов к поврежденным областям материала, а функционализация может улучшить свойства материалов, делая их более устойчивыми к повреждениям.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

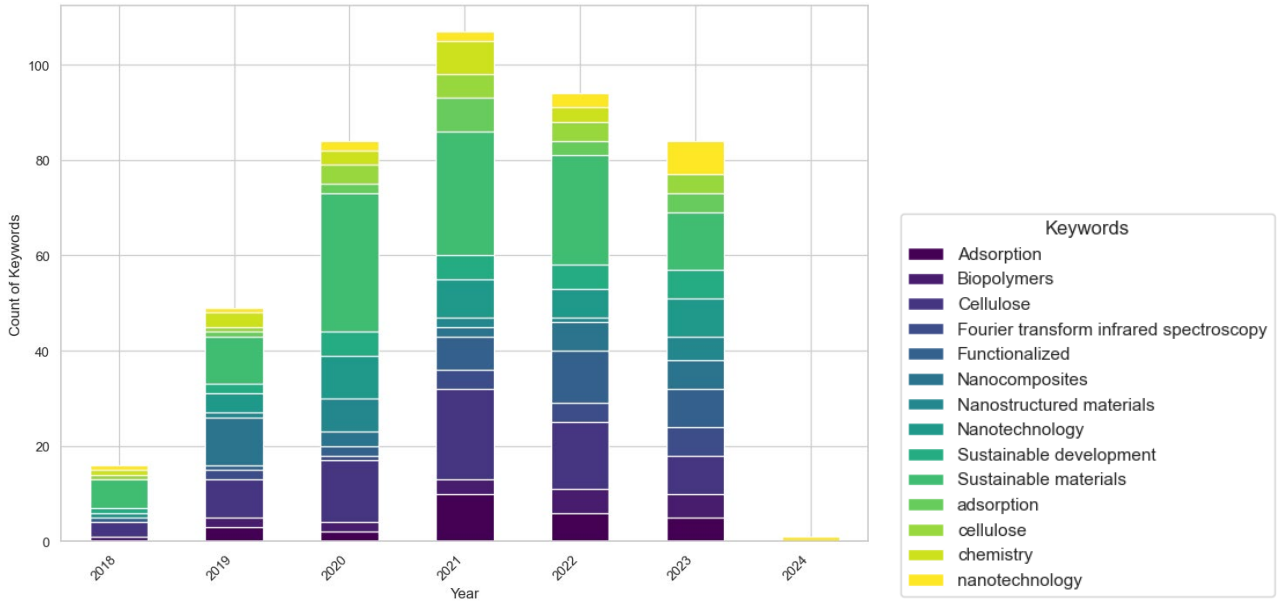

Рис. 6 – График наиболее высокочастотных ключевых слов с 2018 года
Fig. 6 - Frequency graph of the most frequent keywords since 2018

Облака слов, основанные на всех ключевых словах и аннотациях (Рис. 7), включает следующие центральные темы: материалы, ткани, модель, фрактальный анализ, температура, восстановление. Эти темы можно разделить на три основных направления: биомедицина; материалы - композиты, полимеры, свойства материалов, фрактальные структуры; моделирование и анализ - модели заживления, фрактальный анализ, температура, механические испытания.

Рис. 7 – Облака слов (по аннотациям - слева, по ключевым словам - справа)
Fig. 7 - Word clouds (left: annotations, right: keywords)

Таким образом, исследования в области самовосстанавливающихся материалов имеют большой потенциал для развития новых материалов и технологий, которые могут улучшить качество жизни людей и снизить воздействие на окружающую среду. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на улучшение понимания механизмов самовосстановления, разработку новых материалов и конструкций, а также снижение стоимости самовосстанавливающихся материалов.

3.2 Фрактальные системы и их применимость в технологических контекстах

Фрактальные системы представляют собой геометрические объекты или структуры, характеризующиеся самоподобием на разных масштабах. Это означает, что они состоят из повторяющихся элементов, которые похожи друг на друга, но отличаются по размеру.

Основными свойствами фрактальных систем являются: фрактальная размерность, самоподобие, иерархическая структура и многомасштабность. Таблица 2 предоставляет ключевые характеристики фракталов, необходимые для более глубокого понимания их структуры и применения в контексте самовосстанавливающихся материалов.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Таблица 2. Свойства фракталов
Table 2. Fractal properties

Свойство	Описание
Фрактальная размерность	Размерность, учитывающая самоподобие фрактальной системы. Всегда больше или равна обычной размерности системы, но может быть и дробной.
Самоподобие	Свойство, при котором фрактальная система похожа на себя при увеличении или уменьшении масштаба.
Иерархическая структура	Свойство, при котором фрактальная система состоит из повторяющихся элементов, образующих иерархическую структуру.
Многомасштабность	Свойство, при котором фрактальная система имеет структуру, проявляющуюся на разных масштабах.

Фрактальные системы имеют ряд преимуществ, которые делают их привлекательными для использования в технологических контекстах. Эти преимущества включают:

- большую площадь поверхности - фрактальные системы имеют большую площадь поверхности по сравнению с их объемом. Это может быть полезно для увеличения теплообмена, адсорбции или захвата частиц.
- высокую прочность - фрактальные системы часто обладают высокой прочностью по сравнению с другими материалами. Это связано с тем, что они распределяют нагрузку по большой площади.
- устойчивость к повреждениям - фрактальные системы часто устойчивы к повреждениям. Это связано с тем, что они могут самовосстанавливаться или перестраиваться после повреждения.

Таблица 3 предоставляет примеры областей применения фрактальных структур, что дает возможность лучшего понимания их значимости в различных областях науки и технологии.

Таблица 3. Применение фрактальных структур в различных областях
Table 3. The application of fractal structures in various fields

Область применения	Примеры
Материаловедение [18–21]	Создание материалов с улучшенными свойствами, такими как прочность, износостойкость, электропроводность и т. д. Например, фрактальные структуры могут быть использованы для создания материалов с повышенной прочностью, устойчивостью к повреждениям и износу. Это может быть полезно для создания новых материалов для строительства, транспорта, электроники и других областей.
Энергетика [22–25]	Повышение эффективности теплообмена, адсорбции и захвата частиц. Например, фрактальные структуры могут быть использованы для создания теплообменников с повышенной эффективностью. Это может быть полезно для повышения эффективности систем отопления, охлаждения и других систем.
Медицина [26–29]	Создание медицинских устройств, таких как протезы, имплантаты и т. д. Например, фрактальные структуры могут быть использованы для создания протезов и имплантатов, которые более точно соответствуют форме и функциям человеческого тела. Это может улучшить качество жизни людей с ограниченными возможностями.
Экология [30–33]	Очистка воды, воздуха и почвы. Например, фрактальные структуры могут быть использованы для создания новых материалов для очистки воды и воздуха. Это может помочь уменьшить загрязнение окружающей среды.

Таблица 4 сравнивает свойства обычных и фрактальных материалов. Усредненные значения показывают, что фрактальные материалы обладают более высокой прочностью, устойчивостью к повреждениям, эффективностью очистки воды и эффективностью, чем обычные материалы. Однако, фрактальные материалы также имеют некоторые недостатки, такие как низкая направленность и более высокая стоимость производства. Стоит отметить, что конкретные значения свойств фрактальных материалов могут варьироваться в зависимости от различных параметров, таких как тип фрактальной структуры, спектр фрактальных размерностей и состав материала.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Таблица 4. Сравнение свойств обычных и фрактальных материалов
Table 4. Comparison of Properties of Conventional and Fractal Materials

Свойство	Обычный материал	Материал с фрактальной микроструктурой
Прочность	50 МПа	100 МПа
Устойчивость к повреждениям	Низкая	Высокая
Эффективность очистки воды	80%	95%
Направленность	Низкая	Высокая
Эффективность	Средняя	Высокая

Примеры технологических разработок, основанных на фрактальных системах:

- самовосстанавливающиеся материалы с фрактальными микроструктурами [34–37]: продвинутые материалы, способные к автономному ремонту повреждений, представляют собой инновацию в области технологических разработок. Интеграция фрактальных микроструктур в эти материалы обеспечивает более эффективное распределение усилий самовосстановления, что в конечном итоге повышает их долговечность и эксплуатационные характеристики.
- фильтры с фрактальной формой поверхности [38–40]: применение фрактальных форм в поверхности фильтров значительно улучшает их эффективность в процессах фильтрации и очистки различных сред. Это находит применение в различных отраслях, включая обработку жидкостей и газов в промышленных процессах.
- биосенсоры с фрактальными микрочувствительными элементами [41–43]: разработка биосенсоров с использованием фрактальных микрочувствительных элементов предоставляет возможность для более точных и чувствительных измерений в области медицинской диагностики и научных исследований. Эти инновационные биосенсоры способствуют улучшению точности и надежности измерений в различных биологических системах.

3.3 Внедрение фрактальных характеристик в самовосстанавливающиеся материалы и анализ их преимуществ и ограничений

Основные принципы самовосстанавливающихся материалов. Самовосстанавливающиеся материалы обычно основаны на трех основных принципах:

- детектирование повреждений: материал должен быть способен обнаруживать наличие повреждений или изменений в своей структуре или функциональности.
- индукция самовосстановления: после обнаружения повреждений, материал должен запускать процесс самовосстановления, который восстанавливает его структуру и/или функциональность.
- саморегулирование: самовосстанавливающийся материал должен иметь способность контролировать и регулировать процесс самовосстановления в соответствии с необходимыми условиями или требованиями.

Преимущества фрактальных характеристик в самовосстанавливающихся материалах. Фрактальные характеристики представляют собой геометрические и структурные особенности, которые характеризуются самоподобием на различных масштабах. С помощью оценки фрактальных характеристик структуры самовосстанавливающихся материалов можно получить следующие результаты:

- повышение механических свойств материалов за счет поиска области фрактальных размерностей структурных составляющих и фиксации в этой области параметров технологического процесса. Фрактальные структуры характеризуются, в основном, высокой механической прочностью и устойчивостью к повреждениям. Поэтому, внедрение фрактальных характеристик позволяет улучшить механическую прочность самовосстанавливающихся материалов и повысить их способность к сопротивлению механическим воздействиям.
- увеличенная поверхностная площадь: фрактальные структуры имеют большую поверхностную площадь по сравнению с регулярными структурами. Это позволяет улучшить способность материала к реагированию на мех окислительному воздействию: Фрактальные размерности структуры в самовосстанавливающихся материалах могут обладать высокой чувствительностью к параметрам окислительного воздействия и коррозии. Это связано с их

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

большой поверхностной площадью и способностью образовывать защитные слои, которые предотвращают проникновение окислительных веществ.

- улучшение эффективности самовосстановления: фрактальные характеристики могут служить индикатором улучшения эффективности самовосстановления материалов. Оценка фрактальных структур позволяет увеличить количество и качество связей между молекулами материала, что способствует более быстрому и эффективному восстановлению его структуры.

- улучшенная энергетическая эффективность: фрактальные оценки структуры в самовосстанавливающихся материалах могут коррелировать с более эффективное использование энергии. Благодаря своему самоподобию на различных масштабах они позволяют равномерно распределить энергию в материале и снизить потери.

Ограничения фрактальных характеристик в самовосстанавливающихся материалах.

Несмотря на множество преимуществ фрактальных характеристик в самовосстанавливающихся материалах, они также имеют свои ограничения:

- сложность производства: внедрение фрактальных характеристик может усложнить процесс производства самовосстанавливающихся материалов. Создание и контроль структур на различных масштабах требует специализированных технологий и оборудования, что может повысить стоимость и сложность процесса.

- неоднородность структуры: фрактальные структуры могут быть неоднородными и несовершенными (представлять собой мультифракталы), что может повлиять на равномерность и надежность самовосстановления материала. Дополнительные исследования требуются для оптимизации и совершенствования процесса формирования фрактальных структур в материалах.

- ограничения масштаба: фрактальные характеристики могут ограничиться определенными масштабами, что может ограничить применение материалов только в определенных условиях или размерах.

В заключение фрактальный анализ самовосстанавливающихся материалов представляет широкие возможности для улучшения их производительности и свойств, путем нахождения узких диапазонов параметров технологического процесса, где можно добиться улучшенных показателей качества. Математические модели фрактального типа, полученные при этом, можно использовать для прогноза качества самовосстанавливающихся материалов. Однако, необходимо провести дополнительные исследования и разработки, чтобы преодолеть ограничения и оптимизировать этот процесс. Фрактальная структура материала, за счет своей комплексной и сложной природы, позволяет улучшить распределение внешней нагрузки, что способствует более равномерному распределению напряжений по всей структуре. Такое равномерное распределение напряжений снижает риск возникновения напряженности в отдельных участках материала, что в свою очередь приводит к повышению его механической прочности.

Кроме того, фрактальные характеристики могут выступать индикатором изменения устойчивости к усталости и долговечности самовосстанавливающихся материалов. Фрактальное самоподобие обеспечивает более равномерное распределение и перераспределение энергии в материале, что позволяет снизить накопление повреждений и задержать начало разрушения. Таким образом, фрактальные характеристики способствуют повышению долговечности и устойчивости к усталости самовосстанавливающихся материалов. Таким образом, использование фрактальных характеристик в самовосстанавливающихся материалах является перспективным направлением исследований.

Несмотря на сложности и ограничения, фрактальные структуры представляют большой потенциал для создания более прочных, устойчивых и долговечных материалов. Одной из возможностей применения фрактальных размерностей структуры в самовосстанавливающихся материалах является их использование в моделях структура-свойства, для таких изделий как балки, стержни и панели. Применение фрактальных размерностей структуры в модели оценки нагрузки по всей конструкции, возможно позволит добиться повышения численных значений ее прочности и устойчивости, что требует дополнительных исследований.

Таблица 5 предоставляет обзор преимуществ использования фрактальных структур в самовосстанавливающихся материалах, что может быть полезным для понимания их значимости в области материаловедения и технологии.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Таблица 5. Преимущества фрактальных структур для самовосстанавливающихся материалов
Table 5. Advantages of Fractal Structures for Self-Healing Materials

Преимущества	Описание
Улучшенная механическая прочность	Перспективно использование фрактальных размерностей структур в моделях прогнозирования и улучшения механической прочности самовосстанавливающихся материалов, делая их более устойчивыми к механическим воздействиям.
Увеличенная поверхностная площадь	Фрактальные структуры характеризуют большую поверхностную площадь, что может улучшить способность материала к взаимодействию с окружающей средой и повысить его эффективность.
Сопротивление окислительному воздействию	Фрактальные характеристики способствуют созданию защитных слоев, что делает материал устойчивым к окислительному воздействию и коррозии.
Улучшение эффективности самовосстановления	Введение фрактальных структур способствует более эффективному и быстрому процессу самовосстановления материалов, повышая их способность к восстановлению структуры и функциональности.
Улучшенная энергетическая эффективность	Фрактальные размерности структуры могут позволить исследовать равномерное распределение энергии в материале, что способствует снижению потерь и повышению энергетической эффективности.

Таблица 6 демонстрирует ограничения, которые могут возникнуть при использовании фрактальных структур в технологии самовосстанавливающихся материалов. Первое ограничение связано со сложностью производства, обусловленной многопараметричностью и многокритериальностью процесса создания таких материалов. Второе отмечает, что фрактальные структуры могут быть неоднородными, что, в свою очередь, может повлиять на равномерность и надежность самовосстановления материала. Наконец, третье ограничение подчеркивает необходимость дополнительных исследований для оптимизации процесса формирования фрактальных структур, чтобы управлять их свойствами и обеспечивать необходимую структуру.

Таблица 6. Ограничения фрактальных структур для самовосстанавливающихся материалов
Table 6. Limitations of Fractal Structures for Self-Healing Materials

Ограничения	Описание
Сложность производства	Характеризуется многопараметричностью и многокритериальностью технологии производства самовосстанавливающихся материалов, для идентификации которой перспективно использования языка фрактальной геометрии.
Неоднородность структуры	Фрактальные структуры могут быть неоднородными (мультифракталами), что может влиять на равномерность и надежность самовосстановления материала.
Дополнительные исследования	Для оптимизации процесса формирования фрактальных структур в материалах с целью управления их свойствами необходимы дополнительные исследования для устранения несовершенств и обеспечения необходимой структуры.

Еще одним применением фрактальных характеристик является создание самовосстанавливающихся поверхностей и покрытий. Фрактальные модели структуры способны эффективно описывать распределение энергии ударов и износа, что позволяет поверхности материала восстанавливать свою структуру и свойства после повреждения. Это может быть особенно полезно в таких областях, как авиационная и автомобильная промышленность, где поверхности подвержены интенсивным воздействиям и трениям. Кроме того, фрактальные характеристики могут быть использованы в разработке новых материалов для медицинских имплантатов и протезов. Самовосстанавливающиеся материалы с фрактальными структурами могут способствовать быстрому заживлению тканей и регенерации костей, улучшая процессы заживления после операций и травм.

Таблица 7 представляет фрактальные технологии, применяемые для улучшения свойств различных материалов. В области полимеров, внедрение фрактальной структуры, такой как фрактальные агрегаты, способствует повышению механической прочности и устойчивости к разрывам, что приводит к увеличению долговечности материалов. Для металлов использование

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

фрактальных форм частиц или поверхности способствует улучшению адгезионных свойств и сопротивлению коррозии, продлевая их срок службы и т.д.

Таблица 7. Фрактальные технологии для повышения свойств материалов
Table 7. Fractal Technologies for Improving Material Properties

Материал/ технология	Фрактальные характеристики	Преимущества
Полимеры [44–47]	Внедрение фрактальной структуры в полимеры, например, в виде фрактальных агрегатов, помогает улучшить их механическую прочность и устойчивость к разрывам.	Повышенная прочность, снижение вероятности разрывов, улучшенная долговечность
Металлы [48–50]	Использование фрактальных форм металлических частиц или поверхности металлов позволяет улучшить их адгезионные свойства и сопротивление коррозии.	Улучшенная адгезия, сопротивление коррозии, продлевает срок службы
Керамика [51–54]	Внедрение фрактальных структур в керамику позволяет улучшить ее прочность и устойчивость к трещинам и повреждениям.	Большая прочность, снижение вероятности трещин, улучшенная механическая стабильность
Бетон [55–58]	Использование фрактальных структур в бетоне способствует улучшению его прочности, устойчивости к разрушению и способности к самовосстановлению.	Улучшенная прочность, устойчивость к разрушению, возможность автоматического восстановления

Одним из главных ограничений является высокая сложность проектирования и производства фрактальных структур. Для достижения желаемых свойств самовосстанавливающихся материалов необходимо учитывать соотношение между размером фрактальных элементов и масштабом повреждения. Оптимальные пропорции и размещение фрактальных элементов также играют важную роль в достижении требуемой самовосстанавливающейся функциональности. Это требует от исследователей и инженеров глубокого понимания природы фрактальных структур и их взаимодействия с окружающей средой.

Кроме того, необходимо учитывать возможное негативное влияние фрактальных структур на другие свойства материала. Например, изменение фрактальных характеристик может привести к ухудшению теплопроводности или электропроводности материала. Продвижение в этой области требует тщательного балансирования между требуемыми самовосстанавливающимися свойствами и другими характеристиками материала.

Несмотря на вышеупомянутые ограничения, уже существуют примеры успешного внедрения фрактальных характеристик в самовосстанавливающиеся материалы. Например, разработаны самовосстанавливающиеся поверхности с фрактальными микронаноструктурами, которые эффективно ремонтируют микротрещины и незначительные повреждения [59–61]. Также успешно использовались самовосстанавливающиеся полимерные материалы с фрактальной структурой, способные восстанавливать механическую прочность после сильных механических воздействий [62–64]. Кроме того, применение самоочищающихся покрытий с фрактальными формами поверхности позволяет эффективно удалять загрязнения и предотвращать образование пятен и коррозии [65–67].

В заключение, исследование фрактальных характеристик в самовосстанавливающиеся материалы имеет большой потенциал для улучшения их эффективности самовосстановления и расширения области их применения. Однако для полного реализации этого потенциала необходимы дальнейшие исследования и разработки. Необходимо повышение понимания фрактальных структур и их влияния на самовосстанавливающиеся материалы, а также разработка методов проектирования и производства фрактальных структур с оптимальными свойствами и функциональностью.

Кроме того, стоит учитывать вопросы стабильности и долговечности фрактальных структур. Такие структуры могут быть очень чувствительны к окружающим условиям, что может негативно сказаться на их самовосстанавливающихся свойствах в длительная период времени. Исследования в этой области должны включать в себя изучение сопротивления фрактальных структур температурным изменениям, воздействию влаги, химическому воздействию и другим неблагоприятным факторам. Также следует отметить, что внедрение фрактальных характеристик в самовосстанавливающиеся материалы требует дополнительных затрат и технологических

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

процессов. Разработка и производство фрактальных структур может быть сложнее и дороже по сравнению с традиционными методами производства материалов. Поэтому необходимо провести экономические исследования, чтобы оценить коммерческую целесообразность применения таких материалов в различных отраслях, а также разработать оптимальные методы производства и оптимизировать затраты.

В целом, исследование фрактальных характеристик в самовосстанавливающихся материалах представляет большой потенциал для создания новых и улучшенных материалов с возможностью самовосстановления. Однако для успешного внедрения этих технологий необходимы дальнейшие исследования, разработки и экономические исследования, чтобы учесть ограничения, вызовы и возможности на пути к их коммерческому применению.

3.4 Потенциал интеграции фрактальных аспектов в технологию самовосстанавливающихся материалов

Интеграция фрактальных аспектов в технологию самовосстанавливающихся материалов предоставляет перспективные возможности для совершенствования их функциональных характеристик на различных масштабах. Оценка эффективности данной интеграции представляет собой важный этап исследований, позволяющий понять преимущества и ограничения данного подхода.

Оценка эффективности на различных масштабах.

Микроскопический уровень: на микроскопическом уровне интеграция фрактальных структур может быть направлена на повышение механической прочности материала за счет использования самоподобных элементов внутренней структуры. Это способствует более эффективному распределению напряжений и предотвращению микротрещин.

Мезоскопический уровень: на уровне мезоструктур интеграция фрактальных элементов может улучшить общую устойчивость к различным видам механических воздействий, включая усталостные повреждения и деформации. Использование фрактальных принципов дает возможность создания более гибких и адаптивных структур.

Макроскопический уровень: на макроскопическом уровне интеграция фрактальных аспектов может способствовать усилению общей прочности и долговечности материала. Это особенно важно в технических сферах, таких как строительство, авиация и автомобильная промышленность.

Преимущества. Эффективное распределение энергии: фрактальные структуры способствуют более эффективному распределению энергии для ремонта и регенерации материала на всех уровнях. Улучшенная прочность: фрактальные характеристики могут значительно улучшить механическую прочность материала благодаря их способности к самоподобию и многомасштабности. Долговечность: интеграция фрактальных структур может повысить долговечность материалов, делая их более устойчивыми к повреждениям.

Ограничения. Сложность проектирования: проектирование материалов с фрактальными структурами требует высокой степени сложности, что может повысить затраты на исследования и разработки. Негативное влияние на другие свойства: внедрение фрактальных характеристик может оказать влияние на другие важные свойства материала, такие как теплопроводность или электропроводность.

Интеграция фрактальных аспектов в технологию самовосстанавливающихся материалов обладает значительным потенциалом для улучшения их производительности на различных уровнях. Несмотря на выявленные ограничения, перспективы внедрения фрактальных структур в материаловедение предоставляют перспективные направления для будущих исследований и разработок в данной области.

При использовании фрактальных аспектов в технологии самовосстанавливающихся материалов возможно достижение ряда преимуществ. Во-первых, фрактальные структуры могут улучшить свойства самовосстановления, так как их геометрия обеспечивает большую поверхностную площадь с большим количеством активных участков для процессов реакции и диффузии. Это позволяет более эффективно восстанавливать поврежденные области материала. Во-вторых, использование фрактальных структур может способствовать улучшению долговечности материалов. Фрактальные аспекты позволяют распределить напряжение и энергию на различные масштабы, что снижает концентрацию напряжений и предотвращает

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

возникновение трещин. Это особенно важно для материалов, испытывающих механические нагрузки или находящихся в сложных условиях эксплуатации.

Кроме того, влияние интеграции фрактальных аспектов на долговечность и устойчивость материалов заслуживает особого внимания в различных технологических приложениях. Фрактальные структуры могут быть интегрированы на различных масштабах, начиная от наномасштабных структур до макроскопических структур. В зависимости от масштаба фрактальные аспекты могут влиять на различные физико-химические процессы, такие как диффузия и реакции в материале. Это позволяет управлять самовосстановлением материалов на разных уровнях и оптимизировать их свойства для конкретных технологических приложений.

Анализ возможностей создания инновационных и устойчивых материалов на основе фрактальных структур в контексте технологии самовосстанавливающихся материалов требует применения различных методов и подходов. Математическое моделирование позволяет оценить влияние фрактальных аспектов на процессы самовосстановления, а также определить оптимальные параметры фрактальных структур для достижения наилучших результатов. Экспериментальные исследования позволяют подтвердить предсказания моделей и оценить эффективность фрактальных аспектов в реальных условиях. Использование аналитических методов, таких как сканирующая электронная микроскопия и рентгеновская дифрактометрия, позволяет исследовать структурные особенности материалов на микро- и наномасштабах и оценить влияние фрактальных структур на определенные свойства материалов.

Однако требуется дальнейшее исследование для полного понимания механизмов самовосстановления, связанных с фрактальными структурами. Изучение взаимодействия между различными фрактальными аспектами, такими как размер, форма и степень самоподобия, может привести к разработке новых стратегий для создания более эффективных и устойчивых самовосстанавливающихся материалов. Кроме того, необходимо учесть экономические и экологические аспекты при разработке и внедрении новых материалов на основе фрактальных структур. Оценка стоимости производства, энергоэффективности и возможности переработки фрактальных материалов позволит определить их практическую ценность и применимость в различных отраслях промышленности. В целом, использование фрактальных аспектов в процессе самовосстановления материалов представляет собой интересную исследовательскую область с большим потенциалом для создания инновационных и устойчивых материалов. Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию новых материалов с улучшенными свойствами, что будет иметь положительный эффект на множество промышленных и научных областей.

3.5 Оценка эффективности фрактальных структур в процессе самовосстановления и их вклада в создание инновационных материалов

Фрактальные структуры представляют собой математические объекты, обладающие свойством самоподобия на различных уровнях иерархии. Данное свойство позволяет им воспроизводить свою структуру и функции на микро- и макроуровнях после повреждений или деформаций. Это делает фрактальные структуры особенно привлекательными для разработки самовосстанавливающихся материалов, которые способны восстановить свои свойства без внешнего вмешательства. Один из подходов к оценке эффективности фрактальных структур в процессе самовосстановления - анализ результатов экспериментальных исследований, которые включают изучение поверхности самовосстанавливающихся материалов под микроскопом. С помощью методов, таких как сканирующая электронная микроскопия и рентгеновская дифрактометрия, исследователи могут изучать структурные особенности материалов на микро- и наномасштабах и анализировать влияние фрактальных структур на их способность к самовосстановлению.

Исследования показывают, что использование фрактальных структур в самовосстанавливающихся материалах может привести к улучшению их свойств [68–70]. Фрактальные структуры могут обеспечить более равномерное распределение напряжений и деформаций, что способствует повышению прочности и устойчивости материалов к повреждениям. Кроме того, фрактальные структуры могут улучшить регенерацию материала в процессе самовосстановления путем обеспечения оптимальной площади контакта между поврежденными участками. Однако для полного понимания эффективности фрактальных структур в процессе самовосстановления требуется дальнейшее исследование. Важным

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

аспектом является изучение взаимодействия между различными фрактальными характеристиками, такими как размер, форма и степень самоподобия. Это позволит определить оптимальные параметры фрактальных структур для получения лучшей эффективности самовосстановления.

Кроме того, необходимо учитывать экономические и экологические аспекты при оценке эффективности фрактальных структур. Необходимо определить стоимость и сложность производства материалов с фрактальными структурами, а также их экологическую устойчивость. Например, использование определенных материалов и методов производства фрактальных структур может быть дорогостоящим или требовать больших энергетических затрат, что ограничивает их применение в широком масштабе.

Кроме того, необходимо рассмотреть возможные проблемы и ограничения, связанные с использованием фрактальных структур. Например, фрактальные структуры могут быть чувствительными к внешним условиям, таким как температура или влажность, что может ограничивать их использование в определенных средах. Также важно учитывать возможные изменения свойств и структуры фрактальных материалов со временем, их старение или деградацию, которые могут влиять на их способность к самовосстановлению.

В целом, использование фрактальных структур в самовосстанавливающихся материалах представляет большой потенциал для разработки инновационных и устойчивых материалов. Однако, чтобы полностью оценить их эффективность, необходимо проводить дальнейшие исследования, эксперименты, а также учитывать экономические, экологические и практические аспекты их применения.

Прочность является одним из ключевых параметров, определяющих способность материала противостоять механическим нагрузкам. Исследование фрактальных размерностей структуры может использоваться в моделях оценки прочностных характеристик материалов. Фракталы обладают самоподобием на различных масштабах, что позволяет распределить нагрузку по всей фрактальной структуре более равномерно и эффективно. Это уменьшает концентрацию напряжений и риски разрушения материала.

Таблица 8 демонстрирует влияние масштаба на свойства фрактальных материалов. На микроуровне внедрение самоподобных структур улучшает распределение напряжений. На мезоуровне использование фрактальных элементов повышает устойчивость к механическим воздействиям и усталости. На макроуровне интеграция фрактальных аспектов улучшает механическую прочность и долговечность, увеличивая устойчивость к повреждениям.

Таблица 8. Фрактальные материалы: влияние масштаба на свойства
Table 8. Fractal Materials: Influence of Scale on Properties

Масштаб	Фрактальные аспекты	Преимущества
Микроскопический уровень [71,72]	Внедрение самоподобных структур внутренней структуры материалов	Улучшенное распределение напряжений, предотвращение микротрещин
Мезоскопический уровень [73–75]	Использование фрактальных элементов для повышения устойчивости к различным видам механических воздействий	Улучшенная устойчивость к усталостным повреждениям, адаптивность структуры
Макроскопический уровень [74,76,77]	Интеграция фрактальных аспектов для повышения прочности и долговечности материала	Улучшенная механическая прочность, устойчивость к повреждениям

Таблица 9 обозначает перспективы и риски применения фрактальных структур в материалах. К выгодам относятся улучшенное самовосстановление, повышенная прочность, долговечность, эффективное распределение энергии, а также улучшенная адаптивность и гибкость. Однако следует учесть сложность проектирования и исследований, возможное негативное влияние на другие свойства материала, потребность в оптимизации интегрированных фрактальных структур, высокие затраты на разработку и производство, а также возможные изменения тепло- и электропроводности при интеграции фрактальных структур.

Таблица 9. Перспективы и риски
Table 9. Opportunities and challenges

Преимущества	Ограничения
Улучшенное самовосстановление	Сложность проектирования и исследований

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Преимущества	Ограничения
Повышенная прочность	Негативное влияние на другие свойства материала
Улучшенная долговечность	Потребность в оптимизации интегрированных фрактальных структур
Более эффективное распределение энергии	Высокая стоимость разработки и производства
Улучшенная адаптивность и гибкость	Возможные изменения тепло- и электропроводности при интеграции фрактальных структур

Устойчивость к разрушениям также является важным параметром для самовосстанавливающихся материалов. Фрактальные структуры могут повысить устойчивость к различным типам разрушений, таким как трещины или износ. Благодаря самоподобию на разных масштабах фракталы могут предотвращать распространение трещин, вызывая идентичные структуры на микро- и макроуровнях. Это позволяет сохранить целостность материала и предотвратить его разрушение.

Однако оценка влияния фрактальных структур на свойства самовосстанавливающихся материалов является сложной задачей и требует комплексного подхода. Для достоверной оценки необходимо проводить эксперименты, моделирование и анализ на микро- и макроскопических уровнях. Более того, следует учитывать различные факторы, такие как тип материала, метод его производства, условия эксплуатации и другие внешние факторы, которые могут влиять на свойства материала. Таким образом, оценка влияния фрактальных структур на различные свойства самовосстанавливающихся материалов является активной исследовательской областью. Ученые постоянно работают над улучшением понимания этого взаимодействия и разработкой новых материалов с использованием фрактальных принципов.

Существует несколько подходов к созданию материалов с фрактальными структурами. Один из них - использование нанотехнологий и самосборки. Наночастицы или наноструктуры могут организовываться в фрактальные структуры, что позволяет создавать материалы с желаемыми свойствами. Другой подход - применение 3D-печати с использованием фрактальных алгоритмов. Это позволяет создавать сложные фрактальные структуры на макроскопическом уровне.

Фрактальные структуры предоставляют уникальный потенциал для разработки инновационных материалов с улучшенными характеристиками, включая новые функциональности, расширенные возможности применения и повышенные производственные перспективы. Этот аспект заслуживает внимательного рассмотрения в контексте технологии самовосстанавливающихся материалов.

Потенциал фрактальных структур. Улучшенные механические характеристики - фрактальные структуры могут быть настроены для оптимального распределения напряжений, что способствует повышению механической прочности материала на различных уровнях структурной организации; эффективное распределение энергии - самоподобие фрактальных элементов обеспечивает эффективное распределение энергии, способствуя более эффективному процессу самовосстановления материала; новые функциональности - интеграция фрактальных структур открывает путь к созданию материалов с новыми функциональностями, такими как более эффективные системы ремонта, адаптивные свойства и улучшенные характеристики в различных условиях эксплуатации; многомасштабность:

Перспективы внедрения фрактальных подходов в технологию самовосстанавливающихся материалов: улучшение свойств материалов - интеграция фрактальных структур предоставляет перспективы для создания материалов с улучшенными свойствами, включая механическую прочность, устойчивость к повреждениям и долговечность; расширение области применения - фрактальные подходы могут существенно расширить область применения самовосстанавливающихся материалов, делая их более эффективными в различных отраслях, таких как строительство, авиация и медицина; производственные возможности - интеграция фрактальных структур может повысить производственные возможности за счет оптимизации процессов изготовления и применения более эффективных технологий.

Вызовы и направления для будущих исследований: сложность проектирования и производства - один из вызовов состоит в сложности проектирования и производства материалов с фрактальными структурами. Будущие исследования должны уделять внимание разработке более эффективных методов и технологий; взаимодействие с другими свойствами материала - важно изучить взаимодействие фрактальных структур с другими свойствами материала, такими как теплопроводность и электропроводность, чтобы избежать негативных влияний;

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

экономические и экологические аспекты - исследования должны включать оценку экономической целесообразности и экологической устойчивости материалов с фрактальными структурами.

В целом, фрактальные структуры предоставляют многообещающие перспективы для создания инновационных самовосстанавливающихся материалов. Преодоление вызовов и продолжение исследований в данной области позволит раскрыть полный потенциал фрактальных подходов в технологии самовосстанавливающихся материалов.

4 Conclusions

На основе проведенного библиометрического анализа, охватывающего 6 673 статьи с использованием специализированного программного обеспечения для аналитики данных, формулируются следующие выводы:

1. Использовать фрактальную размерность структуры самовосстанавливающихся материалов в качестве индикатора изменения критериев качества.
2. Использовать фрактальные размерности элементов структуры в моделях прогноза их свойств.
3. Оценивать области рабочего диапазона технологических параметров и фрактальных размерностей структуры, в которых можно получить материалы с наперед заданными свойствами.
4. Определять неоднородность структуры с применением мультифрактального формализма.
5. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке новых материалов и технологий, которые сделают строительство более эффективным.

5 Fundings

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

References

1 Goyal, M., Agarwal, S.N. and Bhatnagar, N. (2022) A Review on Self-Healing Polymers for Applications in Spacecraft and Construction of Roads. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **139**, e52816. https://doi.org/10.1002/APP.52816.

2 Fernandez, C.A., Correa, M., Nguyen, M.T., Rod, K.A., Dai, G.L., Cosimbescu, L., Rousseau, R. and Glezakou, V.A. (2021) Progress and Challenges in Self-Healing Cementitious Materials. *Journal of Materials Science*, Springer, **56**, 201–230. https://doi.org/10.1007/S10853-020-05164-7/FIGURES/13.

3 Amran, M., Onaizi, A.M., Fediuk, R., Vatin, N.I., Rashid, R.S.M., Abdelgader, H. and Ozbakkaloglu, T. (2022) Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review. *Materials 2022, Vol. 15, Page 3214*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 3214. https://doi.org/10.3390/MA15093214.

4 Chen, Y., Sui, Z. and Du, J. (2023) Review on Aviation Intelligent Self-Healing Anti-Corrosion Coating. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Emerald Publishing, **ahead-of-print**. https://doi.org/10.1108/ACMM-08-2023-2888/FULL/XML.

5 Sharma, K. and Srinivas, G. (2020) Flying Smart: Smart Materials Used in Aviation Industry. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **27**, 244–250. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.10.115.

6 Mishra, A.K. and Pattanaik, P. Review Study on Mechanical Properties of Self-Healing Materials for Aerospace Applications. *Copyright@ 2022 REST Publisher 114 Materials and its Characterization*, **1**. https://doi.org/10.46632/mc/1/2/8.

7 Khan, A., Ahmed, N. and Rabnawaz, M. (2020) Covalent Adaptable Network and Self-Healing Materials: Current Trends and Future Prospects in Sustainability. *Polymers 2020, Vol. 12, Page 2027*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **12**, 2027. https://doi.org/10.3390/POLYM12092027.

8 Jayabalakrishnan, D., Naga Muruga, D.B., Bhaskar, K., Pavan, P., Balaji, K., Rajakumar, P.S.,

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Priya, C., Deepa, R.A.B., Sendilvelan, S. and Prabhahar, M. (2021) Self-Healing Materials–A Review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **45**, 7195–7199. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.02.415.

9 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.

10 Del Prado-Audelo, M.L., Caballero-Florán, I.H., Mendoza-Muñoz, N., Giraldo-Gomez, D., Sharifi-Rad, J., Patra, J.K., González-Torres, M., Florán, B., Cortes, H. and Leyva-Gómez, G. (2021) Current Progress of Self-Healing Polymers for Medical Applications in Tissue Engineering. *Iranian Polymer Journal 2021 31:1*, Springer, **31**, 7–29. https://doi.org/10.1007/S13726-021-00943-8.

11 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.

12 Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.Z. and Oksogoev, A.A. (1994) Sinergetika i Fraktaly v Materialovedenii. Akademicheskiy nauchno-izdatelskiy, proizvodstvenno-poligraficheskiy i knigorasprostranitelskiy tsentr Rossiyskoy akademii nauk "Izdatelstvo “Nauka,” Moskva.

13 Benoit B. Mandelbrot. (1983) The Fractal Geometry of Nature. Freeman, San Francisco, 480.

14 Feder, J. (2013) Fractals. Physics of Solids and Liquids, Ed., Springer, New York.

15 Assadi-Langroudi, A., Abdalla, H. and Ghadr, S. (2022) Fractals for the Sustainable Design of Engineered Particulate Systems. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 7287*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 7287. https://doi.org/10.3390/SU14127287.

16 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.

17 Yang, Y., Dang, Z.M., Li, Q. and He, J. (2020) Self-Healing of Electrical Damage in Polymers. *Advanced Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **7**, 2002131. https://doi.org/10.1002/ADVS.202002131.

18 Mwema, F.M., Jen, T.C. and Kaspar, P. (2022) Fractal Theory in Thin Films: Literature Review and Bibliometric Evidence on Applications and Trends. *Fractal and Fractional 2022, Vol. 6, Page 489*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **6**, 489. https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT6090489.

19 Cui, W., Chen, H. and Zhao, J. (2022) Fractal Dimension in Tribology – an Overview. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **1262**, 012009. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1262/1/012009.

20 Peralta, M.E. and Soltero, V.M. (2020) Analysis of Fractal Manufacturing Systems Framework towards Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Systems*, Elsevier, **57**, 46–60. https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2020.08.004.

21 Duan, Q., An, J., Mao, H., Liang, D., Li, H., Wang, S. and Huang, C. (2021) Review about the Application of Fractal Theory in the Research of Packaging Materials. *Materials 2021, Vol. 14, Page 860*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 860. https://doi.org/10.3390/MA14040860.

22 Emami-Meybodi, M. and Samadi, A.H. (2023) Fractals and Nonlinear Dynamic Modeling in Energy Economics: A Comprehensive Overview. *Contributions to Management Science*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **Part F1503**, 121–160. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38188-1_6/TABLES/3.

23 Husain, A., Nanda, M.N., Chowdary, M.S. and Sajid, M. (2022) Fractals: An Eclectic Survey, Part II. *Fractal and Fractional 2022, Vol. 6, Page 379*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **6**, 379. https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT6070379.

24 Zhang, Z., Scarpa, F., Bednarcyk, B.A. and Chen, Y. (2021) Harnessing Fractal Cuts to Design Robust Lattice Metamaterials for Energy Dissipation. *Additive Manufacturing*, Elsevier, **46**, 102126. https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2021.102126.

25 Younis, O., Mourad, A., Aissa, A., Qasem, N.A.A., Abed, A.M., Akbari, O.A., Smaisim, G.F., Gudri, K., Toghraie, D., Kolsi, L. and Alizadeh, A. (2022) Numerical Investigation of Thermal Energy Storage System Loaded with Nano-Enhanced Phase Change Material with Koch Snowflake Fractal Cross-Section. *Journal of Energy Storage*, Elsevier, **56**, 106016. https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.106016.

26 Grizzi, F., Spadaccini, M., Chiriva-Internati, M., Hegazi, M.A.A.A., Bresalier, R.S., Hassan, C.,

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Repici, A. and Carrara, S. (2023) Fractal Nature of Human Gastrointestinal System: Exploring a New Era. *World Journal of Gastroenterology*, Baishideng Publishing Group Inc, **29**, 4036. https://doi.org/10.3748/WJG.V29.I25.4036.

27 Nayak, S.R. and Mishra, J. (1AD) Analysis of Medical Images Using Fractal Geometry. *https://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/978-1-6684-7544-7.ch078*, IGI Global, 1547–1562. https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7544-7.CH078.

28 Grzebieluch, W., Kowalewski, P., Grygier, D., Rutkowska-Gorczyca, M., Kozakiewicz, M. and Jurczyszyn, K. (2021) Printable and Machinable Dental Restorative Composites for CAD/CAM Application—Comparison of Mechanical Properties, Fractographic, Texture and Fractal Dimension Analysis. *Materials 2021, Vol. 14, Page 4919*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 4919. https://doi.org/10.3390/MA14174919.

29 Smyslov, R.Y., Kopitsa, G.P., Gorshkova, Y.E., Ezdakova, K. V, Khripunov, A.K., Migunova, A. V, Tsvigun, N. V, Korzhova, S.A., Emel'yanov F, A.I. and Pozdnyakov, A.S. (2022) Novel Biocompatible Cu 2þ-Containing Composite Hydrogels Based on Bacterial Cellulose and Poly-1-Vinyl-1,2,4-Triazole. *Smart Materials in Medicine*, **3**, 382–389. https://doi.org/10.1016/j.smaim.2022.05.002.

30 Dwyer, G.K., Cummings, C.R., Rice, S.P., Lancaster, J., Downes, B.J., Slater, L. and Lester, R.E. (2021) Using Fractals to Describe Ecologically Relevant Patterns in Distributions of Large Rocks in Streams. *Water Resources Research*, John Wiley & Sons, Ltd, **57**, e2021WR029796. https://doi.org/10.1029/2021WR029796.

31 Fisher, D.N. and Pruitt, J.N. (2020) Insights from the Study of Complex Systems for the Ecology and Evolution of Animal Populations. *Current Zoology*, Oxford Academic, **66**, 1–14. https://doi.org/10.1093/CZ/ZOZ016.

32 Martinez-Garcia, R., Tarnita, C.E. and Bonachela, J.A. (2022) Spatial Patterns in Ecological Systems: From Microbial Colonies to Landscapes. *Emerging Topics in Life Sciences*, Portland Press, **6**, 245–258. https://doi.org/10.1042/ETLS20210282.

33 Lorevice, M. V., Claro, P.I.C., Aleixo, N.A., Martins, L.S., Maia, M.T., Oliveira, A.P.S., Martinez, D.S.T. and Gouveia, R.F. (2023) Designing 3D Fractal Morphology of Eco-Friendly Nanocellulose-Based Composite Aerogels for Water Remediation. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, **462**, 142166. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.142166.

34 Peng, Y., Ma, Z., Wang, X., Li, J., Li, X., Zhang, C., He, T., Li, G. and Zhang, P. (2023) Fractal Surface Recovery and Self-Healing Contributed to Sustainable Superhydrophobicity: A Review. World Scientific Publishing Company, **26**, 2240111. https://doi.org/10.1142/S0218348X22401119.

35 Rajczakowska, M., Tole, I., Hedlund, H., Habermehl-Cwirzen, K. and Cwirzen, A. (2023) Autogenous Self-Healing of Low Embodied Energy Cementitious Materials: Effect of Multi-Component Binder and Crack Geometry. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **376**, 130994. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.130994.

36 Liu, J., Wang, Z., Jing, H., Zhang, T., Wang, X., Zhou, X. and Xu, X. (2023) Self-Healing Properties of Steel Slag Asphalt Mixture Based on Experimental Characterization and 3D Reconstruction. *Materials & Design*, Elsevier, **234**, 112358. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2023.112358.

37 Radovic, I.M., Stajcic, A., Mitic, V. V., Serpa, C., Paunovic, V. and Randelovic, B. (2021) Fractal Reconstruction of Fiber-Reinforced Epoxy Microstructure. *Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., **2021-September**, 203–206. https://doi.org/10.1109/MIEL52794.2021.9569054.

38 Kapoor, A., Mishra, R. and Kumar, P. (2022) Frequency Selective Surfaces as Spatial Filters: Fundamentals, Analysis and Applications. *Alexandria Engineering Journal*, Elsevier, **61**, 4263–4293. https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2021.09.046.

39 Yang, Z., Zhang, L., Feng, D., Li, J., Wang, W., Yu, T., Xu, L.Y., Yao, X., Cao, J. and Feng, X. (2020) A Fractal Model for Pressure Drop through a Cigarette Filter. *Thermal Science*, Serbian Society of Heat Transfer Engineers, **24**, 2653–2659. https://doi.org/10.2298/TSCI2004653Y.

40 Hamzah, A.M., Audah, L. and Alkhafaji, N. (2020) H-Shaped Fractal Slots Based Highly Miniaturized Substrate Integrated Waveguide Metamaterial Bandpass Filters for C-Band Applications. *Progress In Electromagnetics Research B*, Electromagnetics Academy, **86**, 139–158. https://doi.org/10.2528/PIERB19123006.

41 Foroughi, S., Habibi, M. and Packirisamy, M. (2022) Additive Manufacturing of Microcantilevers of Varying Stiffnesses for Sensing Applications. *Journal of The Electrochemical Society*, IOP Publishing, **169**, 027507. https://doi.org/10.1149/1945-7111/AC50E1.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

42 Geetha, K., Chitra, S., B., M. and Z. Gao, X. (2017) Securing Patient Data in Wireless Body Area Sensor Network Using Biometrics Based Key Generation. *Current Medical Imaging Reviews*, Bentham Science Publishers, **13**. https://doi.org/10.2174/1573405613666161121121115.

43 Akin, S., Lee, S., Jo, S., Ruzgar, D.G., Subramaniam, K., Tsai, J.T. and Jun, M.B.G. (2022) Cold Spray-Based Rapid and Scalable Production of Printed Flexible Electronics. *Additive Manufacturing*, Elsevier, **60**, 103244. https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2022.103244.

44 Jurjiu, A. and Galiceanu, M. (2018) Dynamics of a Polymer Network Modeled by a Fractal Cactus. *Polymers 2018, Vol. 10, Page 787*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **10**, 787. https://doi.org/10.3390/POLYM10070787.

45 Barszczewska-Rybarek, I.M. and Krasowska, M. (2012) Fractal Analysis of Heterogeneous Polymer Networks Formed by Photopolymerization of Dental Dimethacrylates. *Dental Materials*, Elsevier, **28**, 695–702. https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2012.03.015.

46 Vu, C.C., Truong, T.T.N. and Kim, J. (2022) Fractal Structures in Flexible Electronic Devices. *Materials Today Physics*, Elsevier, **27**, 100795. https://doi.org/10.1016/J.MTPHYS.2022.100795.

47 Shin, S., Gu, M.L., Yu, C.Y., Jeon, J., Lee, E. and Choi, T.L. (2018) Polymer Self-Assembly into Unique Fractal Nanostructures in Solution by a One-Shot Synthetic Procedure. *Journal of the American Chemical Society*, American Chemical Society, **140**, 475–482. https://doi.org/10.1021/JACS.7B11630/SUPPL_FILE/JA7B11630_SI_001.PDF.

48 Tang, H.P., Wang, J.Z., Zhu, J.L., Ao, Q.B., Wang, J.Y., Yang, B.J. and Li, Y.N. (2012) Fractal Dimension of Pore-Structure of Porous Metal Materials Made by Stainless Steel Powder. *Powder Technology*, Elsevier, **217**, 383–387. https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2011.10.053.

49 Vinogradov, A., Yasnikov, I.S. and Estrin, Y. (2014) Stochastic Dislocation Kinetics and Fractal Structures in Deforming Metals Probed by Acoustic Emission and Surface Topography Measurements. *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics Inc., **115**. https://doi.org/10.1063/1.4884682/951712.

50 Fan, J.A., Yeo, W.H., Su, Y., Hattori, Y., Lee, W., Jung, S.Y., Zhang, Y., Liu, Z., Cheng, H., Falgout, L., Bajema, M., Coleman, T., Gregoire, D., Larsen, R.J., Huang, Y. and Rogers, J.A. (2014) Fractal Design Concepts for Stretchable Electronics. *Nature Communications 2014 5:1*, Nature Publishing Group, **5**, 1–8. https://doi.org/10.1038/ncomms4266.

51 Zeng, X., Jing, Q., Sun, J. and Zhang, J. (2023) Effect of Fractal Ceramic Structure on Mechanical Properties of Alumina Ceramic–Aluminum Composites. *Materials 2023, Vol. 16, Page 2296*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **16**, 2296. https://doi.org/10.3390/MA16062296.

52 Mitić, V. V., Chen, P.Y., Chou, Y.Y., Ilić, I.D., Marković, B. and Lazović, G. (2021) Fractal Nature Analysis in Porous Structured Bio-Ceramics. *https://doi.org/10.1142/S0217984921503188*, World Scientific Publishing Company , **35**. https://doi.org/10.1142/S0217984921503188.

53 Sapota, W., Szczepanik, P., Stach, S. and Wróbel, Z. (2020) Fractal and Multifractal Analyses of the Porosity Degree of Ceramics Used in Biomedicine. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, American Scientific Publishers, **12**, 450–456. https://doi.org/10.1166/ASEM.2020.2546.

54 Mitic, V. V., Lazovic, G., Lu, C.A., Paunovic, V., Radovic, I., Stajcic, A. and Vlahovic, B. (2020) The Nano-Scale Modified BaTiO3 Morphology Influence on Electronic Properties and Ceramics Fractal Nature Frontiers. *Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 3485*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **10**, 3485. https://doi.org/10.3390/APP10103485.

55 Han, X., Wang, B. and Feng, J. (2022) Relationship between Fractal Feature and Compressive Strength of Concrete Based on MIP. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **322**, 126504. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126504.

56 Li, D., Niu, D., Fu, Q. and Luo, D. (2020) Fractal Characteristics of Pore Structure of Hybrid Basalt–Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **109**, 103555. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103555.

57 Liu, Y., Dai, K., Li, D., Luo, M., Liu, Y., Shi, Y., Xu, J. and Huang, Z. (2021) Structural Performance Assessment of Concrete Components Based on Fractal Information of Cracks. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **43**, 103177. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103177.

58 Wang, L., Zeng, X., Yang, H., Lv, X., Guo, F., Shi, Y. and Hanif, A. (2021) Investigation and Application of Fractal Theory in Cement-Based Materials: A Review. *Fractal and Fractional 2021, Vol. 5, Page 247*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **5**, 247. https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT5040247.

59 Xue, C.H. and Ma, J.Z. (2013) Long-Lived Superhydrophobic Surfaces. *Journal of Materials Chemistry A*, The Royal Society of Chemistry, **1**, 4146–4161.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

https://doi.org/10.1039/C2TA01073A.

60 Zhang, D., Li, L., Wu, Y., Zhu, B. and Song, H. (2019) One-Step Method for Fabrication of Bioinspired Hierarchical Superhydrophobic Surface with Robust Stability. *Applied Surface Science*, North-Holland, **473**, 493–499. https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2018.12.174.

61 Lima, A.C. and Mano, J.F. (2015) Micro-/Nano-Structured Superhydrophobic Surfaces in the Biomedical Field: Part I: Basic Concepts and Biomimetic Approaches. *https://doi.org/10.2217/nnm.14.174*, Future Medicine Ltd London, UK , **10**, 103–119. https://doi.org/10.2217/NNM.14.174.

62 Zhang, M.Q. and Rong, M.Z. (2012) Theoretical Consideration and Modeling of Self-Healing Polymers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, John Wiley & Sons, Ltd, **50**, 229–241. https://doi.org/10.1002/POLB.22387.

63 Liu, M., Li, S., Fang, Y., Chen, Z., Alyas, M., Liu, J., Zeng, X. and Zhang, L. (2020) Mechanical and Self-Healing Behavior of Matrix-Free Polymer Nanocomposites Constructed via Grafted Graphene Nanosheets. *Langmuir*, American Chemical Society, **36**, 7427–7438. https://doi.org/10.1021/ACS.LANGMUIR.0C00971/SUPPL_FILE/LA0C00971_SI_001.PDF.

64 Lin, Y.J., Chuang, W.T. and Hsu, S.H. (2019) Gelation Mechanism and Structural Dynamics of Chitosan Self-Healing Hydrogels by in Situ SAXS and Coherent X-Ray Scattering. *ACS Macro Letters*, American Chemical Society, **8**, 1449–1455. https://doi.org/10.1021/ACSMACROLETT.9B00683/SUPPL_FILE/MZ9B00683_SI_001.PDF.

65 Kant, K. and Pitchumani, R. (2022) Fractal Textured Glass Surface for Enhanced Performance and Self-Cleaning Characteristics of Photovoltaic Panels. *Energy Conversion and Management*, Pergamon, **270**, 116240. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.116240.

66 Jain, R. and Pitchumani, R. (2017) Fractal Model for Wettability of Rough Surfaces. *Langmuir*, American Chemical Society, **33**, 7181–7190. https://doi.org/10.1021/ACS.LANGMUIR.7B01524/SUPPL_FILE/LA7B01524_SI_002.MPG.

67 Yu, C., Sasic, S., Liu, K., Salameh, S., Ras, R.H.A. and van Ommen, J.R. (2020) Nature–Inspired Self–Cleaning Surfaces: Mechanisms, Modelling, and Manufacturing. *Chemical Engineering Research and Design*, Elsevier, **155**, 48–65. https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2019.11.038.

68 Yang, Y., Ding, X. and Urban, M.W. (2015) Chemical and Physical Aspects of Self-Healing Materials. *Progress in Polymer Science*, Pergamon, **49**–**50**, 34–59. https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2015.06.001.

69 Wang, X.Y., Xie, X.M., Wang, L.Q., Su, J.F., Guo, Y.D. and Mu, R. (2020) Rheological Behaviour of Bitumen Blending with Self-Healing Microcapsule: Effects of Physical and Chemical Interface Structures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Elsevier, **586**, 124212. https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2019.124212.

70 Schlangen, E. and Sangadji, S. (2013) Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self Healing Mechanisms - Recent Advances in Self Healing Concrete and Asphalt. *Procedia Engineering*, No longer published by Elsevier, **54**, 39–57. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2013.03.005.

71 He, S.H., Ding, Z., Hu, H.B. and Gao, M. (2021) Effect of Grain Size on Microscopic Pore Structure and Fractal Characteristics of Carbonate-Based Sand and Silicate-Based Sand. *Fractal and Fractional 2021, Vol. 5, Page 152*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **5**, 152. https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT5040152.

72 Wang, Y., Zhang, T., Jing, L., Deng, P., Zhao, S. and Guan, D. (2020) Exploring Natural Palm Fiber's Mechanical Performance Using Multi-Scale Fractal Structure Simulation. *BioResources*, **15**, 5787–5800. https://jtatm.textiles.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_15_3_5787_Wang_Natural_Palm_Fiber_Mechanical_Performance.

73 Hu, X., Ben, L., Chen, Z., Yu, Z., Kai-hang, L. and Can-hao, Z. (2023) A New Mesoscopic Calculation Model of Chloride Ion Erosion in Recycled Coarse Aggregate Concrete (RAC): Characteristic Fractal Dimension of Pore Structure and Service Life Prediction. *Developments in the Built Environment*, Elsevier, **16**, 100282. https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2023.100282.

74 Lai, Y., Zhao, K., He, Z., Yu, X., Yan, Y., Li, Q., Shao, H., Zhang, X. and Zhou, Y. (2023) Fractal Characteristics of Rocks and Mesoscopic Fractures at Different Loading Rates. *Geomechanics for Energy and the Environment*, Elsevier, **33**, 100431. https://doi.org/10.1016/J.GETE.2022.100431.

75 Ren, Z., Tan, Y., Huang, L. and Xiao, S. (2023) Fractal and Multifractal Characteristics of Three-Dimensional Meso-Structure for Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, Elsevier,

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

384, 131429. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131429.

76 Zhan, J., Fu, B. and Cheng, Z. (2022) Macroscopic Properties and Pore Structure Fractal Characteristics of Alkali-Activated Metakaolin–Slag Composite Cementitious Materials. *Polymers 2022, Vol. 14, Page 5217*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 5217. https://doi.org/10.3390/POLYM14235217.

77 Wang, L., Tang, S., Wang, L. and Tang, & S. (2021) EDITORIAL: AN INTRODUCTION TO FRACTALS IN CONSTRUCTION MATERIALS, World Scientific Publishing Company , **29**, 2102001. https://doi.org/10.1142/S0218348X21020011.