

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.32

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-35-54

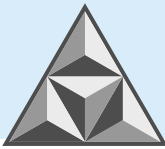
Современное состояние научных исследований в области самовосстанавливающихся бетонов

Т.А. Низина, А.О. Ковшов

Татьяна Анатольевна Низина*, **Артем Олегович Ковшов**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
Саранск, Российская Федерация

*nizinata@yandex.ru**, *a-kovshov@list.ru*



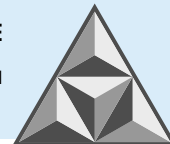
Изложены основные принципы получения самовосстанавливающегося бетона. Приведены основные направления научных исследований в области повышения долговечности бетонов с введением биологических добавок, а именно бактерий-продуцентов известняка. Представлены принципы самозалечивания трещин в бетонном камне при помощи микроорганизмов. Описан международный и российский опыт внедрения разработок в области самовосстанавливающихся материалов на основе вяжущих веществ.

Ключевые слова: бетон, самовосстанавливающийся бетон, биобетон, трещины, микроорганизмы, бактерии

Для цитирования:

Низина Т.А., Ковшов А.О. Современное состояние научных исследований в области самовосстанавливающихся бетонов // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 35-54. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-35-54



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-35-54

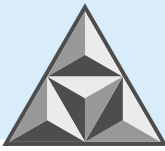
State of the art of scientific research in the field of self-healing concrete

T.A. Nizina, A.O. Kovshov

Tatyana Anatolyevna Nizina*, **Artem Olegovich Kovshov**

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogaryov, Saransk, Russian Federation

*nizinata@yandex.ru**, *a-kovshov@list.ru*



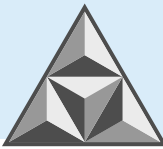
The paper presents the basic principles of obtaining self-healing concrete. The authors give the main scientific research trends in the field of increasing the durability of concrete with the introduction of biological additives - bacteria of limestone producers. The paper shows the principles of self-healing of cracks in concrete stone using microorganisms. The paper discusses the international and Russian experience of development implementation in the field of self-healing materials based on binders.

Keywords: concrete, self-healing concrete, bioconcrete, cracks, microorganisms, bacteria

For citation:

Nizina T.A., Kovshov A.O. State of the art of scientific research in the field of self-healing concrete // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 35-54.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-35-54



ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день бетон занимает лидирующие позиции среди строительных материалов по всему миру. На протяжении нескольких веков ученые и инженеры разрабатывали множество рецептов, позволяющих получать бетоны с различными характеристиками. Тем не менее, среди множества исследований и достижений остаются неразрешенными вопросы, касающиеся прочности, трещиностойкости и долговечности бетонных конструкций. Устойчивость к значительным сжимающим нагрузкам и экономическая доступность бетона предопределила его незаменимость в строительстве. Кроме того, этот материал может принимать практически любые формы, что позволяет архитекторам реализовывать самые смелые идеи. Однако у бетона есть недостатки. Он демонстрирует ограниченные показатели прочности при растяжении, а также подвержен воздействию усадки и усталостных нагрузок. Влияние внешней среды также может существенно сказаться на его долговечности и надежности. Поэтому исследование путей улучшения его физико-механических свойств до сих пор не теряет своей актуальности.

Одним из наиболее перспективных решений данной проблемы является создание рецептов бетонов, способных противостоять распространению трещин. Концепция самовосстанавливающегося бетона охватывает широкий спектр инновационных технологий и методов, направленных на изменение внутренней структуры материала, что позволяет ему восстанавливаться после механических повреждений и становиться более устойчивым к агрессивным внешним факторам.

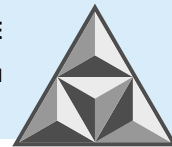
Поскольку бетон остается крайне востребованным в области ремонта и строительства, поиск и внедрение современных и эффективных подходов и методов его производства может значительно повысить долговечность конструкций, уменьшить затраты на их обслуживание и ремонт [1].

Самовосстанавливающийся бетон входит в обширный спектр современных инновационных решений, направленных на трансформацию структуры материала, что повышает устойчивость к разнообразным воздействующим факторам. В наше время весьма актуальны подходы, которые соединяют в себе экоориентированные и высокотехнологичные решения, открывая новые горизонты для применения бетона в условиях современных строительных стандартов и экологических требований [2].

Материал, способный самостоятельно устранять повреждения, возникающие при эксплуатации, позволяет не только снизить расходы на ряд различных промышленных процессов за счет увеличения срока службы, но и предотвратить таковые, связанные с его повреждением. При этом, чтобы материал идентифицировать как самовосстанавливающийся, необходимо, чтобы процесс заживления происходил без вмешательства человека.

КОНЦЕПЦИЯ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ БЕТОНА И ПОИСК ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ ОСНОВНОЙ ЗАДАЧИ

Трещины, возникающие в бетонных конструкциях, являются закономерной реакцией материала на внешние механические нагрузки и воздействия, которые накапливаются с течением времени. Эти физические нарушения структуры не только визуально ухудшают состояние бетона, но и служат «воротами» для атмосферной влаги, что, в свою очередь, значительно влияет на прочностные характеристики материала. Увеличение проницаемости бетона для воды ведет к развитию коррозионных процессов и, как следствие, снижению долговечности конструкций.



Растрескивание бетона – обычное явление. Без надлежащей обработки трещины в бетонных конструкциях имеют тенденцию расширяться, что в конечном итоге потребуют дорогостоящего ремонта. С помощью современных технологий можно уменьшить степень растрескивания, однако полное устранение трещин в бетоне является предметом исследований ученых на протяжении многих лет.

Долговечность бетонных и железобетонных изделий и конструкций является ключевым показателем, определяющим как срок службы сооружений, так и затраты, связанные с техническим обслуживанием и восстановлением. Понимание механизмов, способствующих образованию трещин, представляет собой важную задачу не только для строителей, но и для исследователей-материаловедов. Современные научные исследования в этой области акцентируют внимание на разработке и внедрении инновационных методов повышения долговечности указанного строительного материала. Особое место среди данных технологий занимает концепция самовосстанавливающегося бетона [3-6]. Любой процесс, при котором бетон восстанавливает свои эксплуатационные характеристики после первоначального повреждения, называют самовосстановлением бетона [7].

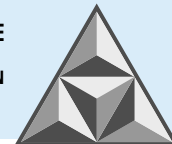
Концепция самовосстановления развилась на базе биологических форм жизни, то есть растений и животных, которые естественным образом проявляют способность к самовосстановлению при появлении повреждений. Самовосстанавливающиеся материалы можно разбить на две основные категории – в зависимости от механизмов, которые запускают их восстановление, и природы этих процессов, а именно: автономные и неавтономные. Неавтономные материалы нуждаются в активизации внешними факторами (высокая температура или свет), что ограничивает их использование в определенных условиях. Напротив, автономное самовосстановление представляет собой идеальный вариант. Такие материалы способны восстанавливаться самостоятельно, без дополнительных внешних воздействий. Это обеспечивает их привлекательность для многочисленных приложений, где независимость от внешних факторов играет ключевую роль. Технология самовосстановления позволяет повысить прочностные характеристики бетонной конструкции, а также предотвратить коррозию армирующих элементов [8].

Основной задачей при разработке рецептуры самовосстанавливающегося бетона является поиск бактерий, способных выживать в суровых условиях эксплуатации. В природе существуют различные виды бактерий, используемые в области строительства. В табл. 1 приведены микроорганизмы, используемые для осаждения карбоната кальция в бетоне. Исследование показало [9], что при просачивании воды бактерии в бетоне пробуждаются и начинают быстро размножаться. В лабораторных условиях в течение 7 сут. они преобразуют питательные вещества в известняк.

Таблица 1. Микроорганизмы, осаждающие карбонат кальция в бетоне [9]

Table 1. Microorganisms that precipitate calcium carbonate in concrete [9]

Тип микроорганизма	Система	Тип кристаллов	Ссылки
Фотосинтезирующий организм: <i>Synechococcus GL24</i>	меромиктическое озеро	Кальцит (CaCO ₃)	C.Y. Tai, F.B. Chen
Фотосинтезирующий организм: <i>Chlorella</i>	люцерновое озеро	Кальцит (CaCO ₃)	S. Sanchez-Moral, J. Canaveras
Сульфатредуцирующие бактерии: <i>Изолят SRB, LVform6</i>	аноксигенный гиперсолёный лиман	Доломит (Ca(Mg)CO ₃)	M.T. Gonzalez Murioz
Азотный цикл: <i>Bacillus subtilis</i>	разложение мочевины в синтезированной среде	Кальцит (CaCO ₃)	S. Castanier et al.
Азотный цикл: <i>Bacillus cereus</i>	аммонификация и восстановление нитратов	Кальцит (CaCO ₃)	S. Castanier et al.
Азотный цикл: <i>Bacillus subtilis JC3</i>	аммонификация (разложение аминокислот)	Кальцит (CaCO ₃)	M. Seshagiri Rao



В щелочных средах глинистых почв водородный показатель часто изменяется под влиянием процессов аммонизации и редукции сульфатов, осуществляемых благодаря жизнедеятельности микроорганизмов, а также в результате взаимодействия с водой, содержащей элементы, выщелоченные из силикатных минералов. Поскольку такие среды обладают ограниченной буферной способностью, pH в них может колебаться, что, в свою очередь, способствует увеличению разнообразия микробов, устойчивых к щелочным условиям.

Промышленные процессы (производство цемента, целлюлозно-бумажной продукции, извлечение полезных ископаемых, утилизация доменного шлака, гальванопокрытия и др.) являются источниками создания нестабильных искусственных щелочных сред, благоприятных для исследования и эксплуатации микробного разнообразия в этих экосистемах. Из нейтральных почв были выделены грамположительные и эндоспорообразующие алкалофильные бактерии вида *Bacillus*, неспорообразующие бактерии вида *Pseudomonas*, *Paracoccus*, *Micrococcus*, *Aeromonas*, *Corynebacterium* и *Actinopolyspora*, устойчивые к щелочной среде грибы. Основной причиной проведения обширных исследований экстремофилов в последние десятилетия является перспективное биотехнологическое практическое применение этих микробов и продуктов их жизнедеятельности [9].

Эффективность методов самовосстановления бетона при помощи деятельности бактерий-продуцентов известняка доказана опытным путем. В [10] приводятся результаты экспериментов по изучению заживления бетона в присутствии различных бактерий и концентраций питательных веществ. Результаты такого исследования представлены на рис. 1.

Не менее важная задача – поиск подходящего питательного вещества для поддержания продуцирования известняка. В первых опытах использовали сахар, однако он ухудшал свойства бетона (способствовал снижению прочности); впоследствии в качестве источника питания был выбран лактат кальция [11].

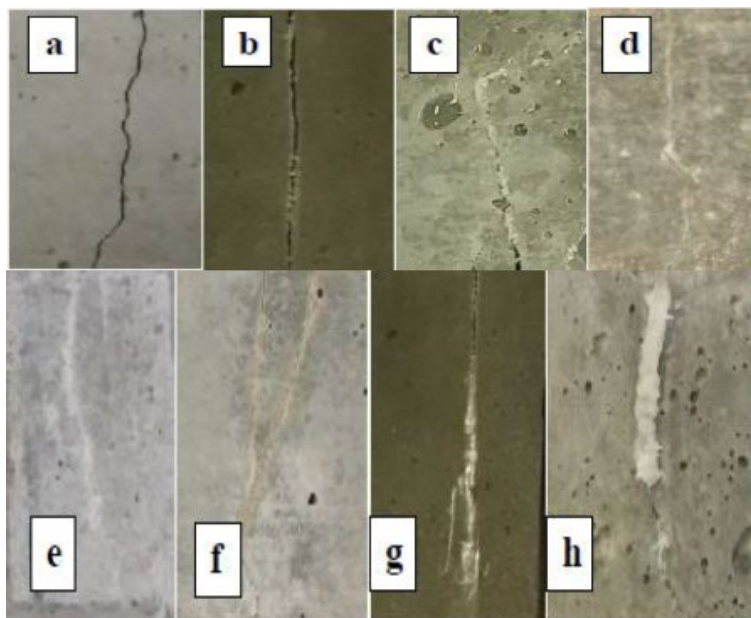
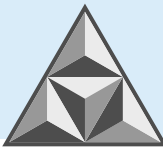


Рис. 1. Фотоснимки, демонстрирующие затягивание трещин: *a* – контрольный образец; *b* – образец без бактерий, но с добавлением питательных веществ; *c* и *d* – образцы, обработанные бактериями *B. subtilis*; *e* и *f* – образцы, обработанные бактериями *S. ureae*; *g* и *h* – образцы, обработанные бактериями *S. Pasteurii* [10]

Fig. 1. Photographs showing crack tightening: *a* – control sample; *b* – sample without bacteria but with added nutrients; *c* and *d* – samples treated with *B. subtilis* bacteria; *e* and *f* – samples treated with *S. ureae* bacteria; *g* and *h* – samples treated with *S. Pasteurii* bacteria [10]



Для эффективного протекания химической реакции с выделением карбоната кальция необходимы следующие условия:

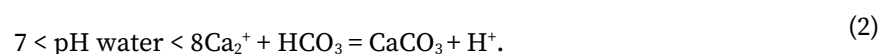
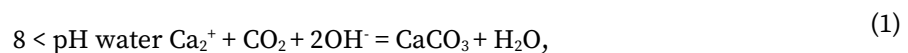
- достаточная концентрация химических соединений (в основном, карбонат- и бикарбонат-ионы и растворенные свободные ионы кальция);
- ширина трещины (допустимая ширина трещины – 150 мкм, однако наиболее эффективны трещины с размером ≤ 50 мкм);
- кислород (благодаря ему лактат кальция реконструируется в нерастворимый известняк, затвердевающий и заполняющий поверхности трещин);
- давление воды (необходимо обеспечить контакт воды и капсул; при стремительном токе жидкости эффективность технологии снижается) и ее наличие в целом [10].

Бетон, при достаточном содержании соединений кальция, обладает свойством «залечивать» трещины. Самостоятельное заживление вызвано выпадением кальцита, который образуется в результате реакции CO_3^{2-} в воде, вводимой в трещину, и ионов Ca^{2+} , растворенных в пасте, а также протеканием реакции гидратации в трещине [12, 13]. При этом свойства материала варьируются в зависимости от типа вяжущего, степени гидратации и особенно сильно – от количества непрореагировавшего цементного клинкера в бетонной матрице [14, 15]. По мере увеличения размеров зерен цемента они не гидратируются полностью и, как правило, останутся непрореагировавшими.

Самовосстанавливающиеся бетоны, основанные на использовании микробиологических систем, функционируют по следующему порядку:

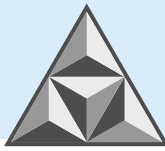
1. Лактат кальция в комбинации со специализированными бактериальными культурами помещается в микрокапсулы из биоразлагаемого полимера, имеющего диаметр в пределах 2-4 мм.
2. С помощью химически активных добавок данные капсулы интегрируются в состав бетонной смеси, что обеспечивает их равномерное распределение.
3. В условиях эксплуатации капсулы сохраняют свою целостность; бактерии остаются в состоянии анабиоза. При образовании микротрещин структура капсул подвергается разрушению, позволяя влаге проникнуть к бактериальным формам и активировать их жизненные процессы.
4. В результате активации наблюдается быстрый рост популяции бактерий, которые метаболизируют лактат кальция. В процессе своей жизнедеятельности они выделяют карбонат кальция, который служит природным заполнителем, эффективно реконструируя микротрещины.

Продуктом реакции ионов кальция с диоксидом углерода или гидрокарбонатом является растворенный в воде карбонат кальция:



Скорость образования кристаллов в трещине зависит от ее размеров и не зависит от типа воды или ее состава [16].

История самозалечивания бетонов уходит корнями в античность. Так, древнейшим архитектурным примером конструкций из этого материала являются постройки в римских городах. Древние римляне были мастерами инженерного дела, строили обширные сети дорог и акведуков, порты и массивные здания, руины которых сохранились на протяжении двух тысячелетий. Многие из этих сооружений были построены из бетона: знаменитый римский Пантеон, имеющий самый большой в мире купол из неармированного бетона, и сегодня остается нетронутым, а некоторые древнеримские акведуки до сих пор доставляют воду в Рим [17].



Поразительно, что бетонные монументы римлян сохранились до наших дней спустя два тысячелетия, и это не идет в сравнение со сроком эксплуатации современных зданий, рассчитанных на 50-100 лет. Ученые обнаружили потенциальный ответ на вопрос «почему древнеримские здания смогли выдержать испытание временем». Установлено, что трещины в древних конструкциях «самозатягиваются». Материал стен и перекрытий состоит из трех компонентов: известняка, вулканического пепла и воды. В течение многих лет архитекторы и историки предполагали, что вулканический материал делает его прочным, и это так, но не является главным объяснением способности материала к самовосстановлению трещин [18].

На рис. 2 представлены результаты гиперспектральной съемки бетонных образцов из коммуны Приверно (Италия). Красным цветом окрашены области бетонного камня с наибольшим содержанием кальция, желтым цветом – серы, синим – алюминия, зеленым – кремния.

Исследователи из Массачусетского технологического института в 2023 г. опубликовали в журнале «Science Advances» результаты анализа древних образцов римского бетона (возраст – около 2000 лет), извлеченных из раскопок в коммуне Приверно (Италия) [17]. Считалось, что римские строители применяли гашеную известь, получаемую нагреванием известняка при высоких температурах, что позволило создавать высокореактивный порошок, который затем «гасился» водой и смешивался с пуццолоной. Однако детальное исследование образцов выявило иной подход к производству бетона, что ставит под сомнение устоявшиеся представления о технологиях римских зодчих.

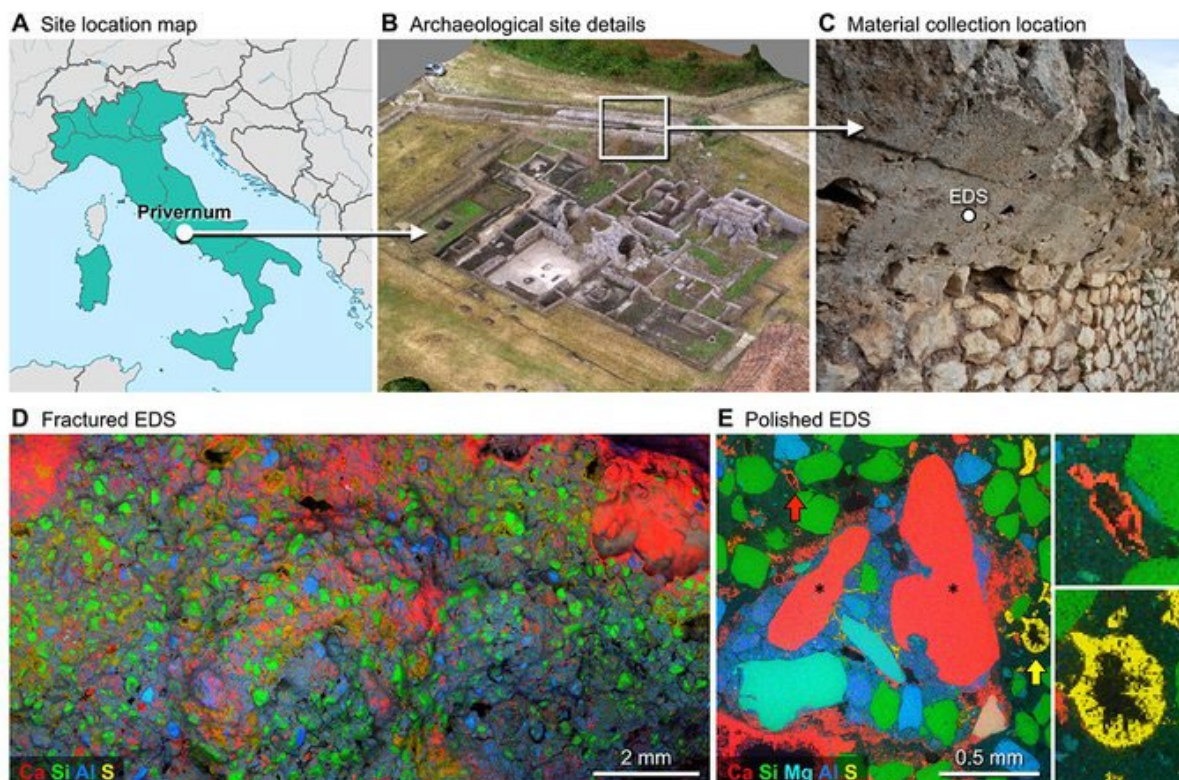
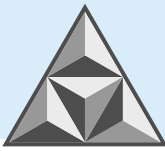


Рис. 2. Результаты гиперспектральной съемки бетонных образцов из коммуны Приверно [17]

Fig. 2. Results of hyperspectral imaging of concrete samples from Priverno commune [17]

Когда древние римляне готовили раствор, они нагревали известь, чтобы превратить ее в негашеный продукт, который расширяется при реакции с водой. В процессе эксплуатации бетона начинают образовываться крошечные трещины, но негашеная известь не дает им увеличиваться. При дожде известь реагирует с водой и кристаллизуется в различные формы

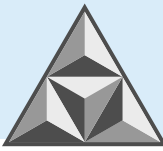


карбоната кальция, быстро заполняя трещину или реагируя с вулканическим пеплом, чтобы «восстановить» материал [18].

Серьезные научные исследования в области самовосстановления вяжущих материалов открылись лишь во второй половине XX столетия; различные ученые и инженеры внесли свой вклад в ее развитие. Одним из пионеров данного направления стал инженер-химик Джон Йонг, который в 1988 г. опубликовал статью в журнале *Cement and Concrete Research*. В своей работе он предложил инновационный подход к использованию микробных агентов для заполнения микротрещин в бетонных конструкциях, тем самым способствуя восстановлению их структурной целостности.

Важный прорыв в области научного знания о вяжущих и их свойствах совершил инженер-строитель гонконгского происхождения Виктор Ли. Ученый посвятил свою жизнь разработке новой технологии производства гибких самовосстанавливающихся бетонов. После своей эмиграции в США он занимался созданием инновационного решения для уменьшения строительного шума, от которого страдал развивающийся Гонконг. В ходе учебы в Университете Виктор Ли был удивлен явным контрастом в состоянии между американской и гонконгской инфраструктурами, что наглядно проявлялось в ветхости дорог и мостов в США. Это наблюдение придало ему мощный импульс к стремлению разработать эффективные технологии для стабилизации и модернизации строительных материалов. По мнению Виктора Ли, внедрение самовосстанавливающегося бетона потребует первоначальных затрат, втрое превышающих стоимость традиционного материала. Однако его прогнозы указали, что экономия, достигнутая благодаря сокращению расходов на ремонт и обслуживание, окажется значительной [20]. В 2002 г. Виктор Ли представил предшественника гибкого бетона. Этот бетон служил основой сердцевины нескольких высотных зданий в Японии, в том числе – жилой башни в Осаке, используемой с целью поглощения энергии во время землетрясений [19]. Согласно расчетам Ли, аналогичный мост, построенный из самовосстанавливающегося бетона, мог сократить эксплуатационные расходы на 50%, что приводило к суммарной экономии в размере 11 млн. долл. [21]. Эти финансовые ожидания потенциально оправдывали более высокие начальные инвестиции.

Процесс восстановления бетонных покрытий новым материалом можно сравнить с физиологическими механизмами заживления кожных покровов человека. Незначительное повреждение, например, порез от бумаги заживает гораздо быстрее, чем более серьезная рана, достигающая в глубину двух сантиметров. Аналогично, когда в бетоне (на основе технологии Ли) возникают микроскопические трещины, сравнимые по толщине с человеческим волосом, происходит активный процесс самовосстановления. При этом сухой бетонный композит под воздействием атмосферной влаги начинает активно ее поглощать, что приводит к созданию новых структур бетона, заполняющих образовавшиеся трещины. Параллельно ионы кальция, высвобождающиеся из поврежденного бетона, взаимодействуют с влагой и углекислым газом, содержащимся в воздухе. Это приводит к образованию карбоната кальция, который, по сути, представляет собой мел. Данная реакция не только способствует заполнению трещин, но и позволяет восстановить первоначальные механические свойства бетона, что значительно повышает его долговечность и эксплуатационные характеристики. Этот механизм самовосстановления демонстрирует взаимосвязь химических процессов и физических изменений и открывает новые перспективы для улучшения свойств строительных материалов [19].



В течение последних лет Ли и его команда работали над гибким цементным композитом, ECC (Engineered Cement Composite) (рис. 3).

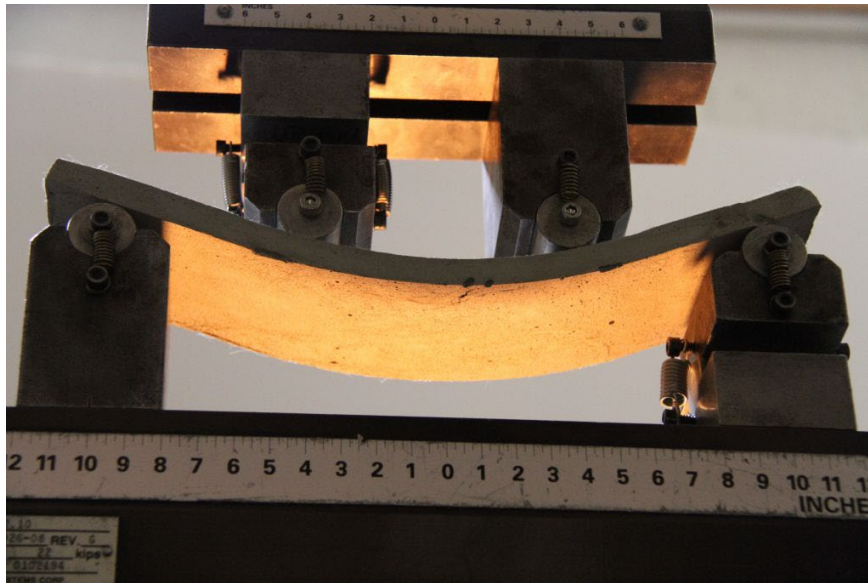


Рис. 3. Испытания на изгиб цементного композита [22]

Fig. 3. Bending tests of cement composite [22]

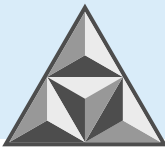
В новом рецепте на поверхности цементного камня присутствует сверхсухой цемент, обладающий способностью вступать в реакцию с водой и углекислым газом с образованием карбоната кальция, заполняющего полость микротрещины. В лабораторных условиях экспериментальные образцы восстановили значительную часть своей первоначальной прочности после того, как исследователи подвергли их трехпроцентной деформации, являющейся критической для разрушения традиционного бетона.

Традиционный бетон сравним с керамикой или стеклом; он такой же хрупкий и может полностью разрушиться при растяжении во время землетрясения или при другом перегруженном состоянии. Цементный композит Ли по характеру деформации от нагрузки аналогичен упругому металлу. Благодаря армирующим волокнам со специальным покрытием, которые удерживают структуру вещества, такой бетон изгибается без разрушения и остается неповрежденным и безопасным для использования [21].

В строительной практике для усиления бетонных конструкций существует метод армирования стальными прутьями с целью минимизации образования трещин. Тем не менее, эти трещины, несмотря на усилия строителей, зачастую все равно достигают значительных размеров, что позволяет влаге и антиобледенительным солям проникать внутрь конструкций. Это, в свою очередь, вызывает коррозию арматуры и значительно снижает прочность конструкций.

В отличие от традиционных методов, самовосстанавливающийся бетон не требует использования стальной арматуры для ограничения ширины трещин, что устраняет проблему коррозии и ее негативные последствия. Данная инновационная технология открывает новые горизонты в строительной отрасли, обеспечивая долговечность и устойчивость бетонных сооружений.

Проблематикой разработки бетона с автономной способностью к восстановлению занимались многочисленные исследователи, среди которых выделяются коллективы ученых из Нидерландов и Великобритании. Значительных успехов достигли голландские исследователи



под руководством Хэнка Йонкерса из Технологического университета Делфта, а также их британские коллеги из Университета Бата. Они разработали новую формулу бетона, способного к саморегенерации, что является значительным шагом вперед в области материаловедения и строительных технологий [1].

В последние годы наблюдается активное развитие научных исследований в области самовосстанавливающегося бетона. Это открывает новые горизонты для создания инновационных строительных материалов [23, 24]. Исследования направлены на разработку технологических решений для создания биобетона, обладающего способностями к восстановлению несущей способности в условиях эксплуатации. Одним из наиболее перспективных методов является введение в состав бетонной смеси специализированных бактерий. Микроорганизмы, благодаря своей метаболической активности, проявляют способность к восстановлению бетонной структуры, что значительно увеличивает долговечность и эксплуатационные характеристики материала [1]. Так, голландские ученые провели испытания поверхности биобетона, который демонстрирует удивительную способность к самовосстановлению трещин и повреждений, вызванных внешними воздействиями и нагрузками (рис. 4).

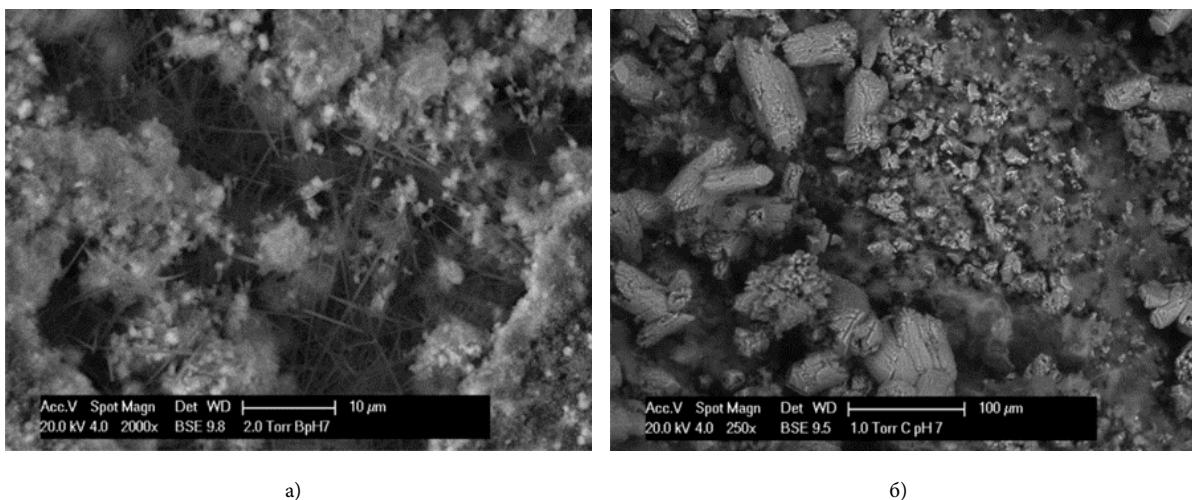


Рис. 4. Поверхность контрольного образца (а) и восстановленная поверхность образца (б) биобетона [25]

Fig. 4. Surface of control sample (a) and reconstructed surface of bioconcrete sample (b) [25]

Важный шаг сделан в 1990-х годах, когда под руководством профессора Хэнка Йонкерса из Делфтского технологического университета (Нидерланды) были проведены широкомасштабные исследования, направленные на изучение микроорганизмов, способных синтезировать карбонат кальция в присутствии влаги. Это биохимическое взаимодействие позволило достичь прорыва в области обратимой реставрации бетонных структур. Экспериментальные результаты подтвердили эффективность использования таких бактерий в маломасштабных бетонных образцах, что открывает новые горизонты для практического применения технологий, направленных на продление срока службы бетонных конструкций и снижение затрат на их обслуживание [16].

Основная цель работы голландских ученых заключается в разработке бетонного материала, способного регенерировать повреждения, возникающие в результате образования трещин, при помощи специально подобранных бактерий, продуцирующих известняк. Бактерии, использованные в экспериментах, носят названия *Bacillus pseudofirmus*, *Bacillus cohnii* и *Bacillus halodurans* (рис. 5).

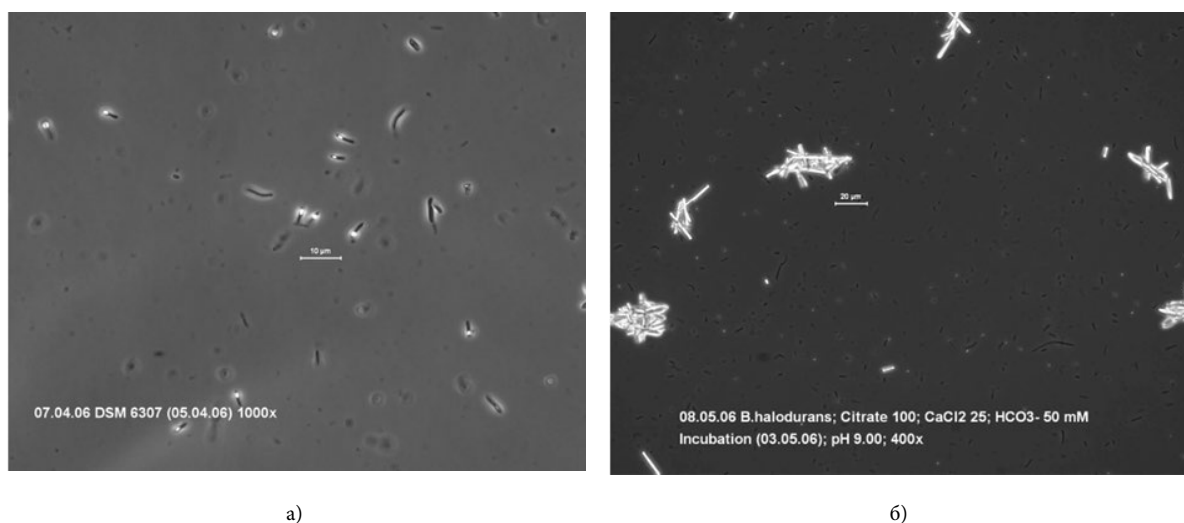
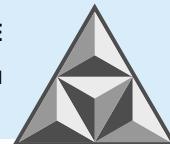


Рис. 5. Бактерии *Bacillus cohnii* (а) и *Bacillus halodurans*, продуцирующие известняк (б) [25]

Fig. 5. Limestone-producing bacteria *Bacillus cohnii* (a) and *Bacillus halodurans* (b) [25]

Эти микроорганизмы рода бацилл, находясь в спящем состоянии в специальной оболочке (споре), активизируются в момент поступления влаги, которая служит катализатором их метаболической деятельности. При контакте с водой и питательными веществами споры разрушаются и бактерии начинают активно размножаться, в результате чего происходит процесс минерализации. В частности, бактерии преобразуют кальций в известняк, который затем заполняет образовавшиеся микротрещины, обеспечивая тем самым герметизацию и предотвращая дальнейшее разрушение структуры материала [25].

Основной проблемой, стоящей перед исследователями на пути внедрения технологии самовосстанавливающихся бетонов в процессы строительства, является стоимость питательного вещества для микроорганизмов-продуцентов известняка. Сметы по апробированным рецептурам показывают, что 50% от стоимости восстанавливаемой бетонной смеси приходится на лактат кальция (табл. 2) [10].

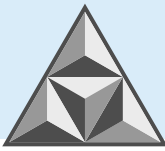
Таблица 2. Стоимость материалов восстанавливающего средства для биобетона [10]

Table 2. Material cost of bioconcrete restoration agent [10]

Компоненты	Расход на 1 м ³ бетона, кг	Стоимость 1 кг компонента, руб.	Стоимость материала на 1 м ³ бетона, руб.
Пемза	56.93	0.35	0.45
Дрожжевой экстракт	116.67	0.10	863.21
<i>Bacillus subtilis</i>	0.93	7.39	27843
Мочевина	9.33	32.45	301.82
Лактат кальция	9.33	16676	1561.16
Итого			3025.75

В связи с этим дополнительным направлением исследований в данной области становится поиск экономичного питательного вещества для бактерий, которое не снижает механические свойства бетона. Кроме того, необходимо разработать технологию производства питательного компонента в промышленных объемах. Важно, чтобы процесс самовосстановления протекал относительно быстро по сравнению со скоростью разрушения бетонного камня под действием атмосферной влаги; в противном случае разработка окажется неэффективной.

Новая технология заделки трещин должна представлять собой непрерывный процесс самовосстановления, происходящий в результате экологически безопасных биологических



процессов. Для снижения стоимости технологии предпочтительно участие микроорганизмов, достаточно распространенных в биосфере. В [26] *Bacillus pasteurii*, которая в изобилии содержится в почве, использовали для индуцирования выпадения соединений кальция в осадки. Жизненно важно понимать основы участия микроорганизмов в устранении трещин. «Бактериальный бетон» – это бетон, который можно получить, добавляя в него бактерии, способные постоянно осаждают кальцит. Это явление называют «микробиологически индуцированным осаждением кальцита». Показано, что распространенная почвенная бактерия *Bacillus Pasteruii* при благоприятных условиях может непрерывно осаждают новый высоконепроницаемый слой кальцита на поверхности уже существующего слоя бетона. Однако благоприятные условия, необходимые для осуществления процесса в естественной среде, возникают достаточно редко, поэтому необходимо их организовать.

Область применения бетонов с эффектом самозалечивания крайне обширна. Впервые самовосстанавливающийся бетон использовали при строительстве спасательной станции на озере в Нидерландах (рис. 6), затем новый материал применили при реализации проекта моста Zeelandbrug (рис. 7).



Рис. 6. Спасательная станция в Нидерландах, где впервые использовали самовосстанавливающийся бетон [16]

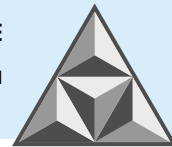
Fig. 6. Rescue station in the Netherlands where self-healing concrete was used for the first time [16]



Рис. 7. Мост Zeelandbrug в Нидерландах [16]

Fig. 7. The Zeelandbrug bridge in the Netherlands [16]

Этот мегаструктурный объект является одним из самых протяженных мостов в Нидерландах, предназначенных как для автомобильного, так и для пешеходного движения. Внедрение самовосстанавливающегося бетона существенно увеличило долговечность мостового сооружения и привело к сокращению эксплуатационных расходов на обслуживание, что подчеркнуло экономическую целесообразность проекта.



На территории Японии была адаптирована технология самовосстанавливающегося бетона в процессе возведения многоуровневого офисного здания компании Hugo Boss в Токио (рис. 8).



Рис. 8. Офисное здание компании Hugo Boss в Токио [27]

Fig. 8. The Hugo Boss office building in Tokyo [27]

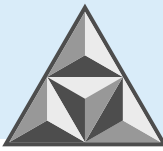
Применение данного инновационного строительного материала не только ускорило этапы строительства, но и обеспечило выдающееся качество отделки бетонных поверхностей. Отметим, что данный аспект особенно востребован при формировании архитектурного облика, соответствующего требованиям современности и высоким эстетическим стандартам [16].

Самозалечивающийся бетон успешно используется для возведения сложных строительных объектов по всему миру; перечисленные выше примеры демонстрируют разнообразные области применения этого материала. Следовательно, актуальной задачей становится разработка новых рецептов такого бетона.

Исследование микробных сообществ, находящихся в искусственно созданных щелочных средах (известковый шлам, известняковые матрицы, цемент) составляют недостаточно изученный и недооцененный раздел микробиологии. Разнообразие бактериальных видов, обнаруживаемых в таких щелочных экосистемах, потенциально может предоставить ценные данные о микробных популяциях, которые, в свою очередь, могут применяться для улучшения свойств строительных материалов. Эти микроорганизмы способны выживать при экстремальных значениях pH, характерных для цементных матриц [9].

Несмотря на то что микроорганизмы считаются разнообразным [13, 28] и распространенным видом организмов на планете, их пространственное распределение на континентальном уровне остается недостаточно изученным [29]. Экологи, занимающиеся биогеографией микроорганизмов, ссылаются на утверждение М. Бейеринка [30]: «Все есть везде, окружающая среда производит отбор». В ряде исследований предприняты попытки подтвердить данное утверждение и выявить наиболее значимые экологические факторы, влияющие на микробные сообщества в природных условиях [31].

В условиях щелочной среды клетки сталкиваются с множеством физиологических вызовов. Прежде всего, критически важной задачей является поддержание уровня pH. Для выживания микроорганизмы должны активно регулировать водородный показатель своей цитоплазмы, создавая более кислую среду, чтобы компенсировать внешнюю щелочность. Эти адаптационные механизмы требуют подходящих условий (включая умеренный климат), что подчеркивает важность комплексной оценки факторов, определяющих устойчивость микроорганизмов к экстремальным условиям обитания. Эти условия предопределяют уровень



pH, близкий к нейтральному, температуру от 293 до 313 K, давление 1 атм. и соответствующий уровень доступности воды, а также питательных веществ и солей. Многие экстремальные условия (кислые или термальные воды, соленые и/или щелочные озера, пустыни и океанское дно) слишком суровы для нормального существования. Любое состояние окружающей среды, которое может восприниматься как выходящее за пределы допустимого диапазона, является экстремальным [6].

Однако в таких условиях размножаются разнообразные микробы. Эти организмы, известные как экстремофилы, не только переносят специфические условия, но и нуждаются в них для выживания и роста. В целом микробы переносят более широкий спектр экстремальных условий окружающей среды по сравнению с представителями других форм жизни. Пределы роста и размножения микроорганизмов варьируются в условиях: -12°C (261 K)... $+100^{\circ}\text{C}$ (373 K); pH 0...13; гидростатическое давление – до 1400 атм., концентрация соли – на уровне насыщенных растворов. Помимо естественных экстремальных условий (горячие источники, соленые озера), существуют и искусственные среды, в которых микроорганизмы адаптируются. Это могут быть условия эксплуатации холодильного оборудования и систем парового отопления, а также кислотно-солевых шахтных вод.

В условиях экстремального окружающего воздействия микроорганизмы демонстрируют исключительную адаптивность и способность к выживанию. Эти экстремофилы не просто переносят специфические стрессовые условия; напротив, их жизненные циклы и репродукция зависят от наличия экстремальных факторов. В рамках микробиологической классификации существует множество экстремофилов, способных адаптироваться к условиям существования. При этом микроорганизмы демонстрируют исключительные способности, превосходя другие биологические системы в отношении выживания и размножения в условиях экстремального воздействия окружающей среды [9].

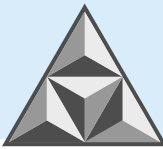
Перспективы развития исследований в данной области демонстрируют экспоненциальный рост по мере выделения новых штаммов микроорганизмов, выявления новых соединений и метаболических путей, что потребует глубоко изучить молекулярные и биохимические характеристики клеточных компонентов. На сегодняшний день одним из ярких примеров коммерческого применения являются щелочные протеазы, используемые в производстве моющих средств.

Глобальные и масштабные исследования, проводимые в отношении разнообразия экстремофильных микробов, подтвердили, что существующие знания в этой области представляют собой лишь малую часть от скрытых возможностей. В ближайшем будущем предполагается обнаружение новых и потенциально полезных экстремофильных организмов, которые могут быть адаптированы для производства биобетона [9].

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что силами исследований отечественных и иностранных ученых получены теоретические и экспериментальные данные о возможности процесса самовосстановления бетона. Основными направлениями исследований в данной области являются:

- поиск бактерий, способных выживать в суровых условиях;
- поиск экономичного питательного вещества для бактерий;
- установление методов контроля за процессом залечивания.

Следует отметить, что высокая стоимость биобетона имеет обратную сторону: строительные конструкции, выполненные из такого материала, рассчитаны на срок эксплуатации более 100 лет и почти не требуют ремонта. Это важно для обслуживания зданий и сооружений с повышенным уровнем ответственности и местах, где ремонтные работы недоступны или затруднены.



Применение самовосстанавливающегося бетона обеспечивает сохранение несущей способности конструкций через сохранение их целостности при появлении микротрещин.

Следы залечивания трещин в композитах на цементной основе сохранились с античных времен, однако на протяжении двух тысячелетий механизм процесса не подвергался серьезному исследованию. Однако в конце XX столетия развилась исследовательская деятельность, включающая теоретические и экспериментальные подходы к решению этого важнейшего практического вопроса, имеющему перспективы для последующего воплощения в рамках развития строительного производства и материаловедения.

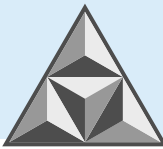
ВЫВОДЫ

Установлено, что явления самовосстановления бетона связаны с протеканием сложных физико-механических и химических механизмов в цементной матрице. Исследования по данной теме на современном этапе открывают возможность создания новейших композитных материалов с уникальными свойствами. Эти разработки весьма полезны при решении вопроса о снижении расходов на обслуживание зданий путем продления срока их эксплуатации.

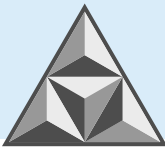
Показано, что основной механизм, лежащий в основе самовосстановления, подразумевает использование специальной инкапсулированной системы, содержащей живые микроорганизмы, которые активируются при контакте с водой. Открыты новые горизонты для увеличения устойчивости бетонных конструкций к агрессивным внешним воздействиям. Рекомендованные технологии самовосстановления не только способствуют снижению затрат на техническое обслуживание, но и представляют собой шаг вперед в направлении устойчивого развития строительной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жукова Г.Г., Сайфулина А.И. Исследование применения самовосстанавливающегося бетона // *Construction and Geotechnics*. 2020. Т. 11. № 4. С. 58–68. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.05
2. Кодзоев М.-Б.Х., Исаченко, С.Л. Самовосстанавливающийся бетон [Электронный ресурс] // *Научный журнал «Бюллетень науки и практики»*. 2018. Т. 4. № 4. С. 287-290 (дата обращения: 12.10.2024).
3. Jacobsen S., Marchand J., Boisvert L. Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete // *Cement and Concrete Research*. 1996. № 26. P. 869-881.
4. Jacobsen S., Sellevold E.R. J. Self-healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw // *Cement and Concrete Research*. 1995. № 26. P. 55-62.
5. Hearn N. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference? // *Materials and Structures*. 1998. № 31. P. 563-567.
6. Ahn T.H., Kishi T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2010. № 8. P. 171-186.
7. De Rooij M, Van Tittelboom K., de Belie N., Schlangen E. Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC // *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*. 2013. № 11. DOI: 10.1007/978-94-007-6624-2.
8. Qureshi, T., Al-Tabbaa A. Self-Healing Concrete and Cementitious Materials // *Advanced Functional Materials*. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.92349.
9. Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Смирнов В.Ф. Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. Т. 5. № 4. DOI: 10.15862/07SATS418.
10. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Самовосстанавливающиеся бетоны, модифицированные микробиологической добавкой: дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 240 с.
11. Токарев А.С., Панин П.А., Медведев В.С. Самовосстанавливающийся бетон // *Наука, образование и культура*. 2021. С. 29-30.



12. **Edvardsen C.** Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete // *ACI Materials Journal*. 1999. № 96 (4). P. 448-454.
13. **Sisomphon K., Copuroglu O., Koenders E.A.B.** Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive // *Cement & Concrete Composites*. 2012. № 34 (4). P. 566-574.
14. **Huang H., Ye G., Damidot D.** Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste // *Cement and Concrete Research*. 2013. № 52. P. 71-81.
15. **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. P. 21-32.
16. Самовосстанавливающийся бетон: Технология получения и свойства [Электронный ресурс]. URL: <https://dtf.ru/science/2691081-samovosstanavlivayushiiya-beton-tehnologiya-polucheniya-i-svoistva> (дата обращения: 14.10.2024).
17. **Seymour L.M, Maragh J., Sabatini P., Di Tommaso M., Weaver J.C. and Masic A.** (2023), "Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete" // *Science Advance*. № 9. DOI: 10.1126/sciadv.add1602.
18. **Kwong Emily McCoy, Berly Lu Thomas, Ramirez Rebecca.** Why Ancient Roman Concrete Is So Strong and Self-Healing [Электронный ресурс]. URL: <https://www.npr.org/2023/02/22/1158783249/rome-wasnt-built-in-a-day-but-they-sure-had-strong-concrete> (дата обращения: 14.10.2024).
19. Железобетонная гибкость [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.ru/forbes/issue/2009-12/33674-zhelezobetonnaya-gibkost> (дата обращения: 14.10.2024)
20. Profile - Victor Li - Progressive Engineer [Электронный ресурс]. URL: <https://progressiveengineer.com/profile-victor-li/> (дата обращения: 13.10.2024)
21. **Victor C. Li.** Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure, 2019. DOI: 10.1007/978-3-662-58438-5
22. Concrete Innovations [Электронный ресурс]. URL: <https://csengineermag.com/concrete-innovations/> (дата обращения: 14.10.2024)
23. **Абашкин Р.Е., Руднев М.О.** Перспективы применения самовосстанавливающихся материалов // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. Тр. XI Межд. Науч.-практ. Конф. (19-21 марта 2014 года) в 4-х т.* 2014. Т. 1. С. 25-28.
24. **Ситников Н.Н., Хабибуллина И.А., Машенко В.И., Ризаханов Р.Н.** Оценка перспектив применения самовосстанавливающихся материалов и технологий на их основе // *Перспективные материалы*. 2018. № 2. С. 5-16. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-2-5-16.
25. **Jonkers Henk M., Schlangen Erik.** Development of a bacteria-based self-healing concrete. 2008. DOI:10.1201/9781439828410.ch72
26. **Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Фомичев В.Т.** Химические аспекты процесса устранения трещин бетона с помощью бактерий [Электронный ресурс] // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. № 3. URL: <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf> (дата обращения 14.10.2024).
27. Mengapa BOSS menjadi salah satu destinasi wajib dikunjungi saat berwisata ke Jepang? [Электронный ресурс] // *Japanese station* – URL: <https://japanesestation.com/japan-travel/travel-destination/mengapa-boss-menjadi-destinasi-wajib-dikunjungi-saat-berwisata-ke-jepang> (дата обращения: 15.10.2024)
28. **Huang H., Ye G., Damidot D.** Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials // *Cement and Concrete Research*. 2024. № 60. P. 68-82.
29. **Jiang J., Li W., Yuan Z.** Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials // *Cement and Concrete Composites*. № 57. 2015. P. 116-127.
30. **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. P. 349-359.
31. **Qian S., Zhou J., de Rooij M.R., Schlangen E.** Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials // *Cement and Concrete Composites*. 2009. № 31 (9). P. 613-621.
32. **Акарачкин С.А.** Самовосстанавливающиеся материалы // *Решетневские чтения 2014: материалы XVIII Междунар. науч. конф.* Красноярск. 2014. С. 329-330.



33. **Teall Oliver, Pilegis Martins, Davies Robert, Sweeney John, Jefferson Tony, Lark Robert, Gardner Diane.** A shape memory polymer concrete crack closure system activated by electrical current // *Smart Mater. Struct.* 2018. № 27 (7). DOI: 10.1088/1361-665X/aac28a.

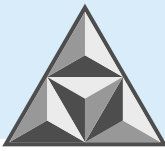
Поступила в редакцию 25.10.2024

Одобрена после рецензирования 30.11.2024

Принята к опубликованию 10.12.2024

REFERENCES

1. **Zhukova, G.G. and Sayfulina, A.I.** (2020), "Research of application of self-healing concrete", *Construction and Geotechnics*, vol. 11, no. 4, pp. 58–68, DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.05 (in Russian).
2. **Kodzoev, M.-B.H. and Isachenko, S.L.** (2018), "Self-healing concrete" [online], *Nauchnyi zhurnal «Byulleten' nauki i praktiki» [Scientific journal 'Bulletin of science and practice']*, vol. 4, no. 4, pp. 287-290 (accessed 12.10.2024) (in Russian).
3. **Jacobsen, S., Marchand, J. and Boisvert, L.** (1996), "Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete", *Cement and Concrete Research*, no. 26, pp. 869-881.
4. **Jacobsen, S. and Sellevold, E.R.J.** (1995), "Self-healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw", *Cement and Concrete Research*, no. 26, pp. 55-62.
5. **Hearn, N.** (1998), "Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference?", *Materials and Structures*, no. 31, pp. 563-567.
6. **Ahn, T.H. and Kishi, T.** (2010), "Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures", *Journal of Advanced Concrete Technology*, no. 8, pp. 171-186.
7. **De Rooij, M., Van Tittelboom, K., de Belie, N. and Schlangen, E.** (2013), "Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC", *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*, vol. 11, DOI: 10.1007/978-94-007-6624-2.
8. **Qureshi, T., and Al-Tabbaa, A.** (2020), "Self-Healing Concrete and Cementitious Materials", *Advanced Functional Materials*, doi: 10.5772/intechopen.92349.
9. **Erofeev, V.T., Al Dulaimi, Salman, Dawood Salman and Smirnov, V.F.** (2018), "Bacteria for the production of self-healing concrete", *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» [Online Journal "Transport Structures"]*, vol. 5, no. 4, doi: 10.15862/07SATS418 (in Russian).
10. **Al Dulaimi Salman Dawood Salman** (2019), "Self-healing concretes modified with microbiological admixture", Ph.D. Thesis, Moscow, Russia (in Russian).
11. **Tokarev, A.S., Panin, P.A. and Medvedev, V.S.** (2021), "Self-healing concrete", *Nauka, obrazovanie i kul'tura [Science, Education and Culture]*, pp. 29-30 (in Russian).
12. **Edvardsen, C.** (1999), "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 96, no. 4, pp. 448-454.
13. **Sisomphon, K., Copuroglu, O. and Koenders, E.A.B.** (2012), "Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive", *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, no. 4, pp. 566-574.
14. **Huang, H., Ye, G. and Damidot, D.** (2013), "Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste", *Cement and Concrete Research*, no. 52, pp. 71-81.
15. **Hilloulin, B., Hilloulin, D., Grondin, F., Loukili, A. and de Belie, N.** (2016), "Mechanical regains due to self-healing in cementitious materials: Experimental measurements and micro-mechanical model", *Cement and Concrete Research*, no. 80, pp. 21-32.
16. Self-healing concrete: Technology of obtaining and properties [online]. Available at: <https://dtf.ru/science/2691081-samovosstanavlivayushii-sya-beton-tehnologiya-polucheniya-i-svoistva> (accessed 12.10.2024).
17. **Seymour, L.M, Maragh, J., Sabatini, P., Di Tommaso, M., Weaver, J.C. and Masic, A.** (2023), "Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete", *Science Advance*, no. 9, DOI: 10.1126/sciadv.add1602.



18. **Kwong, Emily McCoy, Berly Lu, Thomas and Ramirez, Rebecca.** "Why Ancient Roman Concrete Is So Strong and Self-Healing" [online]. Available at: <https://www.npr.org/2023/02/22/1158783249/rome-wasnt-built-in-a-day-but-they-sure-had-strong-concrete> (accessed: 14.10.2024).
19. Concrete flexibility [online]. Available at: <https://www.forbes.ru/forbes/issue/2009-12/33674-zhelezobonnaya-gibkost> (accessed: 14.10.2024).
20. Profile - Victor Li - Progressive Engineer [online]. Available at: <https://progressiveengineer.com/profile-victor-li/> (accessed: 13.10.2024).
21. **Li, Victor.** (2019), "Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure". DOI: 10.1007/978-3-662-58438-5.
22. Concrete Innovations [online]. Available at: <https://cseengineermag.com/concrete-innovations/> (accessed: 14.10.2024)
23. **Abashkin, R.E. and Rudnev, M.O.** (2014), "Prospects of application of self-healing materials", *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii: sbornik nauchnykh trudov XI Mezhd. nauchno-prakticheskoi konferentsii (19-21 marta 2014 goda) v 4-kh tomakh [Modern instrumental systems, information technologies and innovations: collection of scientific papers of the XI International Scientific and Practical Conference (19-21 March 2014) in 4 volumes]*, vol. 1, pp. 25-28 (in Russian).
24. **Sitnikov, N.N., Khabibullina, I.A., Mashchenko, V.I. and Rizakhanov, R.N.** (2018), "Assessment of prospects for the application of self-healing materials and technologies based on them", *Perspektivnye materialy [Prospective Materials]*, no. 2. pp. 5-16, DOI: 10.30791/1028-928-978X-2018-2-5-16 (in Russian).
25. **Jonkers, Henk M. and Schlangen, E.** (2008), "Development of a bacteria-based self-healing concrete", DOI: 10.1201/9781439828410.ch72.
26. **Erofeev, V.T., Al Dulaimi, Salman Dawood Salman and Fomichev, V.T.** (2018), "Chemical aspects of concrete crack repair process using bacteria" [online], *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» [Online Journal 'Transport Structures']*, no. 3. Available at: <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf> (accessed 14.10.2024) (in Russian).
27. Mengapa BOSS menjadi salah satu destinasi wajib dikunjungi saat berwisata ke Jepang? Japanese station. Available at: <https://japanestation.com/japan-travel/travel-destination/mengapa-boss-menjadi-destinasi-wajib-dikunjungi-saat-berwisata-ke-jepang> (accessed: 15.10.2024).
28. **Huang, H., Ye, G. and Damidot, D.** (2024), "Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, no. 60, pp. 68-82.
29. **Jiang, J., Li, W. and Yuan, Z.** (2015), "Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials", *Cement and Concrete Composites*, no. 57, pp. 116-127.
30. **Van Tittelboom, K., Gruyaert, E., Rahier, H., and de Belie, N.** (2012), "Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation", *Construction and Building Materials*, no. 37, pp. 349-359.
31. **Qian, S., Zhou, J., de Rooij, M.R., and Schlangen, E.** (2009), "Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials", *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 9, pp. 613-621.
32. **Akarachkin, S.A.** (2014), "Self-healing materials", *Reshetnevskie chteniya 2014: materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. Reshetnev [Readings 2014: Proceedings of the XVIII International Scientific Conference]*, Krasnoyarsk, Russia, pp. 329-330 (in Russian).
33. **Teall, Oliver, Pilegis, Martins, Davies, Robert, Sweeney, John, Jefferson, Tony, Lark, Robert and Gardner, Diane** (2018), "A shape memory polymer concrete crack closure system activated by electrical current", *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no.7. DOI: 10.1088/1361-665X/aac28a.

Received 25.10.2024

Approved 30.11.2024

Accepted 10.12.2024