

**УДК 691.32**

РЕГЕДА К. В., студент гр.ОУБ-221 (КузГТУ),  
Научный руководитель БАУМГАРТЭН М. И., к.ф.-м.н, доцент (КузГТУ)  
г. Кемерово

## **САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, ИХ ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ И ЭКОНОМИИ РЕСУРСОВ**

### **Место бетона в нашей жизни и значимость его долговечности**

Бетон сегодня занимает второе место из наиболее потребляемых веществ на Земле, сразу после воды. На его производство затрачивается до 2% всей воды в мире и около 4 миллиардов тонн цемента в год. Его масштабное производство имеет значительные последствия для экосистемы: масштабная добыча песка, карьеры в горах, огромные участки земли, запечатанные слоем бетона, нарушение естественной среды и утрата биоразнообразия. Также важно учитывать углеродный след, что оставляет производство цемента – важной составляющей бетона. Печи для его производства обычно работают на ископаемом топливе, что выделяет парниковые газы, а сам известняк при нагреве выделяет еще больше углерода.

С помощью бетона можно производить строительство различных конструкций и сооружений в достаточно короткие сроки. И разумеется, в строительной деятельности всегда актуален вопрос об увеличении эксплуатационного срока сооружений.

На сегодняшний день основной проблемой использования бетона является нарушение его структуры в процессе разного рода механических и физических воздействий, что влечет за собой образование различного рода трещин, которые являются прямым путем для попадания в материал влаги [1].

Долговечность бетона действительно ограничена. «Единственная причина, по которой он сегодня повсюду – это армирование», считает Люсия Алле, доцент кафедры архитектуры Колумбийского университета.

Проблема в том, что углекислый газ проникает в поры бетона и запускает химическую реакцию, вызывающую ржавчину арматуры. Ржавая, сталь расширяется, разрушая бетонный монолит. На его разрушение уйдет около 100 лет [3], а это значит, что многие конструкции уже скоро будут подлежать сносу. Снесенные бетонные здания в основном будут отправлены на свалки, так как переработка бетона (отделение щебня от арматуры) хоть и возможна, но этот процесс дорогостоящий и трудоемкий. Сейчас бетон сбрасывают в кратеры старых известняковых карьеров, что образовались при его производстве.

Одним из решений данной проблемы является использование рецептур бетонов, которые способны противостоять распространению трещин.

**Концепция самовосстанавливающегося бетона и технологии его создания**

Любой процесс, при котором бетон восстанавливает свои эксплуатационные характеристики после первоначального повреждения, называют самовосстановлением бетона [4].

В настоящее время существует ряд технологий создания самовосстанавливающегося бетона. Эти методы позволяют материалу самостоятельно «залечивать» трещины, которые неизбежно возникают в процессе эксплуатации. Исследования в данной области, приведенные в работах [5-11], ориентированы на создание технологических приемов, позволяющих получить бетон, способный к восстановлению своей несущей способности в ходе использования. Основные подходы включают использование специальных бактерий, микрокапсул с полимерами и современных синтетических систем. Каждая технология активируется при появлении повреждений и обеспечивает герметизацию трещин, что значительно продлевает срок службы бетонных конструкций и снижает расходы на их ремонт и обслуживание.

И наиболее известной технологией является бактериальный метод (биобетон). Его технология производства заключается в следующем.

1. Лактат кальция вместе с бактериями помещается в биоразлагаемые капсулы диаметром 2-4 мм;

2. Капсулы вводятся в бетонный раствор с использованием химически активных веществ;

3. В нормальных условиях эксплуатации капсулы сохраняют свою целостность и бактерии находятся в анабиозе. При появлении микротрещин целостность капсул нарушается, к бактериям поступает вода, что выводит их из состояния сна и активизирует их жизнедеятельность;

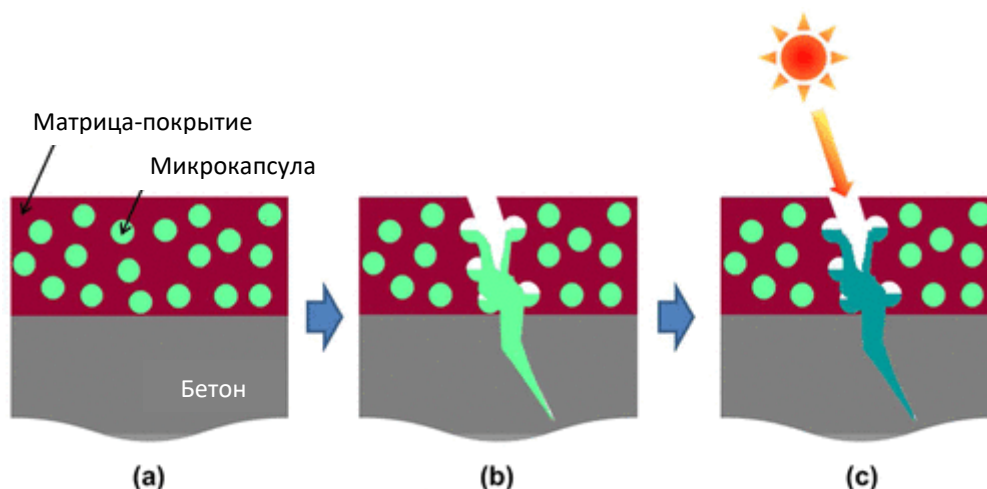
4. На последнем этапе происходит стремительный рост численности популяции с поглощением лактата кальция. Продуктом жизнедеятельности бактерий является известняк. При росте количества бактерий происходит пропорциональный рост объемов выделяющегося известняка, заполняющего микротрещину [7, 12, 13].

На рисунке 1 представлен процесс восстановления трещины с помощью бактериального метода.



Рисунок 1. Процесс восстановления трещины биобетона

Одним из наиболее изученных методов создания самовосстанавливающегося бетона является заживление на основе капсул (рис. 2). Данный подход предполагает внедрение в бетон микрокапсул, заполненных жидким полимером или другим герметиком [14].



Источник: научное издательство ACS Publications, 2013 Американское химическое общество. URL: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/am302728m>

Рисунок 2. Заживление трещин с помощью капсул с полимером

Распространяющаяся трещина разрывает оболочку микрокапсул (рис. 2b), высвобождая «заживляющий» агент. Под действием катализатора, также заранее введенного в бетон, или ультрафиолетового излучения агент полимеризуется и склеивает стенки трещины (рис. 2c). Недостатком некоторых версий этой технологии является ограниченный срок службы полимерного покрытия (около одного года) и возможность лишь однократного восстановления в конкретной зоне [16]. Поэтому необходимо дальнейшее развитие этой технологии с увеличением сроков ее использования.

Оба ранее описанных метода не являются полностью автономными, поскольку для непрерывного производства материалов для восстановления требуется внешняя подача питательных веществ для заживляющих агентов или их замена. Инновационная система лишайников для бетона использует цианобактерии, превращающие воздух и солнечный свет в питательные вещества, и нитчатые грибы, производящие минералы для заделки трещин. Работая вместе, эти микроорганизмы выживают только за счет воздуха, света и воды. Автономность этой системы отличает ее от предыдущих попыток создания самовосстанавливающегося бетона [17]. Однако у новой технологии найдется и пара минусов: стоимость производства такого бетона выше обычного и нужно убедиться, что бактерии и грибы не навредят окружающей среде. Пока материал тестируют в лаборатории. Ученые проверяют, как он поведет себя в реальных условиях – под дождем, морозом и интенсивными нагрузками.

Рассмотренные технологии создания самовосстанавливающегося бетона открывают новые возможности для повышения долговечности строительных

материалов. Однако их практическое применение требует тщательной оценки экономической целесообразности и экологических последствий.

### **Экологический и экономический эффект**

Внедрение самовосстанавливающегося бетона способно оказать комплексное положительное воздействие как на окружающую среду, так и на экономику строительной отрасли.

Экологический эффект технологии проявляется по нескольким направлениям.

- 1) Сокращение выбросов CO<sub>2</sub>. Поскольку бетонные конструкции служат дольше и требуют меньше ремонтов, снижается объем производства нового бетона. Это прямо ведет к уменьшению выбросов парниковых газов от цементных заводов, которые являются одним из крупнейших промышленных источников CO<sub>2</sub>.
- 2) Сокращение отходов. Значительное увеличение срока службы зданий и сооружений отодвигает их снос на десятки лет. Это сокращает объем строительного мусора, отправляемого на свалки, переработка которого сегодня является дорогостоящей и малорентабельной.
- 3) Экономия природных ресурсов. Снижение потребности в ремонте и новом строительстве означает сохранение огромных объемов первичных ресурсов — песка, щебня, воды и металла для арматуры, добыча которых наносит значительный ущерб экосистемам.

Экономический эффект не менее значителен и формирует новую экономику жизненного цикла сооружений.

- 1) Снижение эксплуатационных расходов. Основная экономия достигается за счет сокращения затрат на регулярные осмотры, техническое обслуживание и капитальные ремонты. Это особенно критично для объектов инфраструктуры (мостов, тоннелей, плотин), ремонт которых требует огромных средств и ведет к их простоям.
- 2) Экономия материалов. Меньше средств тратится на закупку цемента, наполнителей и арматуры для ремонтных работ.
- 3) Увеличение межремонтных сроков и срока службы. Конструкции становятся более долговечными и надежными, что повышает безопасность и снижает совокупную стоимость владения объектом на протяжении всего периода его эксплуатации.

### **Сложности массового внедрения технологии**

Несмотря на очевидные перспективы, широкому распространению самовосстанавливающегося бетона препятствует ряд существенных барьеров.

- 1) Высокая стоимость. Все инновационные технологии (бактериальные добавки, микрокапсулы, синтетические системы) значительно увеличивают себестоимость бетонной смеси по сравнению с традиционными аналогами.
- 2) Сложность исполнения и контроля. Технологии требуют тщательного соблюдения рецептур и условий производства, а также контроля качества на всех этапах, что усложняет их внедрение на стандартных производствах.
- 3) Технологические ограничения эффективности. Существующие методы эффективны преимущественно для заделки микротрещин (шириной до 0,5-1 мм).

Восстановление крупных повреждений остается проблематичным. Некоторые системы, например, на основе полимерных капсул, имеют ограниченный срок годности и могут работать лишь однократно в одной зоне.

4) Недостаток долгосрочных исследований. Отсутствие данных о поведении материалов в реальных условиях в течение 30-50 лет не позволяет полностью оценить их долговечность и потенциальные риски, что сдерживает разработку нормативной базы и принятие технологии проектировщиками.

5) Консервативность строительной отрасли. Строительство характеризуется строгими стандартами и высоким уровнем ответственности за безопасность. Внедрение любых новшеств, особенно биологического характера, происходит медленно и требует длительных процедур сертификации.

Сравнительный анализ ключевых технологий в таблице 1 наглядно демонстрирует их текущие преимущества и недостатки.

Таблица 1. Сравнительная характеристика технологий создания самовосстанавливающегося бетона

Характеристика	Технология создания		
	Биобетон (бактериальный)	Микрокапсулы с полимером	Синтетическая лишайниковая система
1	2	3	4
Принцип действия	Бактерии производят карбонат кальция (известняк) для заполнения трещин	Трещина разрывает капсулу, высвобождая полимер, который затвердевает	Симбиоз цианобактерий и грибов автономно производит биоминералы и биополимеры
Ширина трещины	До 0,5-0,8 мм	До 0,3-0,5 мм	Исследуется (лабораторная стадия)
Долговечность	Высокая (бактерии в анабиозе могут сохранять жизнеспособность годами)	Ограниченная (срок годности полимера и капсул ~1-3 года)	Потенциально высокая (система автономна и может работать многократно)
Автономность	Условная (требует запаса питательных веществ в капсулах)	Низкая (однократное срабатывание в конкретной зоне)	Высокая (микроорганизмы питаются за счет воздуха, света и воды)
Стоимость	Высокая	Средняя	Очень высокая (сложная биотехнология)
Сложность производства	Высокая (необходима инкапсуляция бактерий и питательной среды)	Средняя (процесс создания и внедрения капсул)	Очень высокая (создание стабильной симбиотической системы)
Уровень исследований	Широко исследуется, есть пилотные проекты и	Широко исследуется, много лабораторных данных	Начальная стадия (преимущественно лабораторные исследования)

	коммерческие образцы		
Основной барьер	Стоимость, контроль жизнеспособности бактерий в долгосрочной перспективе	Ограниченный срок службы и однократность действия	Неисследованность долгосрочных эффектов, потенциальное экологическое влияние, стоимость

Несмотря на существующие барьеры, в первую очередь высокую стоимость и необходимость долгосрочных исследований, потенциал этой технологии очевиден. Её внедрение способно коренным образом изменить экономику строительства, значительно сократив расходы на обслуживание и ремонт инфраструктуры на протяжении всего её жизненного цикла. Одновременно это является мощным инструментом в решении экологических проблем, позволяя сократить углеродный след отрасли и объемы строительных отходов.

Дальнейшее совершенствование технологий и неизбежное снижение их стоимости открывают путь к массовому применению самовосстанавливающегося бетона. В перспективе он может стать новым отраслевым стандартом, обеспечивая создание более безопасной, долговечной и устойчивой инфраструктуры для будущих поколений.

#### Список литературы:

1. Самовосстанавливающийся бетон: Технология получения и свойства – Текст: электронный / URL: <https://dtf.ru/science/2691081-samovosstanavlivayushii-sya-beton-tehnologiya-polucheniya-i-svoistva>
2. Методическое пособие По назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учетом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл / Москва 2019, 122 с – Текст: электронный / URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719154.pdf>
3. Бабицкий В.В., Ковшар С.Н. Контроль качества и эксплуатационная долговечность бетонных и железобетонных изделий и конструкций / Минск 2014, С. 58 – Текст: электронный / URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/9003/КОНТРОЛЬ%20КАЧЕСТВА.pdf?sequence=1>
4. 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 – Текст: электронный / URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-nauchnyh-issledovaniy-v-oblasti-samovosstanavlivayushchih-sya-betonov/viewer>
5. Абашкин Р.Е., Руднев М.О. Перспективы применения самовосстанавливающихся материалов / XI Международная науч.-практ. конф. «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации»: сб. науч. тр. – 2014. - Т. 1. – С. 25-28.



6. Акарачкин С.А. Самовосстанавливающиеся материалы / Решетневские чтения 2014: материалы XVIII Междунар. науч. конф. – Красноярск, 2014. – С. 329-330.
7. Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Фомичев В.Т. Химические аспекты процесса устранения трещин бетона с помощью бактерий / Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2018. – № 3. – Текст: электронный / URL: <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf>
8. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Самовосстанавливающиеся бетоны, модифицированные микробиологической добавкой: дис. канд. техн. наук. – М., 2019. – 240 с.
9. Оценка перспектив применения самовосстанавливающихся материалов и технологий на их основе / Н.Н. Ситников, И.А. Хабибуллина, В.И. Машенко, Р.Н. Ризаханов / Перспективные материалы. – 2018. – № 2. – С. 5-16. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-2-5-16.
10. Ткач Е.В., Семенов В.С., Ткач С.А. Высокоэффективные модифицированные гидро-фобизированные бетоны с улучшенными физико-техническими свойствами / Бетон и железобетон – взгляд в будущее: науч. тр. III Всерос. конф. по бетону и железобетону. – 2014. – Т. 5. – С. 113-123.
11. ФУНДАМЕНТАЛЬНО.РФ: сайт. – Текст: электронный / URL: <http://xn--80aakf5adeeck4bfm6j.xn-plai/news/jelastichnyj-beton.html>
12. Голландский микробиолог разработал самовосстанавливающийся бетон: сайт. – Текст: электронный / URL: <https://geektimes.ru/post/250502/>
13. Колчина Т.О. Биобетон – новое поколение самовосстанавливающихся бетонов / Безопасный и комфортный город: Всерос. науч.-практ. конф. – Орел, 2018. – С. 102-105.
14. Самовосстанавливающийся бетон: будущее строительства в 2025 году – Текст: электронный / URL: <https://saraswatichandra.in/self-healing-concrete-lab-to-site-2025/>
15. Александрова Е. В., Лосев Г. В. Инновационные технологии в строительстве сельскохозяйственных сооружений: самовосстанавливающийся бетон // Вестник сельского развития и социальной политики. 2020. № 4 (28), с. 27–30. – Текст: электронный / URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-tehnologii-v-stroitelstve-selskohozyaystvennyh-sooruzheniy-samovosstanavlivayuschiysya-beton>
16. Суровенко В.Б. Самовосстанавливающийся бетон — инновационный материал в строительстве – Текст: электронный / URL: <https://moluch.ru/archive/470/103378>
17. Рокая Ниша Разработка системы совместного культивирования диазотрофных цианобактерий и нитчатых грибов для потенциального применения в самовосстанавливающемся бетоне – Текст: электронный / URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492825006051>

**Аннотация:** В данной статье рассматривается самовосстанавливающийся бетон как перспективный инновационный материал в строительстве, способный

автономно залечивать трещины и повышать долговечность конструкций. Статья освещает ключевые технологии создания материала, включая бактериальный метод, использование микрокапсул и новейшие разработки на основе синтетических лишайниковых систем. Кроме того, анализируются экологический и экономический эффекты от внедрения технологии, а также основные барьеры ее массового распространения, такие как стоимость и нормативные требования.

**Ключевые слова:** самовосстанавливающийся бетон, биобетон, бактериальное самовосстановление, микрокапсулы, синтетическая лишайниковая система, долговечность бетона, экологический эффект, экономическая эффективность, инновационные строительные материалы.