



A review Article


Received: September 25, 2024

Accepted: October 9, 2024

Published: October 18, 2024

ISSN 2304-6295

# Factors influencing the mechanisms of self-healing of cementing materials. Review

Kirsanova, Tatyana Aleksandrovna<sup>1</sup> Chistyakov, Vladimir Anatolyevich<sup>2</sup> Hamid, Rahmani<sup>3</sup> Aramova, Olga Yurievna<sup>4</sup> Alliluyeva, Ekaterina Vladislavovna<sup>5</sup> 

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation; 89094001052@mail.ru

<sup>2</sup> Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Southern Federal University", Rostov-on-Don, Russian Federation; vladimirchi@yandex.ru

<sup>3</sup> University of Zanjan, Zanjan, Iran; hrahmani@znu.ac.ir

<sup>4</sup> Laboratory of Paleogeography of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation; aramova@sfedu.ru

Correspondence: \* email [89094001052@mail.ru](mailto:89094001052@mail.ru); contact phone [+79094001052](tel:+79094001052)

## Keywords:

Self-healing concrete, autonomous, autogenic, self-healing mechanism, urea, factor

## Abstract:

Concrete is a material in high demand in the construction industry for the creation of load-bearing structures. The weak point in the characteristics of concrete is the occurrence of microcracks. This article examines and evaluates the methods used to produce self-healing material, with a focus on factors affecting the mechanisms of autogenic healing and bacterial-based healing. Various parameters, including bacterial type, pH, temperature, nutrients, urea and Ca<sup>2+</sup> bacterial concentration and application, pre-cracking, healing conditions, cement type, and crack width, are all important for healing effectiveness, although the use of water to facilitate both the autogenic and ureolytic mechanism of bacterial healing is of paramount importance for starting the healing processes. This study presents in detail various factors and their relationship with the healing mechanisms of autogenic healing and healing by ureolytic bacteria.

## 1 Introduction

Материалы на основе цемента являются одними из самых популярных строительных материалов в мире благодаря своей доступности и универсальности. Несмотря на их множество плюсов, они подвержены растрескиванию из-за усадки, щелочно-кремнеземной реакции и коррозии арматуры в железобетоне.

Трещин в бетоне практически невозможно избежать, что вызывает серьезный износ конструкций. Бетонные сооружения чувствительны к различным физическим, химическим и биологическим воздействиям, включая перепады температур, воздействие агрессивных газов, влияние неблагоприятных погодных условий и химических веществ. Все эти факторы негативно сказываются на долговечности и прочности бетона, сокращая срок его службы и увеличивая расходы на ремонт.

Увеличение прочности и долговечности бетонных конструкций привело к минимизации расходов на дорогостоящий ремонт в течение всего срока службы. Одним из эффективных решений для повышения практичности бетона является его самовосстановление [1]. Методы заживления трещин требуют вмешательства извне, что затрудняет ремонт в труднодоступных

Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Hamid, Rahmani, Aramova, O.; Alliluyeva, E.

Factors influencing the mechanisms of self-healing of cementing materials. Review;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11309. doi: 10.4123/CUBS.113.9



местах, поэтому необходимо разработать новые технологии, позволяющие бетонным конструкциям «самозаживляться» без постороннего вмешательства.

Мочевина играет важную роль в процессе самовосстановления строительного материала. Биоминерализационное самовосстановление происходит путем возникающей реакции биоминерализации или, иными словами, микробиологического индуцированного осаждения карбоната кальция или биоцементации (БЦ) [1].

Процесс биоминерализации сопровождается выделением углекислого газа, который при наличии источника кальция преобразуется в карбонате кальция. Эта методика успешно применяется как в строительстве, так и в геотехнических областях.

Для сооружения конструктивных элементов чаще других строительных материалов используется бетон [1]. За счет данного обстоятельства бетон выступает в роли самого популярного строительного материала [2], [3], [4]. Бетон характеризуется высокой прочностью на сжатие, негорючестью и формруемостью, что идеально подходит для обеспечения гибкой конструкции с низкой стоимостью и высоким качеством [5].

Уязвимость бетона заключается в низкой прочности на растяжения, которая увеличивается при низких нагрузках. Следствием этого является растрескивание бетона. Образование микротрещин размером до 0.3 мм в бетоне неизбежно [6]. Эти микротрещины могут образовываться до или после затвердевания бетона.

Доступно несколько альтернативных способов для смягчения некоторых проблем, связанных с микротрещинообразованием поверхности бетона. Эти решения включают: впрыскивание раствора, пробуждающего самовосстановление бетона непосредственно в трещину с помощью насоса [7]. К следующему способу относится нанесение затирки эпоксидной смолой [8]. Одним из частоиспользуемых способов является увеличение размеров элементов [9] и, наконец, нанесение раствора на поверхность трещины. Общим знаменателем этих решений является предотвращение попадания любых новых вредных веществ в микроструктуру бетона и предотвращение дальнейшего вмешательства человека.

Для ремонта бетонных конструкций используется, в частности, диспергирование полимеров [10], волокон [11], бактерий [12], [13], [14], [15], [16], химических заживляющих средств [17], [18], [19] и минеральных добавок [20] внутри бетонной смеси для превращения бетона в самозатвердевающий материал [21], [22], [23].

Самовосстановление относится к тем видам заживления, в котором строительный материал способен восстанавливаться без вмешательства человека [24]. Самовосстановление является биомиметическим процессом, при котором механизм заживления имитирует механизм восстановления тканей живого организма [24].

В данной статье будет проведен обзор укоренившихся результатов исследований самовосстанавливающегося бетона и критически анализированных факторов, потенциально влияющих на свойства самовосстановления строительного материала. Также будет уделено внимание оценке методов, принятых авторами исследований в данной области для получения самовосстанавливающегося материала. Отдельно будет анализировано влияние типа бактерий, уровня кислотно-щелочного баланса, температуры, уреазной активности, уровня содержания кальция, питательных веществ, методов нанесения бактерий, типа цемента и условий, в которых проводится самовосстановление строительных материалов. Так же будет анализировано заживление трещин той или иной ширины. Будет исследовано влияние данных факторов и их связи с механизмами восстановления при аутогенном заживлении и заживлении с участием уреолитических бактерий. Также будут обозначены перспективные направления для будущих исследований в данной области, чтобы улучшить понимание точных механизмов самозаживления. Этот обзор может стать основой для проведения подобных исследований.

## 2 Materials and Methods

В период 2004-2024 гг. было опубликовано 108 исследований, посвященных исследованиям аутогенного восстановления бетона и восстановления бетона на основе бактерий; 11 из которых носят обзорный характер, а 97 статей исследовательского типа. Факторы, влияющие на эффективность биоцементации, также изучались во многих исследованиях.

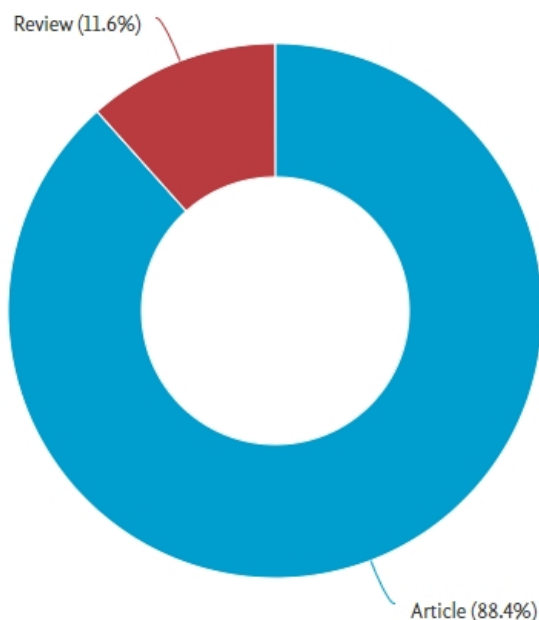
В этой статье рассматриваются и оцениваются методы, используемые для получения самовосстанавливающегося материала, с акцентом на факторы, влияющие на механизмы аутогенного заживления и заживления на основе бактерий. Различные параметры, включая тип

бактерий, pH, температуру, питательные вещества, концентрацию мочевины и ионизированного кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), бактерий и их применение, предварительное растрескивание, условия заживления, тип цемента и ширину трещины, важны для эффективности заживления, хотя использование воды для облегчения как аутогенного, так и уреолитического механизма заживления бактерий имеет первостепенное значение для запуска процессов заживления. В этом исследовании подробно представлены различные факторы и их взаимосвязь с лечебными механизмами аутогенного заживления и заживления уреолитическими бактериями.

Цель исследования заключается в обзоре факторов, влияющих на самовосстановление бетона, преимущественно аутогенного и бактериального способа заживления. Для реализации цели исследования необходимо решить ряд следующих задач:

1. Представить подробный метод поиска литературы и систематизации выявленных источников за определенный период.
2. Изучить механизм самовосстановления бетона.
3. Изучить факторы, влияющие на аутогенное заживление (возраст, предшествующий растрескиванию, условия заживления, тип цемента, ширина трещины).
4. Изучить автономные механизмы заживления (на основе сосудов, на основе капсул)
5. Изучить заживление с участием бактерий (механизм, тип бактерий, влияние кислотно-щелочного баланса, температура, питательные вещества, концентрация мочевины и ионов кальция, концентрация клеток, способы обработки и возраст бетона, предшествующий растрескиванию).

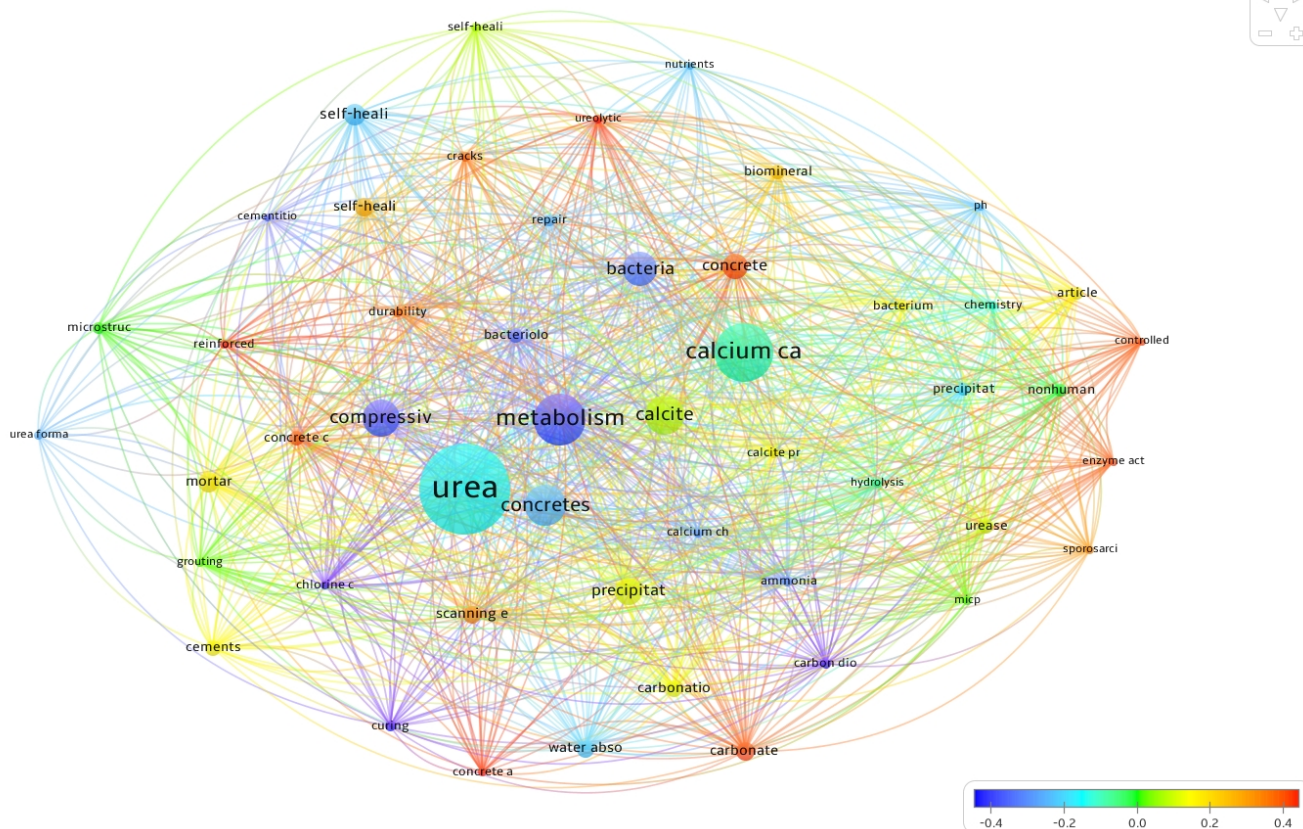
Данный раздел направлен на подробное описание методов проводимого обзора. В начале формулируются цели и задачи исследования. Поиск научной литературы проводится с использованием базы данных Scopus для сбора широкого спектра соответствующих работ. Используется сочетание релевантных ключевых слов «concrete AND selfhealing» и фраз, относящихся к теме исследования. Выбранные ключевые слова были подобраны, чтобы обеспечить максимально полный охват соответствующей литературы. Из ключевых слов отмечены «realistic mechanism», «autogenic mechanism», «concrete» «biomineralization», «self-healing materials», «self-healing concrete», «concrete construction», «self-healing» и «concretes». С учетом данных ключевых слов и фильтраций за выбранный интервал времени было найдено 108 статей исследовательского типа и 11 статей обзорного характера (рисунок 1).



**Fig. 1 - Analysis of sources by document type**  
**Рис. 1 – Анализ источников по типу документов**

Затем результаты поиска и фильтрации литературных источников подвергаются анализу с использованием программного обеспечения VOSviewer, которое позволяет создать визуальные представления о совпадении ключевых слов, авторов и публикаций в наборе данных (рисунок 2a

и 26).



**Fig. 2a - Analysis of search results data using VOSviewer software**  
**Рис. 2а - Анализ данных результатов поиска при помощи программного обеспечения VOSviewer**

Анализ данных в программном обеспечении VOSviewer позволил получить информацию о наиболее важных темах исследований, закономерностях и взаимосвязях между различными концепциями.

Результаты анализа были систематизированы для создания объемной картины литературного ландшафта, связанного с темой исследования. Объединенные результаты позволили нам определить ключевые тенденции исследований, влиятельных авторов и значительные группы связанных публикаций. Интерпретированные результаты анализа данных обсуждались в контексте целей исследования и существующей литературы. Результаты были критически проанализированы, чтобы сделать значимые выводы и определить потенциальные области для будущих исследований.

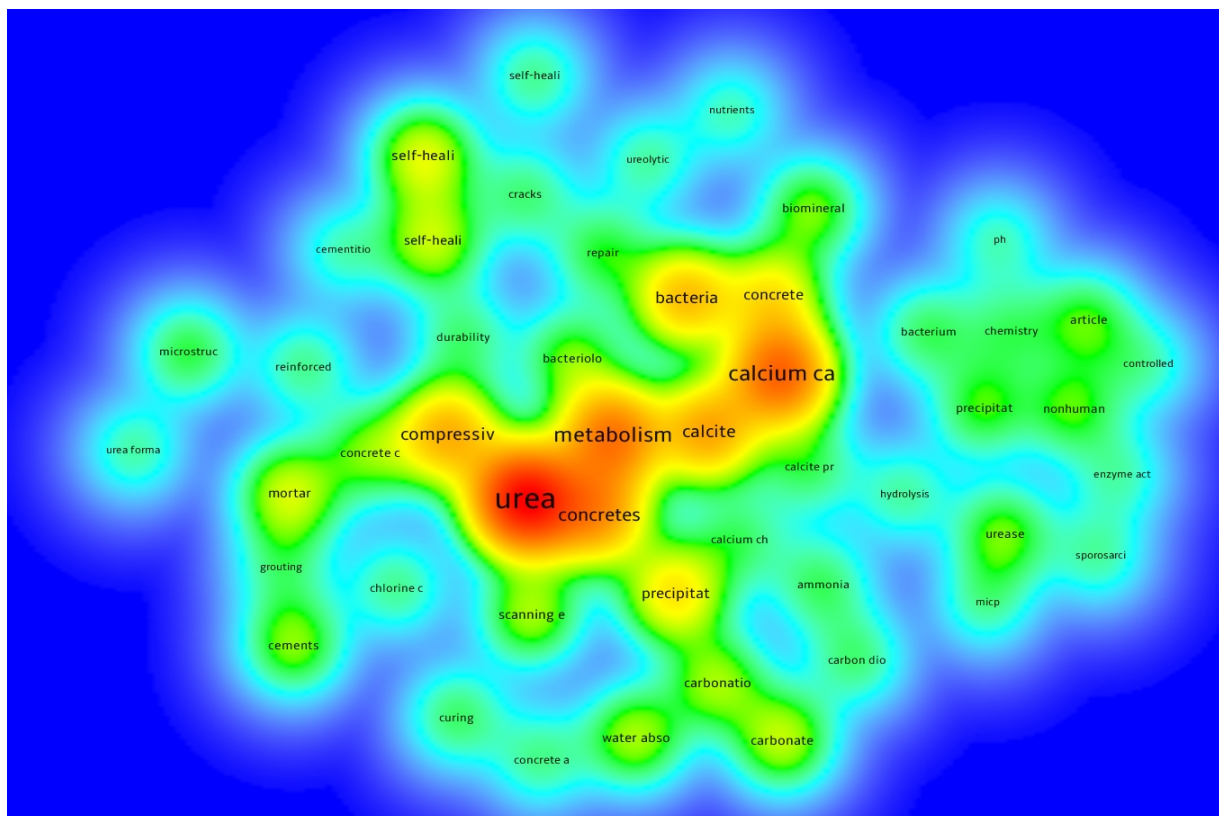


Fig. 2b - Analysis of search results data using VOSviewer software

Рис. 2 б- Анализ данных результатов поиска при помощи программного обеспечения VOSviewer

Этот методологический подход, позволяет обеспечить тщательное и систематическое изучение существующей литературы и заложить прочную основу для последующих этапов анализа и обсуждения.

### 3 Literature review

#### 3.1 Механизм самовосстановления строительных материалов

Инновационное и устойчивое развитие строительной отрасли не сходит с пути широкого использования бетона в качестве основного материала для создания несущих элементов.

Создание несущего бетонного конструктива ведет за собой выброс  $\text{CO}_2$  в окружающую среду, что негативно сказывается на экологии планеты. Использование самовосстанавливающегося бетона может значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду, а также снизить расходы на ремонтное восстановление бетонных конструкций и расходы на его демонтаж.

Согласно данным, на обычный портландцемент (ОПЦ) приходится 7% всех антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  [4]. Применение самовосстанавливающегося бетона представляет собой эффективное решение для сокращения этого показателя, так как позволяет избежать необходимости в избыточном производстве бетона с увеличением срока службы сооружений.

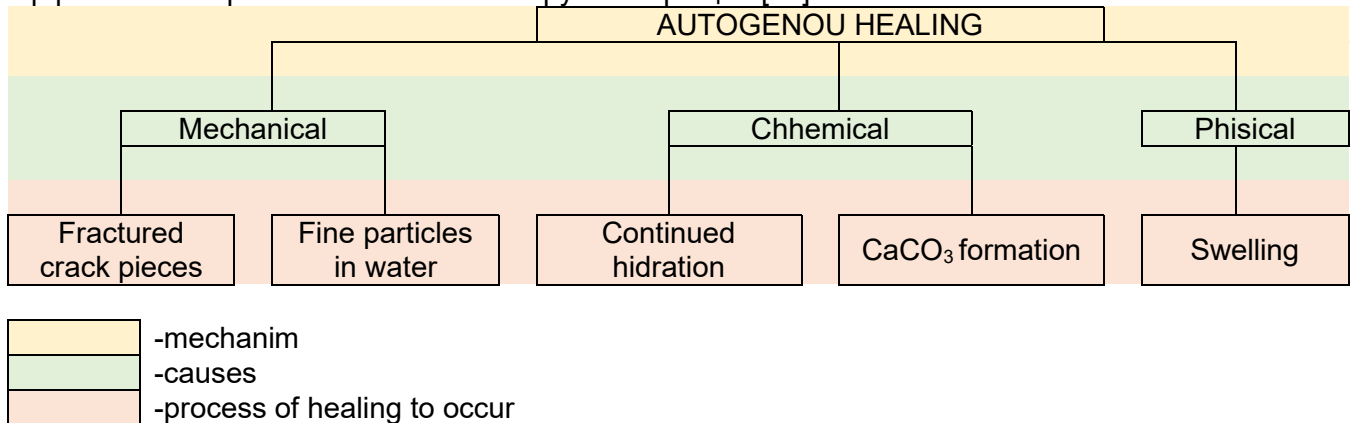
Обзор литературы о факторах, влияющих на аутогенное заживление и заживление с участием бактерий, направлен на выявление влияющих на самовосстановление аспектов, которые могут способствовать процессу заживления или негативно на него воздействовать. Это поможет лучше понять, как продвигаться в усовершенствовании процессов самовосстановления [24], [25].

Существует три причины возникновения процесса самовосстановления в бетоне, участвующих в четырех механизмах самовосстановления (рисунок 2) [24], [26].

Первый механизм заключается в набухании цементной матрицы, находящейся в области границ трещины. Данный механизм целесообразно отнести к механизму, имеющему физическую природу [24], [26]. Во время возникновения трещины происходит проникновение воды в бетон, где

она адсорбируется твердым цементным раствором [24]. Вода инициирует процесс самовосстановления, при котором высушенный цемент заполняет образовавшееся пространство, формируя гидратный гель. Данный механизм является недостаточно эффективным, потому что возникающее набухание матрицы препятствует дальнейшему проникновению воды и снижает проницаемость на 10 %. Данное обстоятельство исключает возможность заживления глубоких трещин.

Следующий механизм основан на непрерывной гидратации цементных частиц внутри матрицы цементного строительного материала. В процессе самозаживления после образования трещин, вода так же, как и в первом механизме, проникает вглубь матрицы и взаимодействует с безводным цементом, что приводит к расширению частиц. После набухания частиц с двух сторон трещины образуется мостиковое соединение. Такой механизм имеет химическую природу. Данный метод ограничен способностью заживлять трещины толщиной до 0.02 и является неэффективным при заживлении более крупных трещин [24].

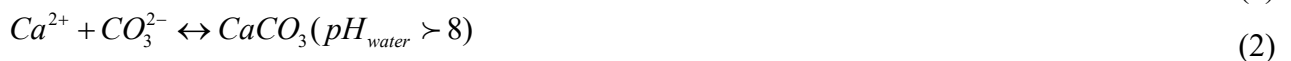


**Fig. 3 - The scheme of healing processes through the mechanics of an autogenic healing and their causes**

**Рис. 3 - Схема процессов заживления посредством механики анаутогенного заживления и их причины**

Данный механизм заключается в формировании карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), образование которого прослеживается в формулах 1-3. В основе данного процесса лежит механизм, зарождающий аутогенное заживление [24], [26], [27].

Ионы кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), в составе цемента, взаимодействуя с водой, проникающей через поры, и  $\text{CO}_2$ , выделяющимся в результате образования трещин, реагируют на образование карбонат-ионов ( $\text{Ca}_3^{2-}$ ). Доступные ионы  $\text{Ca}^{2+}$  затем реагируют с  $\text{CO}_3^{2-}$  в водной среде, что приводит к осаждению карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ). Реакции можно резюмировать следующим образом [27]:



Уравнения 1, 2 и 3 показывают образование  $\text{CaCO}_3$  на поверхностях трещин, что способствует постепенному их восстановлению.

Последний механизм обусловлен физическими причинами, связанными с внедрением мелкозернистых гранул в образовавшиеся трещины в строительных материалах или мелкодисперсных примесей, разбавленных в воде [24], [26], [27], [28]. Для активации данного механизма необходимо обеспечить достаточное давление воды для перемещения и равномерного расположения свободных частиц для эффективного заживления трещин. Следовательно, вероятность его срабатывания ниже в сравнении с другими механизмами.

### 3.2 Влияние возраста растрескавшегося бетона на механизмы самовосстановления

Старение материала оказывает значительное влияние не только на тип механизма самовосстановления, но и на возможности заживления [29], [30], [31], [32], [33], [34]. Данный аспект



подтверждается опытом, в котором в течении 6 месяцев образцы цемента с трещинами увлажняют и отверждают на протяжении 10 циклов [29]. Для увлажнения цемента образцы помещали в воду на 24 часа после чего высушивают в условиях комнатной температуры. Далее образцы отвержденного продукта извлекаются из трещин и исследуются при помощи энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭРС). В данных образцах содержится большое количество кальция, представленного кристаллами карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), что позволяет предположить, что в зрелых образцах образование  $\text{CaCO}_3$  способствует осуществлению самовосстановления.

Механизм самозаживления зрелых образцов бетона ( $\geq 28$  дней) в сравнении с молодыми ( $\leq 3$  дня) образцами показывает, что отвердевший продукт зрелых образцов преимущественно состоит из  $\text{CaCO}_3$ , тогда как у более молодых образцов, после 28 дней, 3 месяцев и 8 лет наблюдений, основным фактором заживления является продолжающаяся гидратация [30], [31].

Также на примере образцов цемента одинакового возраста выявлено, что основным продуктом заживления являются полиморфы  $\text{CaCO}_3$ , с наличием второстепенных продуктов гидратации, что было дополнительно подтверждено с помощью рентгенографического анализа, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и термогравиметрического анализа (ТГА) [32].

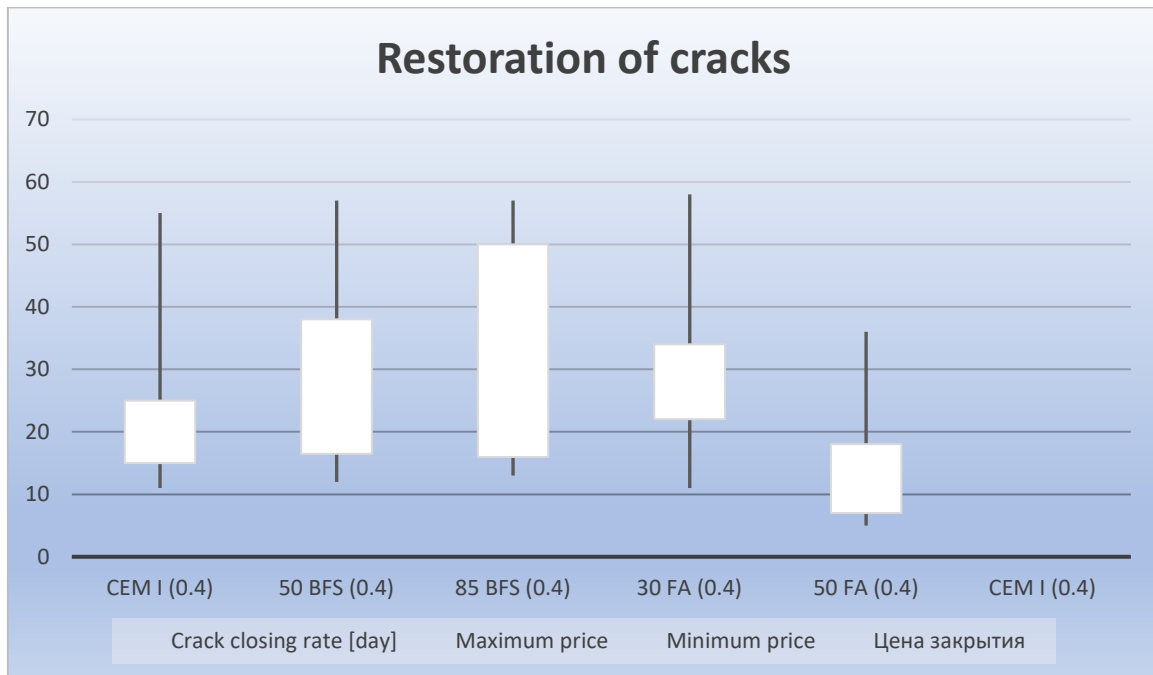
Некоторые образцы с трещинами за 3 дня показывают заживление из-за продолжающегося процесса гидратации [14]. Полученные данные объясняются тем, что с течением времени остается меньше непрореагировавших частиц цемента, доступных для реакции гидратации, следовательно, для зрелых образцов, выдержанных 28 дней и старше, заживление происходит за счет образования осадка  $\text{CaCO}_3$  [33], [34]. При повторной загрузке зрелых образцов, линии трещин распространялись по затвердевшему изделию [29], [35]. Как следствие, образуется более слабый  $\text{CaCO}_3$ , а не цементный гель, который, придает цементирующим материалам механические свойства. Статья [33] наглядно показывает, как контрольный заживление образцов 3-дневной давности смог восстановить примерно 62% своей первоначальной прочности, тогда как образцы 28-дневной давности смогли восстановить только 57% своей прочности. Аналогичным образом, возможно прослеживание и противоположной корреляции, когда по мере увеличения возраста образца до образования трещин, восстановленная прочность образца уменьшается [34].

При оценке механических характеристик прослеживается, что  $\text{CaCO}_3$  становится уязвимым после процесса заживления образцов [29].

В связи с недостаточными исследованиями в данной области необходимо провести дополнительные работы для более глубокого изучения механических свойств самовосстанавливающихся материалов в сравнении с нетронутыми участками бетона. В данной области прослеживается недостаток проведения наноструктурного тестирования затвердевших продуктов и цементной матрицы, с целью получения доказательств возможной слабости, которую вызывает  $\text{CaCO}_3$ .

### 3.3. Влияние типа цемента на процессы самовосстановления строительных материалов

Воздействие традиционного портландцемента (ОПЦ) на экологию задокументировано в ряде научных работ [36], [37], [38], [39], [40], [41], что связано с нарастанием углеродных выбросов и истощением природных ресурсов. В связи с этим, исследователи начали активно искать более устойчивые альтернативы, способные заменить ОПЦ с наименьшим негативным воздействием на окружающую среду. Одним из наиболее распространенных решений является использование золы-уноса [42], [43], [44] и доменного шлака [43], [44], [45] из-за их способности связываться с гидроксидом кальция, содержащимся в бетонной матрице. Рисунок 4 показывает положительное влияние содержания золы-уноса после 28 дней затвердевания при соотношении 4:10 воды к цементу. Увеличение содержания золы-уноса с 15 до 25% приводит к увеличению самовосстановления [42]. Увеличение процента замены ОПЦ с использованием другого типа цемента, такого как зола-унос на 50% и доменной шлак на 85%, приводит к снижению самозаживления, что сопровождается ослаблением механических свойств золы-уноса [42].



**Fig. 4 - Crack healing using various types of cement and its percentage**

**Рис. 4 - Заживление трещин с использованием различных типов цемента и его процентного содержания**

Альтернативные типы цемента, такие как зола-унос и доменной шлак, обеспечивают лучшее самозаживление из-за вызываемой ими замедленной гидратации. Наличие золы-уноса или доменного шлака не влияет на количество образующегося  $\text{CaCO}_3$  [43]. Благодаря высокому pH-балансу, который способствует образованию кристаллов карбоната кальция, доменный шлак превосходит золу-унос в сравнительных характеристиках [43], [44]. Тем не менее, экспериментальные исследования показали, что образцы с шириной трещин менее 0.50 мм способны восстанавливаться независимо от типа используемого цемента [46]. Исследования в области влияния различных заменителей цемента на процесс самовосстановления требуют более глубоких аналитических изысканий, чтобы определить степень их воздействия на механизмы заживления. Необходима разработка устойчивых альтернатив цементу, учитывая, что доменный шлак применяется всего на уровне 5-10%, а зола-унос — 3-5% от общего объема производства цемента, как показано на рисунке 4.

В процессе производства золы-уноса и доменного шлака наносится ущерб экологии. В условиях актуальной климатической чрезвычайной ситуации промышленным секторам необходимо искать альтернативы цементу, при производстве которого воздействие на окружающую среду минимизируется. Как показано на рисунке 5, использование рисовой шелухи в качестве заменителя цемента остается незначительным. Проблема заключается в ограниченной доступности отходов, что делает использование рисовой шелухи сложной задачей. Рисунок 5 также демонстрирует обилие запасов глины, которая является широко распространенным природным материалом, что позволяет использовать её в глобальном масштабе. Таким образом, сосредоточение исследований на глине как на экологически безопасном материале, способствующем процессам самовосстановления, представляется многообещающим направлением для будущих научных изысканий.



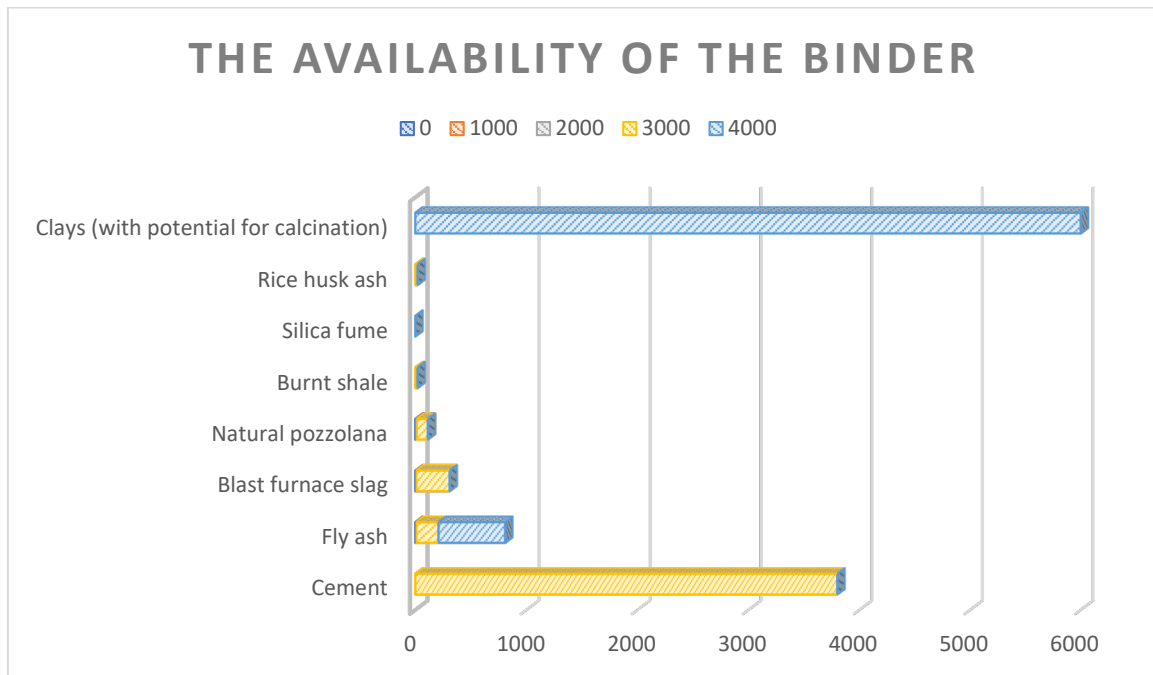


Fig. 5 - Availability of a binder for use in concrete

Рис. 5 - Доступность вяжущего материала для использования в бетоне

### 3.3 Автономные механизмы самовосстановления строительных материалов

Автономное заживление представляет собой процесс искусственного восстановления цементирующих материалов посредством добавления инородных компонентов в строительную смесь, которые способствуют самовосстановлению [24], [47], [48].

В качестве улучшенного механизма автономного заживления возможно рассмотреть аутогенное заживление, так как данный метод демонстрирует способность оперативного самовосстановления трещин (в т.ч. и более крупных), благодаря каталитическому воздействию сторонних элементов, инициирующих реакцию. Автономное самовосстановление можно разделить на три категории, как показано на рисунке 6.

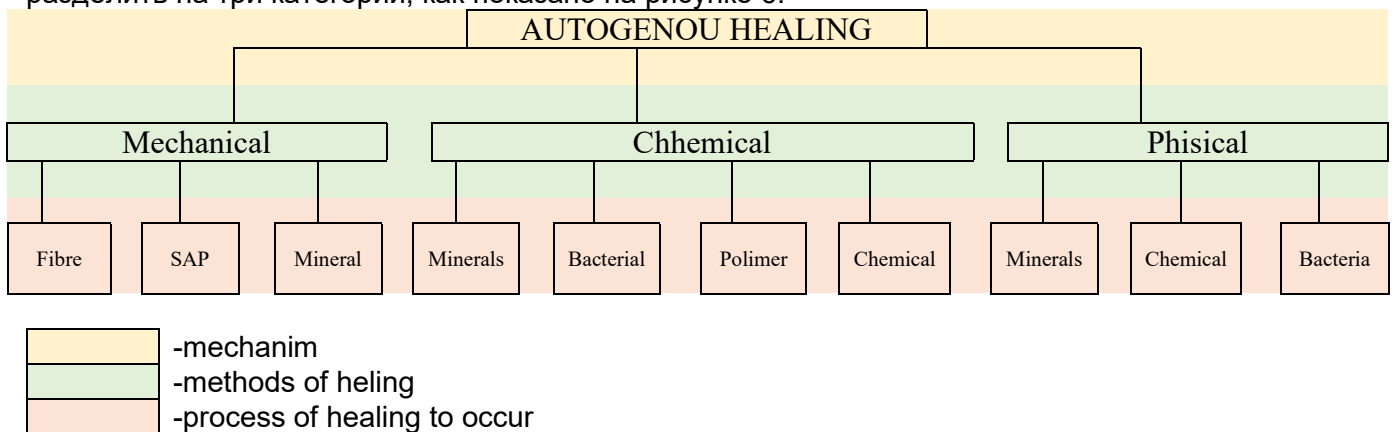


Fig. 6 - The scheme of autonomous healing mechanisms

Рис. 6 - Схема автономных механизмов заживления

### 3.4 Капсульное самовосстановление строительных материалов

Заживление на основе капсул является наиболее перспективным подходом из всех методов автономного заживления, обладающим большим потенциалом восстановления трещин и сохранения механических свойств [49], [50], [51]. Капсульное самовосстановление предполагает использование специальных оболочек для хранения заживляющего материала, что позволяет защитить его от преждевременной активации и негативного воздействия агрессивных сред. Эти капсулы выступают в качестве транспортного средства для восстанавливающего компонента, который проникает в бетонную матрицу, обеспечивая её способность к самовосстановлению.

Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Hamid, Rahmani, Aramova, O.; Alliluyeva, E.

Factors influencing the mechanisms of self-healing of cementing materials. Review;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11309. doi: 10.4123/CUBS.113.9



Системы капсульного заживления функционируют путём равномерного распределения капсул по цементной матрице. При образовании трещин капсула разрушается, высвобождая восстанавливающее вещество, что инициирует процесс заживления. Капсулы классифицируются на микрокапсулы (менее 1 мм) и макрокапсулы (более 1 мм). Разные размеры капсул могут влиять как на механические характеристики, так и на эффективность заживления, поскольку более крупные капсулы имеют меньшую вероятность равномерного распределения, однако содержат большее количество восстанавливающего вещества, что способствует более полному заживлению.

Существуют различные типы капсул такие, как стеклянные [12], легкий наполнитель [18], полиуретан [52], [53] карбамидоформальдегид [17], полимолочная кислота [54] и полистирол. Капсулы, используемые для самовосстановления, необходимы для обеспечения выдержки воздействия при перемешивании цементирующего материала с обеспеченной способностью разгерметизации восстанавливающего вещества при появлении трещин. Таким образом, капсула должна быть достаточно гибкой, чтобы выдерживать механическое воздействие при перемешивании состава и в то же время разрушаться при возникновении трещин, позволяя заживляющему веществу вытекать [54].

Применение тепла для повышения эластичности материала капсулы положительно сказывается на её долговечности в процессе смешивания бетона. В ходе экспериментов было выявлено, что 80 %, 90–100 % и 100 % полиметилметакрилата / бутилметакрилата, полистирола и полимолочной кислоты соответственно сохраняют свою целостность при смешивании. Однако после инъекции в бетон эти материалы, охлаждаясь, становятся хрупкими и подвержены разрушению при образовании трещин. Ключевыми параметрами капсульного материала являются его геометрия, толщина и диаметр, причём форма (сферическая или цилиндрическая) существенно влияет как на механические характеристики, так и на выживаемость капсул [54].

Эффективность самовосстановления линейно пропорциональна соотношению сторон [50]. С помощью экспериментальных данных обнаружено, что при увеличении соотношения сторон с 1 до 1.5 наблюдается снижение живучести на 30 % [56]. Таким образом возникает необходимость рассмотрения конструкции капсул для создания подходящей капсулы для самовосстанавливающегося применения.

Конструкция капсул играет ключевую роль в эффективной транспортировке и успешном заживлении восстанавливающих веществ. В таблице 2 представлены различные применяемые вещества. Силикат натрия зарекомендовал себя, как популярное средство для заживления (таблица 2) [17], [18], [19], [52], [53]. Такие параметры, как толщина оболочки, диаметр капсул, температура и скорость перемешивания микрокапсул влияют на процессы самовосстановления [17]. Увеличение дозы заживляющего вещества приводит к повышению скорости заживления; в частности, применение 5% раствора увеличивает модуль упругости на 11 % [17]. Повышенная вдвое концентрации силиката натрия с 2.5% до 5% способствует увеличению глубины заживления трещины за две недели и восстановлению 20–26% её исходной прочности [52].

Использование легкого наполнителя в виде силиката натрия позволяет восстановить 80 % прочности при изгибе, что сопровождается полным заживлением трещины шириной 0.135 мм и приводит к полному заживлению трещины [18]. Восстановление прочности примерно на 20% [19] и 26% при использовании 5% раствора силиката натрия свидетельствует о том, что эффективность процесса самовосстановления может варьироваться даже при применении одинакового заживляющего агента, что подразумевает возможное влияние иммобилизирующих материалов на результаты восстановления прочности в контексте оценки самовосстановления [52].

**Table 1. Overview of various capsule-based healing agents**  
**Таблица 1. Обзор различных средств заживления на основе капсул**

Оболочка	Заживитель	Концентрация	Результат	Ссылка
Мочевиноформальдегид	Щебень, гравий, керамзит (силикат натрия)	5 %	Модуль упругости (МУ) увеличивается на 11 % после растрескивания	[17]
Мочевиноформальдегид	Дициклопентадиен (ДЦПД)	0,25 %	МУ увеличивается на 30 % после растрескивания	[17]

Легкий наполнитель	Щебень, гравий, керамзит (силикат натрия)	-	Максимальная ширина ( $V_{max}$ ) заживления трещины 0,135 мм  Восстановлено 80 % первоначальной прочности при изгибе	[18]
Стекло	Щебень, гравий, керамзит (силикат натрия)	-	$V_{max}$ зажившей трещины 0.20 мм. Восстановлено 20 % нагрузки	[19]
Поливиниловый спирт (ПВА)	Гранулированный сульфоалюминат кальция	10 % от массы смеси	$V_{max}$ восстановившейся трещины 0.182 мм. Снижение водопроницаемости на 80 – 90 %	[57]
Практическое применение	Кристаллические добавки и гранулированный сульфоалюминат кальция	10 % гранулированного сульфоалюмината кальция и 5 % кристаллической добавки	$V_{max}$ заживления трещины 0.40 мм. Скорость прохождения воды снижается на 92 % через 56 дней	[20]
Полиуретан / карбамидоформальдегид с двойными стенками	Щебень, гравий, керамзит (силикат натрия)	2,5 % и 5 %	Эффективность заживление значительно повысилась на 23 % и 35 % при концентрации 2.5 % и 5 % соответственно	[52]
Полиуретан	Щебень, гравий, керамзит (силикат натрия)	-	Прочность при изгибе восстановлена на 20 – 26 % после образования трещин	[53]
Стекло	Полиуретан	-	67 % образцов с шириной трещины 0,10 мм восстановили почти на 100 %. 50 % образцов с трещинами 0,30 мм показали проникновение хлоридов, сравнимое с растрескавшимися образцами	[58]
Цементирующие трубчатые капсулы	Полиуретан	0,3 – 0,9 мл	Скорость заживления 35.9 % - 46,5 %	[59]

Применение дициклопентадиена в качестве химического отверждающего агента в концентрации 0.25 % способствует увеличению модуля упругости на 30 %, что почти в три раза превышает эффект использования 5 % силиката натрия [17]. Лучшая эффективность прослеживается относительно легкого наполнителя в сравнении с карбамидоформальдегидной оболочкой в части восстановлении механических характеристик, что объясняется межфазной связью между матрицей и содержанием капсулы, что может приводить к ослаблению структуры. В соответствии с данными таблицы 2, перспективным средством для самовосстановления являются гранулы сульфоалюмината кальция, обеспечившие 100%-ное восстановление трещин шириной до 0.182 мм за 16 дней, в то время как контрольные образцы проявили лишь 20–80 % восстановления за 28 дней [60].

Комбинация гранулы сульфоалюмината кальция с кристаллическими добавками способна заживить трещины шириной до 0.40 мм [20], что превышает результаты, полученные в статье [57] с использованием исключительно сульфоалюмината кальция. Таким образом, комбинация сульфоалюмината кальция и кристаллических добавок представляет собой более эффективный подход по сравнению с использованием силиката натрия. Кроме того, полиуретан часто



используется как самовосстанавливающее средство, при этом отмечаются успехи как в долговечности, так и в восстановлении механических свойств [53], [58], [59].

Полиуретан в макрокапсулах, используется с целью придать компоненту способность противостоять проникновению хлоридных сред в трещины. 67 % образцов с полиуретаном почти полностью восстанавливают устойчивость к проникновению хлоридов при ширине трещины 0.10 мм. Принимая во внимание, что после увеличения ширины трещины с 0.10 мм до 0.33 мм только в 33 % образцов отсутствует проникновение ионов до стеклянной трубки, при этом 50 % образцов способны продемонстрировать аналогичные результаты, что и в образцах с трещинами (отсутствие сопротивления) [61]. Использование микрокапсул большего диаметра (7.5 мм) с эпоксидным покрытием приводит к 50 %-ному восстановлению способности к изгибной нагрузке при первой повторной загрузке и 82 %-му восстановлению после второй повторной загрузки [62]. Разницу в восстановленной прочности объясняется упрочнением полиуретана, герметизирующего как трещину, так и микрокапсулу. При повторной разгрузке оставшейся неполимеризованный полиуретан можно использовать при вторичном заживлении, отсюда следует объяснение увеличению восстановленной прочности при изгибе. Это демонстрирует перспективу применения макрокапсул с полиуретаном для улучшения механических характеристик после процесса заживления, а также для возможности повторного заживления благодаря защитным свойствам содержимого, которое способно изолировать или герметизировать неактивированные заживляющие вещества внутри капсулы. Использование капсул представляет собой эффективный метод защиты заживляющего агента от преждевременной активации на этапе транспортировки в цементную матрицу, а в случае с бактериальными добавками – также от механических воздействий [63].

### 3.5 Сосудистое заживление строительных материалов

Сосудистая система заживления представляет собой метод, направленный на усовершенствование результатов автономного заживления, как проиллюстрировано на рисунке 5. Данный метод заключается в интеграции полых трубок в состав бетонной матрицы, что рассматривается, как биомиметический подход, имитирующий функционирование сердечно-сосудистой системы человека для транспортировки крови по организму [35]. В полые трубки предполагается закачивание заживляющего вещества, предназначенного для восстановления структуры бетона при возникновении трещин. При образовании трещин наполненные заживляющим веществом трубки активируются, в результате чего заживляющее средство проникает в трещину под действием капиллярного эффекта, что способствует её закрытию.

Заживление может происходить как пассивным, так и активным способами восстановления. Первый включает резервуар с заживляющими веществами, хранящийся вне бетонной матрицы, в то время как второй представляет собой герметичную полую трубку с заживляющим веществом без какого-либо внешнего резервуара [52]. Также в процессе восстановления предпринимаются попытки многократного заживления в активном режиме восстановления по сравнению с пассивным [53]. Данный подход требует определенной степени вовлеченности человека в процесс заживления для пополнения запасов активного вещества, что исключает его классификацию, как полностью самовосстанавливающий. Более того, после возникновения трещины и активации полых трубок, конкретная область их повреждения станет конечной точкой для распространения заживляющего агента. Это подчеркивает важность равномерного распределения трубок в бетоне для эффективного действия заживляющего вещества. Сосудистая система демонстрирует небольшое увеличение средней ширины трещины на 0.13 мм через 6 месяцев, в то время как модели на основе бактерий и контрольные образцы показывают незначительное уменьшение ширины трещин на 0.02 мм и 0.01 мм соответственно [54].

Механизм заживления сосудов характеризуется двумя системами: одноканальной и многоканальной. В первом случае используются однокомпонентные заживляющие вещества, такие как эпоксидная смола или цианоакрилат. Одноканальные системы могут заживлять трещины размером до 0.30 мм [57], [64], [65], [66].

В отличие от одноканальной системы вторая требует взаимодействия двух химических заживляющих агентов. Для этого необходимо создать две отдельные сети, транспортирующих заживляющие вещества, которые смешиваются для инициирования процесс заживления трещины. Одним из наиболее распространённых многокомпонентных заживляющих средств является метакрилат [57], [64], [65], [66]. Выбор заживляющего агента для сосудистой системы

Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Hamid, Rahmani, Aramova, O.; Alliluyeva, E.

Factors influencing the mechanisms of self-healing of cementing materials. Review;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11309. doi: 10.4123/CUBS.113.9



самовосстановления основывается на его низкой вязкости, что обеспечивает лёгкое проникновение в трещины, а также на его химической реакционной способности, смачиваемости и стабильности [35], [56], [57], [60].

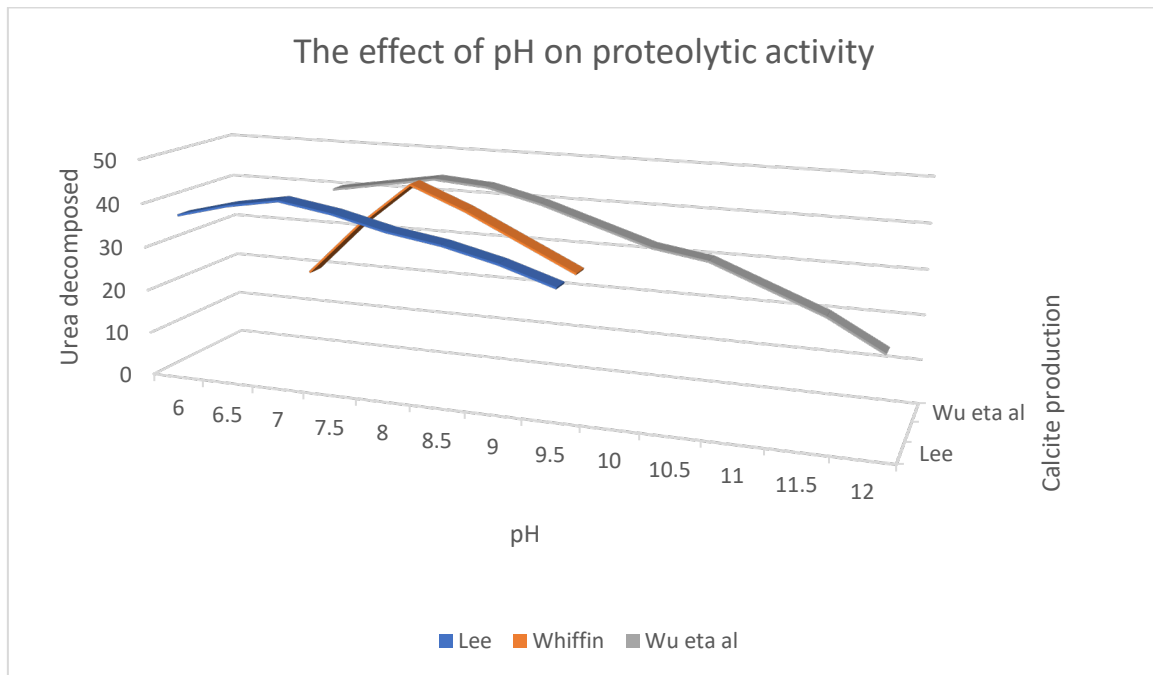
Эффективность различных химических заживляющих средств на основе нескольких параметров, а именно, цианоакрилаты являются подходящими заживляющими средствами из-за их низкой вязкости, что позволяет иметь большую вероятность проникновения в трещины и ремонтные свойства [62], [63], [67].

Срок службы цианоакрилатов составляет примерно 1 год, в дополнение к быстрому отверждению в 1 минуту [60], что затрудняет работу с ними на месте [68]. Это неблагоприятно сказывается на строительных материалах, поскольку приблизительный срок службы конструкций составляет более 50 лет, поэтому выбранный отвердитель должен быть стабильным и пригодным для длительного использования из-за появления трещин в любой момент в течение срока службы [69]. Метилметакрилат гарантированно остается стабильным в течение 10 лет, а опыт использования этого химического вещества в промышленности составляет 40 лет. Другим распространённым многокомпонентным агентом является дициклопентадиен, который не вступает в реакцию с влагой и активируется исключительно при контакте с катализатором Граббса. Многокомпонентные системы демонстрируют более высокую стабильность по сравнению с однокомпонентными сосудистыми системами, поскольку их эффективность обусловлена определённой смесью химических веществ. Внедрение многоканальных систем может привести к утечкам заживляющих агентов и неполному смешиванию химических веществ, что потенциально снизит общую эффективность системы [55], [70], [71].

Сосудистые модели заживления представляют собой эффективный метод доставки восстанавливающего вещества по цементирующей матрице. Однако из-за проблем, связанных со стабильностью химических компонентов и внедрением сосудистых систем в реальных условиях, что может представлять собой существенные трудности, целесообразно провести дополнительные исследования, направленные на более объемное тестирование для оценки применимости этих моделей.

### **3.6 Влияние pH на условия самозаживления строительных смесей**

Цементирующие материалы создают неблагоприятные условия для роста и выживания бактерий. Повышение pH приводит к снижению активности бактерий [16], [72], [73]. Активность уреазы, зависит от уровня pH, когда заживление осуществляется через ферментативный уреолит [72], [74]. Повышение pH с 7 до 12.5 приводит к значительному снижению уреолитической активности по сравнению с инкапсулированными бактериями [16]. Увеличение pH выше 8 связано со снижением активности уреазы и, следовательно, с уменьшением образования кальцита (рисунок 7) [23], [75], [72]. Данное обстоятельство говорит о том, что бактерии нуждаются в капсулировании и защите, чтобы оставаться жизнеспособными в бетонах, характеризующихся pH выше 8.



**Fig. 7 - The effect of pH on proteolytic activity in terms of urea decomposition and calcite production (The orange and blue lines represent the effect of pH on urea decomposition, the gray line represents the effect of pH on calcite production)**

**Рис. 7 - Влияние pH на уреолитическую активность с точки зрения разложения мочевины и производства кальцита (Оранжевая и синяя линии представляют влияние pH на разложение мочевины, серая линия представляет влияние pH на производство кальцита)**

### 3.7 Влияние температуры на реакции самовосстановления в строительных материалах

Температура является ключевым фактором, оказывающим влияние на механизмы заживления, связанные с бактериальными восстановительными агентами. Как показано на рисунке 8, температурные условия непосредственно сказываются на активности уреазы. Бактерии содержат фермент уреазу, катализирующий гидролиз мочевины. Данный процесс сильно зависит от температурных параметров. Активность роста бактерий достигается при увеличении температуры, достигая оптимума приблизительно при 69 °C [23], [76].

Температура влияет благоприятно на активность бактерий в интервале от 10 °C до 40 °C (рисунок 8) [23], [76], [77], [78], [79], [80]. Эффективность бактерий при различных температурах варьируется в зависимости от конкретного вида; психрофильные бактерии способны эффективно размножаться в относительно холодных условиях (от -20 °C до 20 °C), а гипертермофильные организмы предпочитают более высокие температурные условия (от 88 °C до 106 °C) [81].

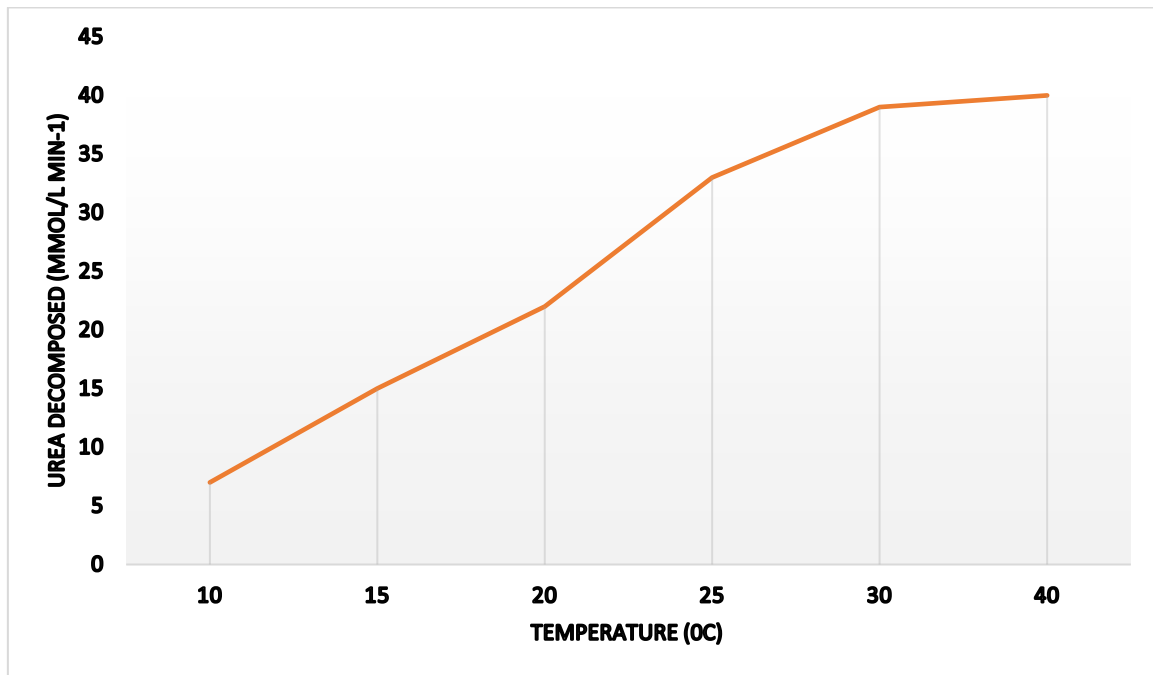


Fig. 8 - The effect of temperature on the decomposition of urea

Рис. 8 - Влияние температуры на разложение мочевины

### 3.8 Влияние питательных веществ на процессы заживления самовосстанавливающихся строительных материалов

Питательные вещества играют ключевую роль в самовосстанавливающихся цементных материалах, так как они содержат микроорганизмы, которые служат субстратом для роста и размножения бактерий, способных синтезировать карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), необходимый для процесса заживления. На рисунке 9 представлена разнообразная морфология, достигаемая при использовании различных источников кальция для получения  $\text{CaCO}_3$ . Нитрат кальция и лактат кальция приводят к образованию  $\text{CaCO}_3$  в сферической и ромбоэдрической формах с небольшими размерами частиц [82], [83], [84]. Оба источника кальция на рисунке 9 показывают схожую морфологию кристаллов  $\text{CaCO}_3$ , зафиксированную при помощи СЭМ. Хлорид кальция способствует образованию ромбоэдрических кристаллов со строгими гранями и гладкой поверхностью, а текстура ацетата кальция не имеет закономерностей и носит хаотичный характер [83].

Из лактата кальция образуются самые крупные кристаллы, а ацетат кальция занимает второе место по размеру. Приведенные данные подтверждены проведенной микроскопией с использованием СЭМ для анализа морфологии кристаллов [72], [74].

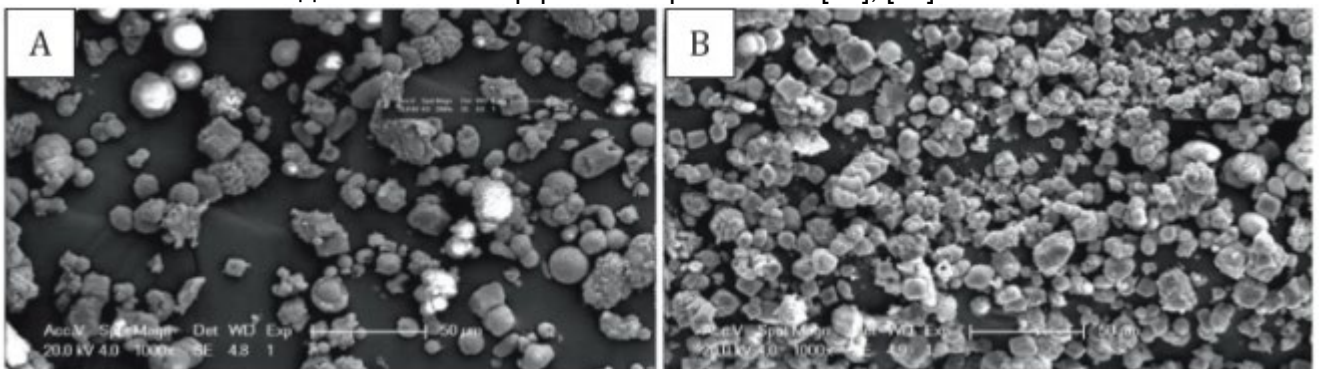


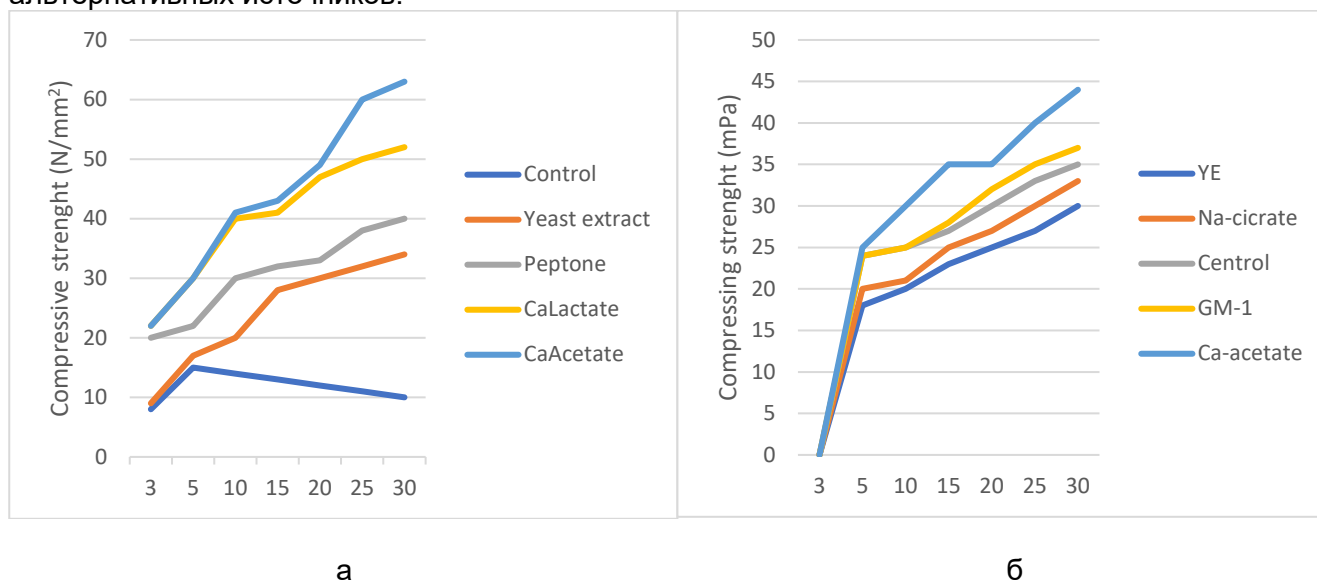
Fig. 9 - Electron microscope scanning images of calcite crystal morphology using various calcium sources: a) calcium nitrate and b) calcium lactate [87] Copyright 2020 Elsevier B.V.

Рис. 9 - Изображения сканирования электронного микроскопа морфологии кристаллов кальцита при использовании различных источников кальция: а) нитрата кальция и б) лактата кальция [87] Авторское право 2020 Elsevier B.V.

Выбор источника кальция (предшественников) для синтеза  $\text{CaCO}_3$  в бетоне является определяющим фактором. На графике 10 представлено влияние различных прекурсоров на прочность на сжатия бетонных образцов [4]. Включение 1% лактата кальция повлекло умеренное увеличение прочности на сжатие на 20.75% по сравнению с контрольным образцом. Применение пептона, оказало менее благоприятное воздействие на прочность бетона (рисунок 10а).

В качестве источника кальция используется лактат кальция из-за его свойства не оказывать негативных и разрушающих воздействий на бетон [14], [33]. Но превышение концентрации лактата кальция более 1% негативно сказывается на прочности на сжатие [83]. Прочность на сжатие и прочность на изгиб увеличиваются с 18% и 12% соответственно по сравнению с контрольным образцом при использовании ацетата кальция в качестве предшественника (график 10б) [84].

На графике 10а ацетат кальция продемонстрировал снижение прочности на сжатие [4], такие результаты могут быть связаны с различиями в концентрациях использованных прекурсоров. Для всесторонней оценки их воздействия на свойства бетона необходимо провести дополнительные исследования с использованием других кальциевых предшественников и более экономичных альтернативных источников.



**Fig. 10 - The effect of various precursors used in MICP on the compressive strength of the sample depending on the curing time**

**Рис. 10 - Влияние различных прекурсоров, используемых в MICP, на прочность при сжатии образца в зависимости от времени отверждения**

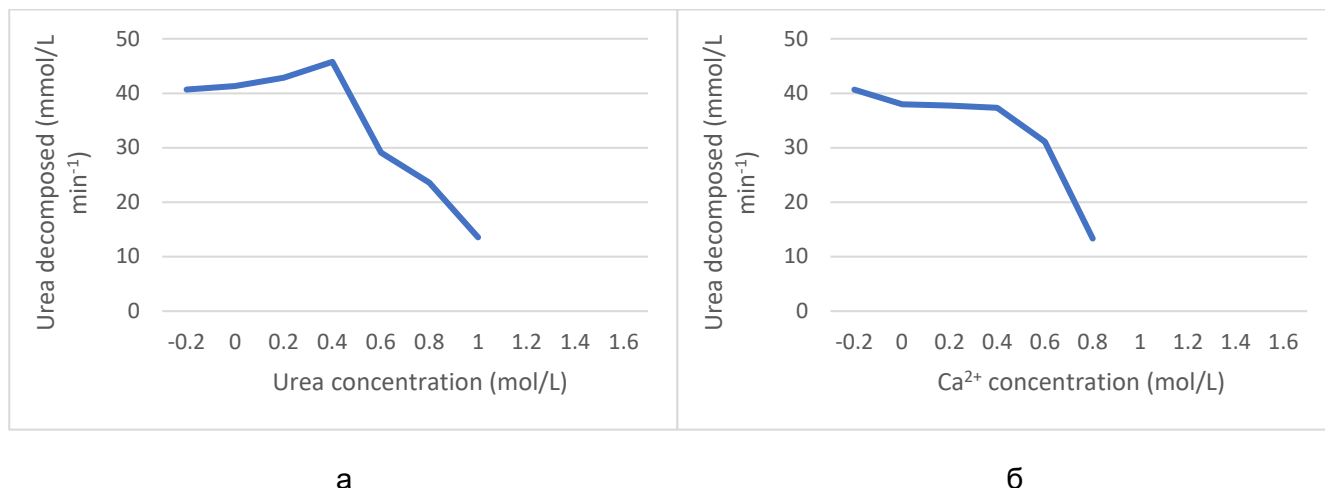
### 3.9 Роль концентрации мочевины и $\text{Ca}^{2+}$ в процессах самовосстановления строительных материалов

Возможная биохимическая реакция, связанная с участием бактерий в синтезе  $\text{CaCO}_3$ , осуществляется с помощью фермента уреазы. В ходе гидролиза мочевины образуется один моль аммония и карбоната, что играет ключевую роль в уреолитической активности бактерий и влияет на их способность осаждать карбонат кальция.

Повышение концентрации мочевины приводит к снижению активности бактерий (рисунок 11а) [85], [86], [87]. Отмечается тенденция уменьшения разложения мочевины при увеличении её концентрации с 90 г/л до 180 г/л при уровне клеток  $10^5$  клеток/мл. Данные концентрации должны обеспечивать оптимальные механические свойства [87].

Оптимальная концентрация мочевины в зависимости от концентрации клеток составляет 0.60–0.80 М, что подтверждается лабораторными данными [23], [87], [88]. Более высокая плотность бактериальных клеток способствует эффективному разложению мочевины, не препятствуя её гидролизу. Однако при снижении концентрации бактериальных клеток до  $10^7$  клеток/мл и превышении уровня мочевины 1.5 М наблюдается снижение количества разложенной мочевины [89]. Избыточное количество мочевины негативно влияет на уреолитическую активность [87]. Одним из возможных объяснений данного явления служит то, что бактерии имеют лимитированное количество мочевины, которое может подвергаться гидролизу; при превышении этого предела их эффективность снижается [89].





**Fig. 11 - The effect of different (a) urea and concentration (b) Calcium ion concentrations on the decomposition of urea**

**Рис. 11 - Влияние различных (а) мочевины и концентрации (б) Ион кальция концентрации на разложение мочевины**

Концентрация ионов кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) является одним из главных критериев в процессе самовосстановления. Увеличение концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  с 0.025 М до 0.25 М приводит к более чем 100% увеличению образовавшегося  $\text{CaCO}_3$  [88]. Данный эффект наблюдается независимо от уровня мочевины. При более низких концентрациях  $\text{Ca}^{2+}$  отмечается выраженное разложение мочевины по сравнению с высокими значениями, такими как 1.2–1.5 М (график 11 б) [23].

Увеличение концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  свыше 0.5 М приводит к снижению разложения мочевины, указывая, что 0.5 М является оптимальным уровнем для  $\text{Ca}^{2+}$  [87].

На рисунке 11б изображена отрицательная корреляция между ростом концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и разложением мочевины. Это может быть связано с потенциальной токсичностью избытка  $\text{Ca}^{2+}$  для бактерий, так как они требуют лишь ограниченного количества данного элемента. Дополнительно, в области трещины может присутствовать лишь 0.02 М  $\text{Ca}^{2+}$  из-за растворенного гидроксида кальция [89], что подчеркивает важность отбора бактерий для достижения высокой устойчивости к  $\text{Ca}^{2+}$ .

### 3.10 Влияние концентрации клеток на процессы самовосстановления строительных материалов

Концентрация бактерий в клетках является критическим параметром, который воздействует на способность цементирующих материалов к процессам самовосстановления. В таблице 2 показано влияние концентрации элементов на прочность бетона и его механические характеристики. Бактерии *Shewanella* при концентрациях  $10^3$ ,  $10^5$  и  $10^7$  клеток/мл увеличивают прочность при сжатии от  $10^3$  до  $10^5$  клеток/мл после 28 дней отверждения [13]. Это увеличение прочности указывает на наличие внутреннего заживления, инициируемого бактериями в бетонной матрице.

**Table 2. Review of the effect of bacterial cell concentration on self-healing**  
**Таблица 2. Обзор влияния концентрации бактериальных клеток на самовосстановление**

Бактерии	Концентрация (клетки/мл)	Кол-во дней заживления	Прочность	Ссылка
<i>B. Sphaericus</i>	$10^3$	21	> на 20,8%	[90]
	$10^5$		> на 37,5%	
	$10^7$		> на 33,3%	
<i>B. Pseudofirmus</i>	$6 \times 10^8$	28	< на 10%	[4]
<i>B. Pasteurii</i>	$7.6 \times 10^3$		> на 18%	[72]
	$7.6 \times 10^5$		Не меняется	
<i>Shewanella</i>	$10^3$		Не меняется	[13]
			> на 9.8%	



	$10^5$		> на 25.3%	
	$10^7$		> на 11.1%	
S. Pasteurii	$10^3$		Увеличение на 4,2%	[91]
	$10^5$		> на 16.7%	
	$10^7$		> на 8.3%	
B. Aerius	$10^5$		> на 72.7%	[90]

При достижении концентрации  $10^7$  клеток/мл зафиксировано снижение прочности [13], [92], [90]. В образце с концентрацией  $7,6 \times 10^3$  клеток/мл наблюдается повышение прочности, а при концентрации  $7,6 \times 10^7$  клеток/мл никакого эффекта на прочность не отмечено [72]. Вероятная причина расхождения результатов заключается в различии типов используемых бактерий, что также существенно влияет на их способность к заживлению. Оптимальная концентрация клеток для достижения процесса самовосстановления, не оказывает негативного влияния на прочность материала и составляет  $10^5$  клеток/мл, независимо от типа бактерий [13], [90]. Увеличение прочности объясняется активностью бактерий, способствующей образованию осадков  $\text{CaCO}_3$ .

### 3.11 Эффект обработки

Применение бактерий существенно влияет на процессы самовосстановления цементирующих материалов. Способ введения бактерий в бетонную матрицу определяет эффективность процессов [4]. Прямое добавление бактерий в состав бетона приводит к снижению образования  $\text{CaCO}_3$  [4]. Это объясняется снижением жизнеспособности бактерий, вызванным механическими воздействиями при перемешивании цементной смеси и высоким щелочным pH [4]. Возникает необходимость разработки методов защиты бактерий от неблагоприятного воздействия на них при перемешивании [4], [10]. Для повышения жизнеспособности бактерий рассматриваются различные подходы к инкапсуляции с использованием пористых материалов, таких как легкие заполнители [15], графеновые наночастицы (ГНЧ) [14], нано/микрочастицы оксида железа [36], гидрогели [93], диатомит [16], керамзит [3], [10], [15], вспененный перлит [3] и натуральные волокна [93]. Применение данной стратегии способствует увеличению ширины заживаемых трещин, независимо от типа герметизирующего пористого материала [3], [14], [33], [34].

С увеличением периода отверждения количество жизнеспособных бактериальных клеток уменьшается приблизительно на 83.33% [4], что указывает на трудности выживания значительной доли клеток. Возможное объяснение данного снижения объясняется снижением жизнеспособности бактерий в зависимости от размера бактериальных клеток (от 1 до 3 мкм) и диаметром пор в цементной матрице, который составляет около 0.5 мкм [94]. По мере отверждения микроструктура цементирующего материала становится более плотной, что уменьшает размеры доступных пор [94]. При увеличении количества дней отверждения микроструктуры образца становятся более плотными [14], [33], [34]. Так же по мере продолжения процесса гидратации микроструктура развивается и подвергается уплотнению, а размеры пор уменьшаются, что вызывает одноосную нагрузку на бактерии и приводит к их раздавливанию [93]. В результате бактерии становятся бесполезными и неспособными индуцировать выпадение осадка  $\text{CaCO}_3$ , тем самым снижая способность образца к самовосстановлению.

### 3.12 Влияние возраста материала на процессы самовосстановления

Возраст до образования трещин оказывает значительное влияние на механизм заживления цементных материалов (Таблица 3). Наблюдается тенденция, согласно которой с увеличением возраста образцов, предшествующего растрескиванию, эффективность заживления и восстановление прочности постепенно снижаются. Наблюдается явная тенденция в механизме самовосстановления; по мере старения образца, его способность к восстановлению трещин ухудшается. В трёхдневный период предварительного растрескивания возможно более эффективное заживление широких трещин по сравнению с образцами, которые находились в состоянии растрескивания в течение 28 дней. Трещины в образцах, предварительно растрескавшихся за 3 дня, заживали на 1.2 раза шире, чем в образцах, подвергнутых растрескиванию на протяжении 28 дней [14]. Также зафиксировано увеличение заживления примерно в 1.8 раза при сравнении молодых и зрелых образцов [94].



В то же время, более зрелые образцы демонстрируют большую доступность непрореагировавших частиц цемента, которые могут активизировать процесс гидратации и способствовать закрытию более широких трещин [31]. Одним из объяснений данного феномена является длительный период отверждения у зрелых образцов, что приводит к уменьшению количества пористых пространств в матрице [34]. Эти пространства могут вызывать преждевременное повреждение капсул, что делает бактерии неактивными и снижает их способность к восстановлению.

Также увеличение возраста, предшествующего растрескиванию, может способствовать расширению трещин, подлежащих восстановлению. Это явление объясняется улучшенным равномерным распределением бактерий и повышенной защитой материала-носителя [34].

**Table 3. A review of the literature on the effect of pre-cracking**  
**Таблица 3. Обзор литературы о влиянии предварительного растрескивания**

Тип капсулы	Толщина трещины (мм)	Дни до образования трещин	Восстановленная прочность (%)	Ссылка
Легкий наполнитель	0.63	3	-	[14]
	0.59	14		
	0.51	28		
Нано/микрочастицы оксида железа	-	3	60	[36]
		28	46	
Без инкапсуляции	-	3	87	[95]
		28	47	
Переработанный крупный наполнитель	0.44	3	76	[35]
	0.70	28	73	
Натуральные волокна	0.70	7	-	[94]
	0.40	28		

### 3.13 Возраст материала, как фактор в процессе самовосстановления

Условия заживления играют ключевую роль в способности к самовосстановлению и повышению прочности бетонов. Наличие воды является важным аспектом для осуществления процесса самовосстановления [10], [15], [99]. Микроорганизмы в виде спор не способны развиваться и делиться без достаточного количества воды и питательных веществ [10]. При 95%-ной относительной влажности изменения в размере трещины не происходят даже после 56 дней заживления [10]. Наличие воды необходимо для активации механизмов и бактериального и аутогенного заживления. Эффективным способом заживления, способствующим самовосстановлению образцов, служит метод погружения в воду [10], [15], [94], [100]. Данные в таблице 6 демонстрируют, что такой подход способствует ускоренному восстановлению трещин шириной от 0.45 мм до 0.97 мм. На различия в результатах, полученных в равных условиях, влияет концентрация бактерий, их тип, характер применения и возраст образца до возникновения трещин. Увеличение времени заживления приводит к уменьшению ширины трещин [14], [34], [96].

Метод погружения в воду является более эффективным по сравнению с условиями заживления в среде, созданной на основе нитрата кальция и мочевины для ускорения процесса заживления [10]. Хотя циклы увлажнения и высыхания в воде или во влажной среде не соответствуют стандартам погружения в воду (таблица 6), этот метод остается единственным, который имитирует условия, с которыми сталкиваются цементирующие компоненты. Учитывая необходимость применения в водоудерживающих конструкциях, это подчеркивает потенциал использования бактерий в таких объектах, как плотины, пирсы и морские дамбы.

**Таблица 6. Обзор условий заживления, используемых в литературе**  
**Table 4. Review of the healing conditions used in the literature**  
**Таблица 4. Обзор условий заживления, используемых в литературе**

Условия отверждения	Ширина восстановленной (мм)	Дни заживления	Ссылка
95% относительной влажности	0	56	[10]
Погружение в воду	0.85-0.97		



Среда погружения	0.33-0.40		
Вода	0.54-0.60		
Влажная среда	0.28-0.29		
Погружение в воду	0.46	100	[15]
Погружение в воду	0.48	56	[76]
Погружение в воду	-	21	[91]
Погружение в воду	0.2	20	[97]

## 4 Conclusions

Данный обзор объединяет различные параметры, влияющие на механизмы самовосстановления цементирующих материалов, с акцентом на различные способы стимулирования механизмов аутогенного и бактериального заживления. Понимание этих параметров может способствовать разработке самовосстанавливающихся цементирующих материалов нового поколения. Для более эффективной разработки современных самовосстанавливающихся бетонов следует рассмотреть следующие неотложные вопросы.

Как аутогенные, так и бактериальные механизмы заживления не могут быть запущены без присутствия воды, что делает воду решающим фактором для начала самовосстановления. Это требует совершенствования процесса самовосстановления, который не зависит от наличия воды, так как её наличие в необходимых количествах для эффективного заживления не всегда может быть обеспечено, и как следствие, трещины в материале могут сохраняться. Таким образом, задача разработки метода, при котором влажность воздуха может активировать этот механизм, представляется более перспективной.

Использование сосудистых и капсульных систем является многообещающим направлением для создания самовосстанавливающихся цементирующих материалов. Сосудистые системы позволяют стратегически располагать заживляющие вещества в окрестностях трещин и обеспечивать их доступность на больших площадях для процесса заживления. Капсульные технологии также способствуют более эффективному восстановлению, благодаря оптимизированному размеру и дозировке заживляющих агентов: микрокапсулы обеспечивают равномерное распределение, тогда как макрокапсулы демонстрируют обнадеживающие результаты при использовании более крупных капсул с большей нагрузочной способностью. Это может привести к повторному заживлению и повышенной вероятности разрушения после возникновения трещин. В целом, оба подхода имеют свои преимущества и ограничения, и для создания эффективных сосудистых и капсульных систем для самовосстановления необходимо учитывать эффективность, зависящую от конструкции, типа заживляющего средства, дозировки, размера трещин и их расположения.

Самовосстановление цементирующих материалов с использованием бактерий может быть улучшено за счет контроля возраста образцов перед растрескиванием, подачи воды, регулируемой ширины трещины, концентрации бактерий и иммобилизации. Однако отсутствие стандартизированных методов и измерения процесса самовосстановления привело к различиям в результатах экспериментов. Следовательно, критически важно разработать стандартизированный метод и инструменты для оценки процесса самовосстановления, чтобы обеспечить надежные и сопоставимые данные во всех проводимых исследованиях в этой области. Многие исследователи выявили, что прямое введение бактерий вызывает сложности, связанные с их активизацией при добавлении воды для замешивания цементной смеси, а также жизнеспособность бактерий представляет собой значительное препятствие. В связи с этим ученые стали использовать метод иммобилизации бактерий в пористых материалах-носителях для их защиты.

Методы, позволяющие предотвратить преждевременную активацию бактерий, могут оказаться полезными для промышленных процессов самовосстановления и для регулирования активности бактерий во время их иммобилизации в средах для осаждения. Необходимо гарантировать, что бактерии активируются и начинают расти лишь при наличии трещин, что позволит применять менее жесткие условия сушки для материала-носителя, избегая методов сушки в печи, которые могут активировать споры.

Крайне важно моделировать реальные условия эксплуатации цементирующих материалов, а не сосредотачиваться исключительно на идеальных условиях для механизмов заживления, что



может привести к изменению характеристик материалов в рамках крупномасштабных испытаний на реальных элементах. Например, можно изучить условия окружающей среды, такие как грунт, например, почва, чтобы учесть влияние внешних микроорганизмов на механизм заживления. Таким образом, проведение испытаний в реальных условиях позволит определить эффективность систем самовосстановления и устранить возможные ограничения.

## 5 Fundings

This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-44-20012, <https://rscf.ru/en/project/24-44-20012/>.

### References

1. Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., Farahani, J.N. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review. *Construction and Building Materials*. 2015. 74. Pp. 176–187. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84909947398&doi=10.1016%2Fj.conbuildmat.2014.10.010&partnerID=40&md5=ab48e728e4b97020b8f5e5dd5bda873c>.
2. de Brito J, S.N. Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial. *Construction and Demolition Waste*. 2012.
3. Zhang, J., Liu, Y., Feng, T., Zhou, M., Zhao, L., Zhou, A., Li, Z. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*. 2017. 148. Pp. 610–617. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.021>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817309042>.
4. Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., Schlangen, E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*. 2010. 36(2). Pp. 230–235. DOI:10.1016/j.ecoleng.2008.12.036.
5. Mahmoodi, S., Sadeghian, P. Self-healing concrete: A review of recent research developments and existing research gaps. *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*. 2019. 2019-June. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077440256&partnerID=40&md5=f920958f02c360f3fb82f91bdcc4d1b7>.
6. De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J.-M., Vucetic, S., Wang, J., Jonkers, H.M. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. *Advanced Materials Interfaces*. 2018. 5(17). DOI:10.1002/admi.201800074. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041536988&doi=10.1002%2Fadmi.201800074&partnerID=40&md5=5a676f8ccb5677097b467d5a8e769369>.
7. Brooks, J.J. *Dimensional stability and cracking processes in concrete* 2007. 45–85 p. ISBN:9781855739406.
8. Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W. Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2010. 40(1). Pp. 157–166. DOI:10.1016/j.cemconres.2009.08.025.
9. Tziviloglou, E., Pan, Z., Jonkers, H.M., Schlangen, E. Bio-based self-healing mortar: An experimental and numerical study. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2017. 15(9). Pp. 536–543. DOI:10.3151/jact.15.536.
10. Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W., De Belie, N. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*. 2014. 56. Pp. 139–152. DOI:10.1016/j.cemconres.2013.11.009.
11. Singh, H., Gupta, R. Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV. *Journal of Building Engineering*. 2020. 28. DOI:10.1016/j.job.2019.101090. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85075525451&doi=10.1016%2Fj.job.2019.101090&partnerID=40&md5=7281b1a2c89a436c995271627a4da1a8>.
12. Jonkers, H.M. Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*. 2011. 56(1–2). Pp. 5–16.



13. Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B.D., Pal, S. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. *Cement and Concrete Research*. 2005. 35(10). Pp. 1980–1983. DOI:10.1016/j.cemconres.2005.03.005.
14. Khaliq, W., Ehsan, M.B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*. 2016. 102. Pp. 349–357. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006.
15. Wiktor, V., Jonkers, H.M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2011. 33(7). Pp. 763–770. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012.
16. Wang, J.Y., De Belie, N., Verstraete, W. Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2012. 39(4). Pp. 567–577. DOI:10.1007/s10295-011-1037-1.
17. Gilford III, J., Hassan, M.M., Rupnow, T., Barbato, M., Okeil, A., Asadi, S. Dicyclopentadiene and sodium silicate microencapsulation for self-healing of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014. 26(5). Pp. 886–896. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000892.
18. Alghamri, R., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A. Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. 124. Pp. 910–921. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143.
19. Kanellopoulos, A., Qureshi, T.S., Al-Tabbaa, A. Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites. *Construction and Building Materials*. 2015. 98. Pp. 780–791. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.127.
20. Sisomphon, K., Copuroglu, O., Koenders, E.A.B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cement and Concrete Composites*. 2012. 34(4). Pp. 566–574. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2012.01.005.
21. De Muynck, W., Cox, K., Belie, N.D., Verstraete, W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*. 2008. 22(5). Pp. 875–885. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.011.
22. Nosouhian, F., Mostofinejad, D., Hasheminejad, H. Influence of biodeposition treatment on concrete durability in a sulphate environment. *Biosystems Engineering*. 2015. 133. Pp. 141–152. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2015.03.008.
23. Wu, M., Hu, X., Zhang, Q., Xue, D., Zhao, Y. Growth environment optimization for inducing bacterial mineralization and its application in concrete healing. *Construction and Building Materials*. 2019. 209. Pp. 631–643. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.181.
24. Van Tittelboom, K., De Belie, N. Self-healing in cementitious materials-a review. *Materials*. 2013. 6(6). Pp. 2182–2217. DOI:10.3390/ma6062182.
25. Joshi, S., Goyal, S., Mukherjee, A., Reddy, M.S. Microbial healing of cracks in concrete: a review. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2017. 44(11). Pp. 1511–1525. DOI:10.1007/s10295-017-1978-0.
26. Kwon, S., Lee, S., Kang, H., Kim, M.K., Her, S., Bae, S., Kim, D.J., Moon, J. Performance of Self-healing Cementitious Mortar with PVA Fiber and SAP. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2024. 18(1). DOI:10.1186/s40069-024-00692-x.
27. Wu, M., Johannesson, B., Geiker, M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*. 2012. 28(1). Pp. 571–583. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086.
28. Hosseinzadeh, M., Mousavi, S.S., Dehestani, M. An ensemble learning-based prediction model for the compressive strength degradation of concrete containing superabsorbent polymers (SAP). *Scientific Reports*. 2024. 14(1). DOI:10.1038/s41598-024-68276-z.
29. Yang, Y., Lepech, M.D., Yang, E.-H., Li, V.C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concrete Research*. 2009. 39(5). Pp. 382–390. DOI:10.1016/j.cemconres.2009.01.013.
30. Yang, Y., Yang, E.-H., Li, V.C. Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. *Cement and Concrete Research*. 2011. 41(2). Pp. 176–183. DOI:10.1016/j.cemconres.2010.11.002.
31. Snoeck, D., De Belie, N. Autogenous healing in strain-hardening cementitious materials with and without superabsorbent polymers: An 8-year study. *Frontiers in Materials*. 2019. 6. DOI:10.3389/fmats.2019.00048.
32. Yıldırım, G., Khiavi, A.H., Yeşilmen, S., Şahmaran, M. Self-healing performance of aged

Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Hamid, Rahmani, Aramova, O.; Alliluyeva, E.

Factors influencing the mechanisms of self-healing of cementing materials. Review;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11309. doi: 10.4123/CUBS.113.9



- cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 2018. 87. Pp. 172–186. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2018.01.004.
33. Khushnood, R.A., Qureshi, Z.A., Shaheen, N., Ali, S. Bio-mineralized self-healing recycled aggregate concrete for sustainable infrastructure. *Science of the Total Environment*. 2020. 703. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135007.
34. Shaheen, N., Khushnood, R.A., Khaliq, W., Murtaza, H., Iqbal, R., Khan, M.H. Synthesis and characterization of bio-immobilized nano/micro inert and reactive additives for feasibility investigation in self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. 226. Pp. 492–506. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.202.
35. De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Wang, J., Jonkers, H.M. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. *Advanced Materials Interfaces*. 2018. 5(17). DOI:10.1002/admi.201800074.
36. Rahmani, H., Bazrgar, H. Effect of coarse cement particles on the self-healing of dense concretes. *Magazine of Concrete Research*. 2015. 67(9). Pp. 476–486. DOI:10.1680/mac.14.00158.
37. Suleiman, A.R., Nehdi, M.L. Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 2018. 111. Pp. 197–208. DOI:10.1016/j.cemconres.2018.05.009.
38. Rajczakowska, M., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., Cwirzen, A. The effect of exposure on the autogenous self-healing of ordinary portland cement mortars. *Materials*. 2019. 12(23). DOI:10.3390/ma12233926.
39. He, P., Yu, F., Yu, J., Xie, H., Wang, Z., Yang, Z., Zhang, S. Crack-healing and rheological properties of high content fly ash/slag/silica fume green and sustainable cement-based materials incorporating crystalline admixture and calcium alginate biomass hydrogel. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. 21. DOI:10.1016/j.cscm.2024.e03598.
40. Ditta, Z.M., Laohana, P., Tanapongpisit, N., Saenrang, W., Boonlue, S., Sata, V., Baalousha, M., Chindaprasert, P., Ekprasert, J. Mechanical and self-healing properties of cement paste containing incinerated sugarcane filter cake and *Lysinibacillus* sp. WH bacteria. *Scientific Reports*. 2024. 14(1). DOI:10.1038/s41598-024-57492-2.
41. Wong, P.Y., Mal, J., Sandak, A., Luo, L., Jian, J., Pradhan, N. Advances in microbial self-healing concrete: A critical review of mechanisms, developments, and future directions. *Science of the Total Environment*. 2024. 947. DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.174553.
42. Termkhajornkit, P., Nawa, T., Yamashiro, Y., Saito, T. Self-healing ability of fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Composites*. 2009. 31(3). Pp. 195–203. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2008.12.009.
43. Van Tittelboom, K., Gruyaert, E., Rahier, H., De Belie, N. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. *Construction and Building Materials*. 2012. 37. Pp. 349–359. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.026.
44. Sahmaran, M., Yildirim, G., Erdem, T.K. Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*. 2013. 35(1). Pp. 89–101. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2012.08.013.
45. Qian, S., Zhou, J., de Rooij, M.R., Schlangen, E., Ye, G., van Breugel, K. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. *Cement and Concrete Composites*. 2009. 31(9). Pp. 613–621. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2009.03.003.
46. Ma, W., Chen, T., Deng, P., Guo, S. Enhancing the self-healing performance of engineered cementitious composites in harsh environment through cementitious matrix optimization and crack width controlling. *Journal of Building Engineering*. 2024. 94. DOI:10.1016/j.job.2024.109732.
47. Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., Maity, S. Calcined clay limestone cements (LC<sup>3</sup>). *Cement and Concrete Research*. 2018. 114. Pp. 49–56. DOI:10.1016/j.cemconres.2017.08.017.
48. Habeeb, G.A., Mahmud, H.B. Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material. *Materials Research*. 2010. 13(2). Pp. 185–190. DOI:10.1590/S1516-14392010000200011.
49. Roig-Flores, M., Serna, P. Concrete early-age crack closing by autogenous healing. *Sustainability (Switzerland)*. 2020. 12(11). DOI:10.3390/su12114476.
50. Sönmez Tugluca, M., Erşan, Y.Ç., Şahmaran, M. Variation of microbial self-healing performance of cementitious composites with their biogranule content. *Cement and Concrete Composites*.



2024. 152. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2024.105616.
51. Kardogan, B., Sekercioglu, K., Erşan, Y.Ç. Compatibility and biomineralization oriented optimization of nutrient content in nitrate-reducing-biogranules-based microbial self-healing concrete. *Sustainability (Switzerland)*. 2021. 13(16). DOI:10.3390/su13168990.
  52. Mostavi, E., Asadi, S., Hassan, M.M., Alansari, M. Evaluation of self-healing mechanisms in concrete with double-walled sodium silicate microcapsules. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2015. 27(12). DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001314.
  53. Singla, R., Sharma, S., Siddique, R. Nondestructive Evaluation of Autonomic Crack Healing in Concrete Using Ultrasonic Wave Propagation. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2024. 36(10). DOI:10.1061/JMCEE7.MTENG-18377.
  54. Hilloulin, B., Hilloulin, D., Grondin, F., Loukili, A., De Belie, N. Mechanical regains due to self-healing in cementitious materials: Experimental measurements and micro-mechanical model. *Cement and Concrete Research*. 2016. 80. Pp. 21–32. DOI:10.1016/j.cemconres.2015.11.005.
  55. Formia, A., Terranova, S., Antonaci, P., Pugno, N.M., Tulliani, J.M. Setup of extruded cementitious hollow tubes as containing/releasing devices in self-healing systems. *Materials*. 2015. 8(4). Pp. 1897–1923. DOI:10.3390/ma8041897.
  56. Lima, G.T.D.S., Silvestro, L., Tambara Júnior, L.U.D., Cheriaf, M., Rocha, J.C. Autonomous Self-Healing Agents in Cementitious Materials: Parameters and Impacts on Mortar Properties. *Buildings*. 2024. 14(7). DOI:10.3390/buildings14072000.
  57. Lee, Y.-S., Ryou, J.-S. Self healing behavior for crack closing of expansive agent via granulation/film coating method. *Construction and Building Materials*. 2014. 71. Pp. 188–193. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.045.
  58. Xu, J., Tang, Y., Wang, X., Wang, Z., Yao, W. Application of ureolysis-based microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation in self-healing of concrete and inhibition of reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*. 2020. 265. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120364.
  59. Fang, C., Achal, V. Enhanced steel corrosion inhibition through microbially induced carbonate precipitation with facultative anaerobic denitrifying bacterium. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. 21. DOI:10.1016/j.cscm.2024.e03607.
  60. Joseph, C., Jefferson, A.D., Isaacs, B., Lark, R., Gardner, D. Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. *Magazine of Concrete Research*. 2010. 62(11). Pp. 831–843. DOI:10.1680/macr.2010.62.11.831.
  61. Maes, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N. The efficiency of self-healing cementitious materials by means of encapsulated polyurethane in chloride containing environments. *Construction and Building Materials*. 2014. 71. Pp. 528–537. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.053.
  62. Anglani, G., Tulliani, J.-M., Antonaci, P. Behaviour of pre-cracked self-healing cementitious materials under static and cyclic loading. *Materials*. 2020. 13(5). DOI:10.3390/ma13051149.
  63. Xue, C., Li, W., Li, J., Tam, V.W.Y., Ye, G. A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials. *Structural Concrete*. 2019. 20(1). Pp. 198–212. DOI:10.1002/suco.201800177.
  64. Jonkers, H.M. Self Healing Concrete: A Biological Approach. 1002007. 195–204 p.
  65. Vijay, K., Murmu, M., Deo, S.V. Bacteria based self healing concrete – A review. *Construction and Building Materials*. 2017. 152. Pp. 1008–1014. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040.
  66. Erşan, Y.Ç., Hernandez-Sanabria, E., Boon, N., De Belie, N. Enhanced crack closure performance of microbial mortar through nitrate reduction. *Cement and Concrete Composites*. 2016. 70. Pp. 159–170. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2016.04.001.
  67. Feng, J., Dai, X., Qian, S. Co-encapsulation of bacterial spores and nutrients by polyethylene glycol for self-sealing cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 2024. 153. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2024.105713.
  68. Feng, J., Binte Rohaizat, R.E., Qian, S. Unveiling the impact of graphene oxide on bacteria-based autonomous healing of cracks in cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 2024. 151. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2024.105596.
  69. Feng, J., Chen, B., Sun, W., Wang, Y. Microbial induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*. 2021. 280. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122460.
  70. Algaifi, H.A., Bakar, S.A., Alyousef, R., Mohd Sam, A.R., Ibrahim, M.H.W., Shahidan, S., Ibrahim, M., Salami, B.A. Bio-inspired self-healing of concrete cracks using new *B. pseudomycooides*





- species. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. 12. Pp. 967–981. DOI:10.1016/j.jmrt.2021.03.037.
71. Hosseini Balam, N., Mostofinejad, D., Eftekhari, M. Effects of bacterial remediation on compressive strength, water absorption, and chloride permeability of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2017. 145. Pp. 107–116. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.003.
  72. Seifan, M., Samani, A.K., Berenjian, A. New insights into the role of pH and aeration in the bacterial production of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>). *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2017. 101(8). Pp. 3131–3142. DOI:10.1007/s00253-017-8109-8.
  73. Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K., Bang, S.S. Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>. *Soil Biology and Biochemistry*. 1999. 31(11). Pp. 1563–1571. DOI:10.1016/S0038-0717(99)00082-6.
  74. Gorospe, C.M., Han, S.-H., Kim, S.-G., Park, J.-Y., Kang, C.-H., Jeong, J.-H., So, J.-S. Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2013. 18(5). Pp. 903–908. DOI:10.1007/s12257-013-0030-0.
  75. Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Verstraete, W. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. 26(1). Pp. 532–540. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054.
  76. Yuan, X., Zhu, T., Wang, Q., Chen, H., Lin, S., Wang, X., Xu, X. An experimental investigation of dispersive soils treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP). *Construction and Building Materials*. 2024. 446. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2024.137941.
  77. Erşan, Y.Ç., Da Silva, F.B., Boon, N., Verstraete, W., De Belie, N. Screening of bacteria and concrete compatible protection materials. *Construction and Building Materials*. 2015. 88. Pp. 196–203. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.04.027.
  78. Jena, S., Basa, B., Panda, K.C. Impact of various bacteria on concrete properties: an experimental study. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2024. 9(2). DOI:10.1007/s41024-024-00451-1.
  79. Intarasoontron, J., Pungrasmi, W., Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Likitlersuang, S. Comparing performances of MICP bacterial vegetative cell and microencapsulated bacterial spore methods on concrete crack healing. *Construction and Building Materials*. 2021. 302. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124227.
  80. Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V., Bang, S.S. Remediation of concrete using microorganisms. *ACI Materials Journal*. 2001. 98(1). Pp. 3–9.
  81. Zheng, W., Jiang, X., Lü, Y., Zhang, L., Wu, A. Experimental study on dispersion of loess landslide soil in Jingyang, Shaanxi Province | 陕西泾阳某黄土滑坡土的分散性试验研究. *Xi'an Jianshu Keji Daxue Xuebao/Journal of Xi'an University of Architecture and Technology*. 2022. 54(3). Pp. 317–324. DOI:10.15986/j.1006-7930.2022.03.001.
  82. Behzadipour, H., Sadrekarimi, A. Effects of microbially induced calcite precipitation on static liquefaction behavior of a gold tailings sand. *Biogeotechnics*. 2024. 2(4). DOI:10.1016/j.bgtech.2024.100097.
  83. Nishimura, I., Yabiku, Y., Shinyama, Y., Mukunoki, T., Matsubara, H. CT image-based simulation of microbially induced carbonate precipitation. *Computers and Geotechnics*. 2024. 174. DOI:10.1016/j.compgeo.2024.106651.
  84. Mohammed, T.A., Kasie, Y.M., Assefa, E., Getu, Y.M., Tufa, D.H. Enhancing Structural Resilience: Microbial-Based Self-Healing in High-Strength Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2024. 18(1). DOI:10.1186/s40069-024-00661-4.
  85. Nain, N., Surabhi, R., Yathish, N.V., Krishnamurthy, V., Deepa, T., Tharannum, S. Enhancement in strength parameters of concrete by application of *Bacillus* bacteria. *Construction and Building Materials*. 2019. 202. Pp. 904–908. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.059.
  86. Wei, S., Wang, Y., Lai, J., Wei, C., Huang, A., Yao, S., Zhai, X., Sun, C. Research Developments on Microbial Self-Healing Concrete | 微生物自修复混凝土研究进展. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*. 2024. 43(8).
  87. Lee, Y., Lee, C.H. ICY Interfaces: Exploration of Ice's Ephemeral Features for Digital Game User Experience. *Proceedings of the 2024 ACM Designing Interactive Systems Conference, DIS 2024*. 2024. Pp. 2107–2124. DOI:10.1145/3643834.3660725.



88. Okwadha, G.D.O., Li, J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. *Chemosphere*. 2010. 81(9). Pp. 1143–1148. DOI:10.1016/j.chemosphere.2010.09.066.
89. Wang, J., Jonkers, H.M., Boon, N., De Belie, N. *Bacillus sphaericus* LMG 22257 is physiologically suitable for self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2017. 101(12). Pp. 5101–5114. DOI:10.1007/s00253-017-8260-2.
90. Filazi, A. Synergistic effects of *Bacillus subtilis* and PET fiber additions on the mechanical properties of Alkali-Activated composite mortars. *Materials Letters*. 2024. 376. DOI:10.1016/j.matlet.2024.137221.
91. Siddique, R., Singh, K., Kunal, P., Singh, M., Corinaldesi, V., Rajor, A. Properties of bacterial rice husk ash concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. 121. Pp. 112–119. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.146.
92. Chahal, N., Siddique, R., Rajor, A. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. 28(1). Pp. 351–356. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.042.
93. Rauf, M., Khaliq, W., Khushnood, R.A., Ahmed, I. Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. 258. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119578.
94. Wang, J.Y., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., De Belie, N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*. 2014. 68. Pp. 110–119. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018.
95. Qian, S.Z., Zhou, J., Schlangen, E. Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. *Cement and Concrete Composites*. 2010. 32(9). Pp. 686–693. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2010.07.015.
96. Zhang, M., Zhang, Y., Zhang, R., Zhang, L. Effect of MICP-recycled GFRP fiber on the self-repairing properties of concrete. *Journal of Building Engineering*. 2024. 96. DOI:10.1016/j.jobe.2024.110513.
97. Luo, M., Qian, C.-X., Li, R.-Y. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. 87. Pp. 1–7. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.117.

References must meet the requirements <https://unistroy.spbstu.ru/en/references/>.