



УДК 691.32:626

С. Д. СЛЕПОВ<sup>1</sup>, аспирант кафедры гидротехнических и транспортных сооружений; А. Е. КОРШУНОВ<sup>2</sup>, техн. директор

## ПРИНЦИП РАБОТЫ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ БЕТОНА И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕМОНТЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-92; (920) 019-31-50; эл. почта: sevchansky@mail.ru

<sup>2</sup>ООО НПФ «Лаборатория огнезащиты».

Россия, 606016, Нижегородская обл., г. Дзержинск, Автозаводское шоссе, д. 51.

Тел./факс: (8831) 231-03-40; эл. почта: info@stabiterm.ru

*Ключевые слова:* самовосстанавливающийся бетон, микрокапсулы, заживляющее вещество, структура бетона, восстановление бетона, гидротехнические сооружения.

---

*В статье рассмотрены принципы работы самовосстанавливающегося бетона и возможность его применения при строительстве и ремонте гидротехнических сооружений.*

---

Сегодня бетон является одним из основных строительных материалов гидротехнических сооружений (далее ГТС) и его модернизация, обусловленная изменением структуры с целью повышения надежности и долговечности сооружения, становится необходимой мерой.

Обзор российских и иностранных источников литературы показывает, что за последние десять лет в области строительных материалов произошел серьезный провыв, характеризующийся появлением новых материалов, способных изменить общие тенденции в строительстве.

Одним из таких материалов стал самовосстанавливающийся бетон. Термин «самовосстанавливающийся бетон» обозначает не конкретный материал, а общее название современных разработок, направленных на появление у материала возможности регенерации прочностных свойств после определенного разрушения и улучшение восприимчивости бетона к внешним воздействиям.

Одним из наиболее болезненных последствий внешних воздействий является трещинообразование. Появление трещин – неотъемлемая особенность бетона. Образовавшиеся в бетоне трещины и микротрещины пропускают воду и газы, увеличивают пористость и проницаемость материала. В долгосрочной перспективе такие повреждения способны привести к преждевременной коррозии арматуры. Как следствие, существенно снижается долговечность и надежность ГТС. Для продления срока службы конструкции крайне важно свести к минимуму распространение трещин.

На сегодняшний день разработки в области самовосстанавливающегося бетона можно условно разделить на два направления. Первое – это бетон с включением полимерных капсул в состав бетона, второе – включение в структуру бетона микроорганизмов [1].

### Полимерные микрокапсулы в структуре бетона

Определенных успехов в этой области добились южнокорейские ученые, предложившие включить в состав бетона специально изготовленные микрокапсулы.

Микрокапсула представляет собой оболочку шарообразной или неправильной формы (рис. 1) и содержит в себе полимерное заживляющее вещество. В качестве заживляющего вещества может выступать силикат натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), также известное как жидкое стекло.

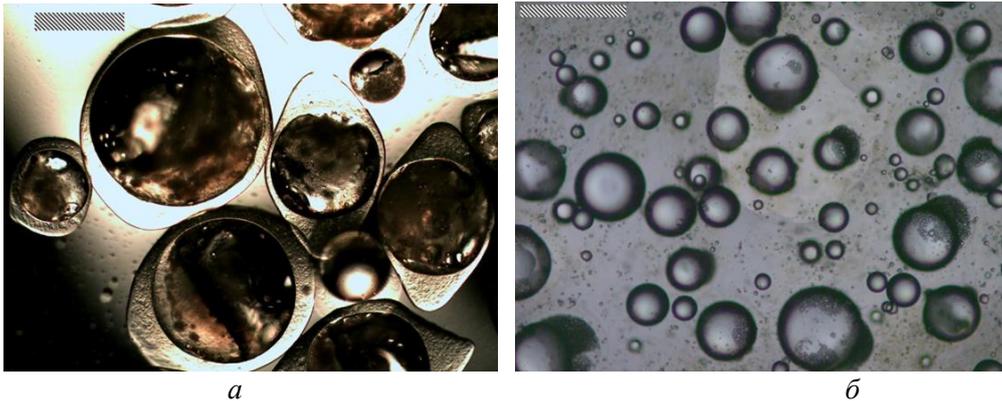


Рис. 1. Изображение микрокапсул, полученных при помощи оптического микроскопа: *а* – микрокапсулы неправильной формы; *б* – сферические микрокапсулы [3]

На этапе приготовления бетонного раствора микрокапсулы диспергируются в воде и смешиваются до однородной консистенции с цементным порошком в 5-ти % концентрации по отношению к общей массе цемента. Затем цементная паста формуется в призмы (40 x 40 x 160 мм), уплотняется и погружается в воду. Спустя 7 дней образцы подвергаются нагрузке на сжатие, изгиб, а также ударную нагрузку до момента образования трещины.

В момент образования трещины микрокапсулы разрываются (рис. 2) и содержащее вещество заполняет собой полость разрушения за счет капиллярного действия. Силикат натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) вступает в реакцию с гидроксидом кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), который естественным образом присутствует в бетоне, являясь продуктом гидратации цемента, образуя силикат кальция ( $\text{CaSiO}_3$ ). Образовавшийся гель действует как связующее и заживляющее вещество для трещины, затвердевающее со временем [2–6].



Рис. 2. Срез бетонной призмы, темные пятна – это разорвавшиеся микрокапсулы [3]

Исследования в области полимерного микрокапсулирования для самовосстанавливающегося бетона продолжают учеными из Англии, Китая, Южной Кореи, России, Соединенных Штатов Америки и др. Изучается размер и толщина оболочек микрокапсул, форма, метод производства и состав заживляющего вещества [2–6].

#### **Бактериальный бетон**

В основе следующего типа самовосстанавливающегося бетона лежат микроорганизмы, с помощью которых производится известняк для заполнения полости трещины.

Впервые ввести в бетонную матрицу бактерии предложил Хенк Джонкерс из Делфтского технического университета (Нидерланды). В бетонный раствор были добавлены бактерии рода *Bacillus* (палочковидные). Споры бактерий в состоянии анабиоза и питательные вещества на основе лактата кальция (кальциевая соль молочной кислоты, пищевая добавка E327), как два основных компонента самовосстановления вводятся в структуру бетона отдельно, в гранулах размером 2–4 мм. Это позволяет избежать досрочной активации компонентов в процессе приготовления бетонного раствора [1].

Вследствие образования трещины и попадания воды внутрь конструкции бактерии переходят из «спящей» фазы в активную, поглощая лактат кальция и выделяя карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), находящийся в растворенном состоянии, который заполняет полость трещины (рис. 3) [7–8].

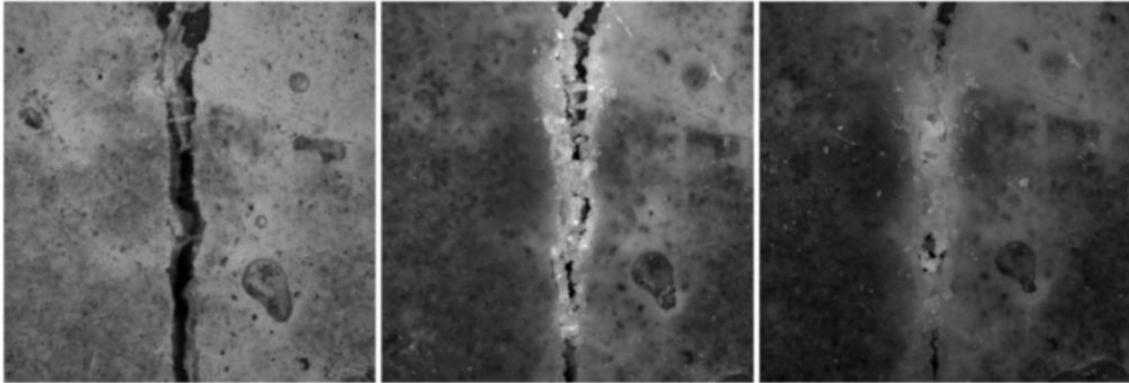


Рис. 3. Процесс заполнения полости трещины карбонатом кальция [7]

Процесс осаждения карбоната кальция (микробиологически индуцированное осаждение кальцита – *MICP*) напрямую зависит от четырех ключевых факторов: концентрация кальция, концентрация растворенного неорганического углерода, значение *pH* и наличие центров зародышеобразования [1, 9].

Самовосстанавливающий бетон можно классифицировать в зависимости от его поведения в процессе самовосстановления. Первая классификация по признаку старта реакции, а именно, автономные и зависимые. Для автономных материалов наличие повреждения уже является триггером для запуска процесса самовосстановления, а для зависимых материалов стимулом может служить какое-либо внешнее воздействие, например, нагрев или освещение. Другая классификация – деление самовосстанавливающихся материалов на внешние и внутренние. Процесс заживления основан на применении внешних регенерирующих компонентов, таких как микро- или нанокапсулы. Для придания бетону способности самовосстановления в их структуру на этапе приготовления вводят капсулы, и повреждение служит подвижной фазой для содержимого этих капсул. Для внутренних же самовосстанавливающихся материалов никаких особых регенерирующих веществ не требуется, протекает процесс внутреннего самовосстановления [1, 9].

Безусловно, бетон с возможностью самовосстановления является перспективным строительным материалом для ГТС. Учитывая сложные условия эксплуатации ГТС, такой материал способен серьезно увеличить надежность и долговечность конструкций. Однако, ограниченность исследований по применению самовосстанавливающегося бетона не в лабораторных условиях, а при ремонте и строительстве натуральных ГТС оставляет большую область для разработок и усовершенствования материала.

Следует уточнить, насколько эффективно осаждение выработанных бактериями минералов уплотняет трещины больших размеров, насколько снижается проницаемость вновь восстановленного места разрушения. Также необходимо выбрать виды бактерий, которые способны сохранять жизнеспособность и эффективность при различных условиях эксплуатации сооружения (зона переменного уровня воды, соленая вода, бетон криолитозоны и т.д.). Несмотря на то, что качественный прорыв в области самовосстановления бетона еще не достигнут, положительные тенденции для строительства и ремонта ГТС уже прослеживаются.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерофеев, В. Т. Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов / В. Т. Ерофеев, Аль Дулайми Салман Давуд Салман, В. Ф. Смирнов. – Текст : электронный // Транспортные сооружения : интернет-журнал. – 2018. – Том 5, № 4. – URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS418.pdf>.
2. Swapan Kumar Ghosh. Self-healing materials fundamentals, design strategies, and applications / Swapan Kumar Ghosh. – Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. – 307 с.
3. Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: Synthesis, characterisation and proof of concept. Smart materials and structures / A. Kanellopoulos, P. Giannaros, D. W. Palmer, M. A. Kerr, A. Al-Tabbaa. – 2017. – 26 (4).
4. Ramya, K. Experimental study on self healing concrete using Micro Encapsulation / K. Ramya, S. Hemevathi // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2017. – Volume 5, Issue 13.
5. Pelletier, M. Shukla A and Bose A 2011 Self-Healing Concrete with a Microencapsulated Healing Agent / M. Pelletier, R. Brown. – USA : Kingston.
6. Preparation and characterization of poly (ureaformaldehyde) walled dicyclopentadiene microcapsules / Z. Xiong, G. Zhu, J. Tang and others. – I C S H M. – 2013. – P. 220–224.
7. Жукова, Г. Г. Исследование применения самовосстанавливающегося бетона / Г. Г. Жукова, А. И. Сайфулина. – Текст : электронный // Construction and Geotechnics. – 2020. – Том 11, № 4. – С. 58–68. – DOI 10.15593/2224-9826/2020.4.05.
8. Карпов, М. В. Обоснование использования биобетонов для строительства гидротехнических сооружений / М. В. Карпов, А. А. Жиздюк, О. В. Наумова. – Текст : электронный // Вестник евразийской науки. – 2022. – Том 14, № 5. – URL: <https://esj.today/PDF/14SAVN522.pdf>.
9. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Самовосстанавливающиеся бетоны, модифицированные микробиологической добавкой : специальность 05.23.05 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аль Дулайми Салман Давуд Салман ; Российский университет транспорта. – Москва, 2019. – 310 с.

**SLEPOV<sup>1</sup> Sevastyan Dmitrievich, postgraduate student of the chair of hydraulic engineering and transport structures; KORSHUNOV<sup>2</sup> Aleksey Evgenievich, technical director**

**OPERATING PRINCIPLE OF SELF-HEALING CONCRETE AND ITS  
POTENTIAL APPLICATION IN THE CONSTRUCTION AND REPAIR OF  
HYDRAULIC STRUCTURES**

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-92; (920) 019-31-50; e-mail: [sevchansky@mail.ru](mailto:sevchansky@mail.ru)

<sup>2</sup>Fire Protection Laboratory LLC NPF.

51, Avtozavodskoe Rd., Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, 606016, Russia.

Tel./fax: (8313) 23-00-11, e-mail: [info@stabiterm.ru](mailto:info@stabiterm.ru)

*Key words:* self-healing concrete, microcapsules, healing agent, concrete structure, concrete restoration, hydraulic structures.

---

*The article discusses the principles of self-healing concrete and the possibility of its use in the construction and repair of hydraulic structures.*



## REFERENCES

1. Erofeev V. T., Al Dulaymi Salman Davud Salman, Smirnov V. F. Bakterii dlya polucheniya samovosstanavlivayushchikhsya betonov [Bacteria for producing self-healing concretes]. *Transportnye sooruzheniya* [Transport Structures], 2018, Vol. 5, № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS418.pdf>.
2. Swapan Kumar Ghosh. *Self-healing materials fundamentals, design strategies, and applications*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, 307 p.
3. Kanellopoulos A., Giannaros P., Palmer D. W., Kerr M. A., Al-Tabbaa A. Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: Synthesis, characterisation and proof of concept. *Smart materials and structures*, 2017, 26 (4).
4. Ramya K., Hemevathi S. Experimental study on self-healing concrete using Micro Encapsulation. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2017, Vol. 5, Issue 13.
5. Pelletier M., Brown R., Shukla A., Bose A. *Self-Healing Concrete with a Microencapsulated Healing Agent*. USA, Kingston. 2011
6. Xiong Z., Zhu G., Tang J. et al. Preparation and characterization of poly (ureaformaldehyde) walled dicyclopentadiene microcapsules. *I C S H M*, 2013, P. 220–224.
7. Zhukova G. G., Sayfulina A. I. Issledovanie primeneniya samovosstanavlivayushchegosya betona [Research on the application of self-healing concrete]. *Construction and Geotechnics*, 2020, Vol. 11, № 4, P. 58–68, DOI 10.15593/2224-9826/2020.4.05.
8. Karpov M. V., Zhizdyuk A. A., Naumova O. V. Obosnovanie ispolzovaniya biobetonov dlya stroitelstva gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Justification of the use of bioconcretes for the construction of hydraulic structures]. *Vestnik evraziyskoy nauki* [The Eurasian Scientific Journal], 2022, Vol. 14, № 5. URL: <https://esj.today/PDF/14SAVN522.pdf>.
9. Al Dulaymi Salman Davud Salman. *Samovosstanavlivayushchiesya betony, modifitsirovannye mikrobiologicheskoy dobavkoy* [Self-healing concretes modified with microbiological additive]: spetsialnost 05.23.05 : diss. ... kand. tekh. nauk. Rossiyskiy universitet transporta [Russian University of Transport]. Moscow, 2019, 310 p.

© С. Д. Слепов, А. Е. Коршунов, 2025

Получено: 04.06.2025 г.