

безопасность в тёмное время суток. Светящиеся конструкции могут быть использованы в качестве визуальных ориентиров, повышающих комфортность восприятия городской среды и усиливающих её эстетическую привлекательность. Такие решения будут особенно актуальны для благоустройства парков, скверов, пешеходных зон и общественных пространств.

### Список литературы

1 Прозрачный бетон литракон – история создания, характеристики, технология. – URL: Stroyteh-Ural.ru (дата обращения: 25.06.2025).

2 Litracon Bt. Litracon. – URL: <https://www.litracon.hu/litracon> (дата обращения: 25.06.2025).

3 Прозрачный бетон (литракон) – инновация в строительстве. – URL: [gdebe-ton.ru](http://gdebe-ton.ru). (дата обращения: 25.06.2025).

УДК 691.32

## САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЙСЯ БЕТОН

*М. В. ЧЕТЧАЕВ*

*Научный руководитель – А. С. Чугунова (ассистент)*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Бетон – один из наиболее широко используемых строительных материалов благодаря своей высокой прочности и доступности. В его состав входят вяжущее (цемент), крупный и мелкий заполнитель (щебень или гравий и песок) и затворитель (вода). В процессе твердения и эксплуатации под воздействием нагрузок и внешних факторов в бетоне могут образовываться трещины. Через них внутрь конструкции проникает влага, что приводит к коррозии арматуры, а также вымыванию компонентов цементного камня. Образовавшаяся ржавчина расширяется, побуждая новые разрушения, а вымывание, в свою очередь, разрушает бетон, понижая его прочность и долговечность, из этого следует увеличение размеров трещин, и происходит расслоение [1]. Безусловно, это указывает на актуальность вопроса с возможностью восстановления бетона в процессе эксплуатации. Одним из решений этой проблемы является самовосстанавливающийся бетон.

Самовосстанавливающийся бетон – это инновационная разработка, способная самостоятельно заделывать трещины, что делает его перспективным материалом для строительства будущего. Концепция была предложена микробиологом Хенком Йонкерсом из Делфтского технического университета, который находится в Нидерландах. Метод основан на внедрении капсул с бактериями и питательной средой (лактатом кальция) в бетон. При появлении трещин структура капсул нарушается, куда проникает вода, активируя

бактерии, то есть они вступают в реакцию с лактатом кальция и образуют известняк, который заполняет трещины [2].

В самовосстанавливающемся бетоне используются разные виды микроорганизмов на основе бактерий. Эти бактерии способствуют выделению карбоната кальция и тем самым закрывают трещины. Чаще всего используют штаммы рода *Bacillus*, так как они образуют споры и выдерживают щелочную среду бетона [3]:

1 *Bacillus pasteurii* – непатогенная бактерия из почвы, активно продуцирующая уреазу. Штамм DSM33 способен восстанавливать трещины шириной от 0,1 до 2 мм, поэтому считается одним из самых применяемых для биоминерализации.

2 *Bacillus megaterium* – палочковидная бактерия, устойчивая к температуре от 3 до 45 °С. Благодаря полисахаридам на клеточной стенке клетки образуют цепочки, что повышает её эффективность в заживлении трещин.

3 *Bacillus subtilis* – непатогенная бактерия, образующая долгоживущие споры, сохраняющиеся десятилетиями. Она способна работать как в аэробных, так и в анаэробных условиях, и перспективна для будущих строительных применений.

4 *Bacillus cereus* CS1 – щелочеустойчивый штамм, который может заделывать трещины шириной 100–800 мкм, что делает его полезным для тонких дефектов.

5 *Bacillus sphaericus* – устойчива к высоким температурам, химическим веществам и УФ-излучению. Способна закрывать трещины до 0,97 мм и долго сохраняет жизнеспособность в бетоне.

6 *Bacillus alcalophilus* – безопасная для человека бактерия, легко адаптирующаяся к сильнощелочной среде. Её можно напрямую добавлять в цементные материалы.

7 *Sporosarcina pasteurii* – штамм с высокой уреазной активностью и солеустойчивостью. Он успешно заделывает трещины шириной около 0,4 мм.

Важным аспектом является то, что микроорганизмы должны активизироваться в нужный момент. Для этого в бетон помещаются биоразлагаемые капсулы диаметром 2 мм, содержащие в себе бактерии и питательное вещество, например лактат кальция, который представляет собой кальциевую соль молочной кислоты ( $2(C_3H_5O_2)Ca$ ). В твёрдом бетоне капсулы сохраняют свою целостность, и бактерии находятся в состоянии анабиоза. При попадании воды в трещину биоразлагаемый пластик растворяется, и влага побуждает бактерии прорасти и стать метаболически активными. Микроорганизмы начинают процесс метаболизма и производят карбонат-ионы. В свою очередь карбонат-ионы контактируют с ионами кальция, тем самым образуя известняк ( $CaCO_3$ ), который препятствует влаге дальше продвинуться

в толщу бетона. Если повреждение небольшое и быстро герметизируется, оно не представляет опасности – трещина не увеличивается, а целостность бетонной конструкции сохраняется.

Однако важным является и соблюдение следующих факторов, влияющих на восстановление бетона.

Во-первых, критически важным для эффективного восстановления бетона является концентрация бактерий. При низких концентрациях клеток ( $10^6$ – $10^7$  клеток/см<sup>3</sup>) производится слишком мало уреазы, и реакции восстановления не происходит. Оптимальной является концентрация  $10^8$  клеток/см<sup>3</sup> – она дает максимальное количество уреазы и лучшее заживление. Но также при превышении этого порога осаждение кальцита не увеличивается, а скорость процесса даже снижается из-за изменения pH и того, что избыток ионов кальция «обволакивает» клетки, блокируя выделение уреазы.

Вторым фактором для эффективного самовосстановления бетона является влияние температуры, так как она напрямую влияет на активность и выживаемость микроорганизмов. Оптимальным для этого процесса считается диапазон от 30 до 35 °C – в этих условиях микроорганизмы лучше всего растут, а их фермент уреазы проявляет наивысшую активность, что ускоряет образование карбоната кальция (CaCO<sub>3</sub>) и заполнение трещин. При низких температурах (около 10 °C) метаболизм бактерий резко замедляется. Они впадают в состояние покоя, фаза их роста значительно удлиняется, а производство CaCO<sub>3</sub> сокращается, что приводит к очень медленному заживлению. Высокие температуры (выше 40 °C) не менее опасны: они вызывают термический стресс, деактивируют уреазу и могут привести к гибели бактерий. В результате процесс биологического восстановления практически останавливается.

Третьим определяющим фактором является устойчивость бактерий к щелочной среде бетона для активного «залечивания» трещин.

Основная цель создания самовосстанавливающегося бетона – это значительное снижение затрат на обслуживание и ремонт конструкций. Обычный бетон требует постоянного и дорогостоящего устранения трещин, тогда как самовосстанавливающийся бетон способен самостоятельно залечивать мелкие повреждения. Бетонные конструкции со временем разрушаются из-за внешних воздействий, нагрузок и экстремальных условий. Самовосстанавливающийся бетон решает эту проблему, устраняя трещины на ранних стадиях и не давая им развиваться в серьёзные повреждения. В результате конструкции дольше сохраняют прочность и надёжность. Кроме экономических преимуществ, самовосстанавливающийся бетон более экологичен, так как производство цемента – один из основных источников выбросов CO<sub>2</sub> в мире. Сокращая потребность в ремонте и замене, самовосстанавливающий-

ся бетон помогает снизить углеродный след, связанный с изготовлением новых материалов и проведением восстановительных работ. Особенно важен самовосстанавливающийся бетон для критической инфраструктуры: мостов, тоннелей и дорог. Здесь даже небольшие трещины могут привести к серьёзным последствиям. Самовосстановление повышает устойчивость таких объектов, обеспечивая их долговечность и безопасность в условиях сурового климата или природных катастроф [1, 5].

Таким образом, использование самовосстанавливающегося бетона сокращает трудоёмкость и затраты на ремонт зданий, а также снижает выброс углекислого газа при производстве бетона. Данный способ борьбы с трещинами станет очень выгодным для изготовителей железобетонных изделий и потребителей, так как существующие мероприятия являются дорогими и трудоёмкими. Поскольку биобетон всё ещё находится в стадии разработки, этот вид бетона используется в ограниченном масштабе и не широко распространен. Некоторые основные препятствия – это затраты и производство. На данный момент стоимость производства самовосстанавливающегося бетона примерно в 2 раза превышает стоимость производства обычного. И всё ещё продолжаются исследования с использованием различных подходов для снижения затрат и поиска более дешевого материала, а именно замена лактата кальция каким-нибудь другим веществом, чтобы новый бетон стал более доступным. Самовосстанавливающийся бетон имеет больше преимуществ, чем недостатков, и его можно назвать материалом будущего. Новая разработка – это соединение природы и искусственного материала в одном целом.

### Список литературы

1 **Ткач, Е. В.** Высокоэффективные модифицированные гидрофобизированные бетоны с улучшенными физико-техническими свойствами / Е. В. Ткач, В. С. Семенов, С. А. Ткач // Бетон и железобетон – взгляд в будущее : материалы II Междунар. конф., 12–16 мая 2014 г., г. Москва : в 7 т. Т. 5. – М., 2014. — С. 113–123.

2 Самовосстанавливающийся бетон: свойства и технология работы / С. М. Аксенова, А. Д. Бабаян // Технологии строительства. – 2019. – № 2. – С. 28–34.

3 Самовосстанавливающийся бетон в железобетонных конструкциях / В. Н. Яклешкин, Р. Р. Хасаншина, А. Ф. Пыркин, Е. В. Люкшенкова // Молодой ученый. – 2023. – № 28. – С. 29–31.

4 Bacteria-powered self-healing concrete: Breakthroughs, challenges, and future prospects / Ibrahim M. Elgendy, Nehal E. Elkaliny, Hoda M. Saleh [et al.] // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. – 2025. – Vol. 52. – URL: <https://academic.oup.com/jimb/article/doi/10.1093/jimb/kuae051/792350> (date of access: 06.12.2025).

5 Smart concretes and structures: A review / Baoguo Han, Yunyang Wang, Sufen Dong [et al.] // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2015. – Vol. 26, is. 11 – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1045389X15586452> (date of access: 06.12.2025).