УДК 691.32:620.193.3

**О. О. Сойчук**
**П.О. Зоря**
**В. П. Ковальський**

# САМОВІДНОВЛЮВАНИЙ БЕТОН: ПРИНЦИП ДІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

***Анотація***

*Дана робота присвячена дослідженню сучасних підходів до створення та застосування інтелектуальних будівельних матеріалів, зокрема самовідновлюваного бетону (self-healing concrete). У документі підсумовуються основні технічні аспекти функціонування технологій самовідновлення (бактеріальні методи, використання мікрокапсул із хімічними реагентами), аналізується їхній вплив на експлуатаційні властивості конструкцій, а також економічні та екологічні переваги збільшення міжремонтних термінів споруд. Наведено приклади досліджень, що демонструють ефективність затягування мікротріщин у бетоні за рахунок біомінералізації кальциту або гідратації спеціальних добавок. Метою цих тез є показати практичний зміст дослідження: пошук раціональних способів інтеграції відновлювальних агентів у бетонну суміш для підвищення довговічності та зниження експлуатаційних витрат у будівництві.*

**Ключові слова:** самовідновлюваний бетон, біомінералізація, microcracks, довговічність, кальцит, мікрокапсули.

***Abstract***

*This study focuses on modern approaches to creating and applying smart building materials, particularly self-healing concrete. The document summarizes the key technical aspects of self-healing technologies (bacterial methods, use of microcapsules with chemical agents), analyzes their impact on the operational properties of structures, and highlights the economic and environmental benefits of extending the maintenance-free life of buildings. Examples of research are provided, demonstrating the effectiveness of sealing microcracks in concrete through calcite biomineralization or hydration of special additives. The aim of this study is to demonstrate the practical significance of the research: the search for rational ways to integrate healing agents into the concrete mix to increase durability and reduce maintenance costs in construction.*

**Keywords**: self-healing concrete, biomineralization, microcracks, durability, calcite, microcapsules.

## Вступ

Традиційний бетон є основним конструкційним матеріалом сучасного будівництва, проте він володіє низькою міцністю на розтяг, що неминуче призводить до появи мікротріщин під дією експлуатаційних навантажень, усадки та температурних коливань [1-3]. Через ці мікротріщини всередину конструкцій проникає волога, кисень, хлориди та інші агресивні речовини, викликаючи корозію арматури та передчасне руйнування будівель. Ремонт залізобетонних споруд потребує значних фінансових витрат, а доступ до багатьох елементів (наприклад, підземних тунелів, фундаментів чи підводних опор) є технічно обмеженим або неможливим [4-6].

Тому сьогодні спостерігається значний інтерес до концепції «інтелектуальних» матеріалів, здатних до самостійного усунення дефектів без зовнішнього втручання. Застосування технологій самовідновлення в бетонах дає подвійний ефект: значно знижує витрати на технічне обслуговування інфраструктури та сприяє зменшенню викидів вуглекислого газу за рахунок продовження життєвого циклу споруд. У цій роботі обґрунтовано вибір самовідновлювальних добавок для бетонних сумішей та описано механізм кольматації тріщин на ранніх стадіях їх розвитку.

Метою роботи є аналіз сучасних підходів до створення та застосування самовідновлюваного бетону.

**Результати дослідження**

Процес самовідновлення бетону може відбуватися за рахунок природних факторів (автогенне відновлення через подальшу гідратацію незалішеного цементу), проте його можливості обмежені тріщинами завширшки до 0,1 мм. Для затягування ширших дефектів застосовують автономні методи: бактеріальну біомінералізацію або закладання мікрокапсул з полімерними чи силікатними реагентами.

Найбільш перспективним напрямом є біоцемент, що містить життєздатні спори бактерій (наприклад, роду Bacillus) разом із поживним середовищем (лактатом кальцію). Коли в бетоні з'являється тріщина і туди потрапляє волога та кисень, бактерії виходять зі стану анабіозу, починають активно розмножуватися і метаболізувати лактат, виділяючи карбонат кальцію (вапняк). Цей мінерал щільно заповнює порожнину тріщини, відновлюючи водонепроникність матеріалу[7-10].

Експериментальні дослідження та натурні спостереження показують, що кінетика затягування тріщин безпосередньо залежить від дисперсності та характеру розподілу відновлювальних агентів у структурі цементного матричного композиту. У випадку використання мікрокапсул із хімічними реагентами (на основі двокомпонентних епоксидних смол, поліуретанів або рідких силікатів) руйнування стінок капсул під дією розкриття тріщини призводить до миттєвого вивільнення агента за рахунок капілярних сил. Полімеризація або гелеутворення відбувається безпосередньо в зоні дефекту.

Проте критичним аспектом тут є забезпечення хімічної сумісності капсул із лужним середовищем гідратованого цементного тісту (pH 12.5–13.0). Оболонка капсули має бути достатньо міцною, щоб витримати інтенсивні навантаження під час приготування суміші у бетонозмішувачі та ущільнення вібрацією, але водночас крихкою для руйнування від мінімального напруження розтягу в момент утворення мікротріщини (зазвичай при ширині розкриття від 0,05 до 0,3 мм).

Для кращого наочного розуміння процесів самовідновлення в структурі цементного каменю нижче наведено схематичний опис мікромеханізмів кольматації тріщин рисуок 1.

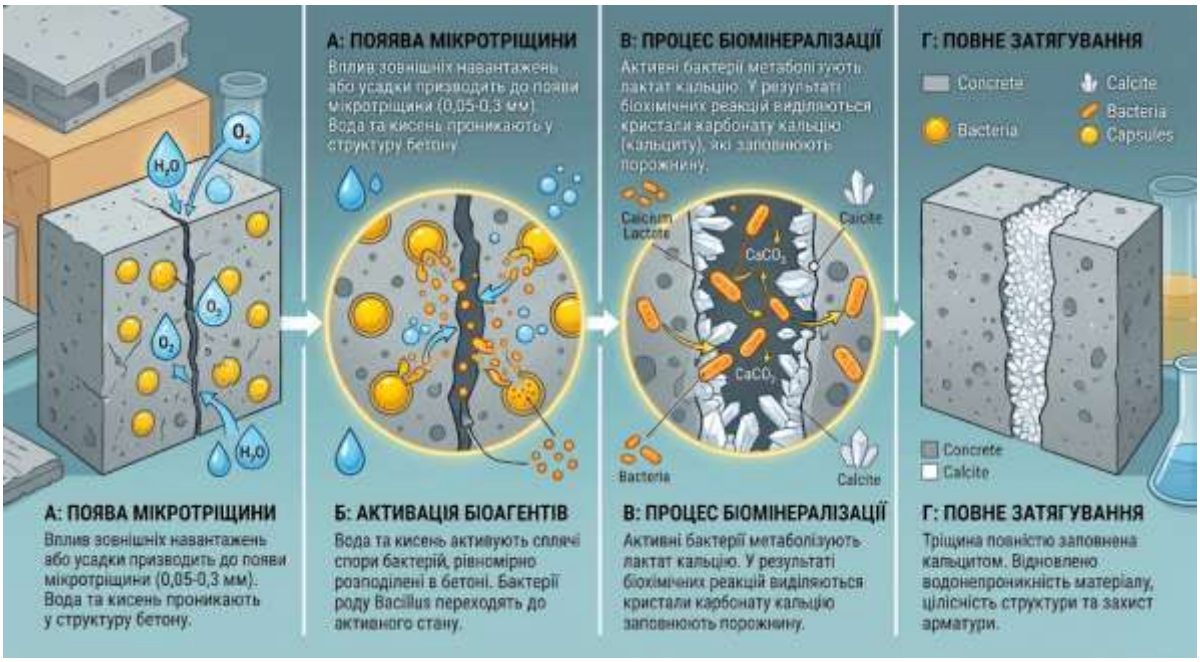



Рис. 1. Принцип дії біологічного самовідновлення мікротріщин у бетонній матриці за участю спор бактерій та лактату кальцію.

Альтернативний і наразі найбільш екологічно стійкий підхід ґрунтується на застосуванні біомінералізації. Спори бактерій роду Bacillus (зокрема Bacillus pseudofirmus або Bacillus cohnii) у комплексі з поживними добавками вводяться до складу сухої бетонної суміші. Унікальною властивістю цих мікроорганізмів є їхня здатність виживати в екстремальних умовах твердіння бетону, зберігаючи

життєздатність десятиліттями.

Коли у конструкції виникає тріщина і через неї починає фільтруватися волога, спори активізуються. Метаболічна активність бактерій супроводжується споживанням органічних поживних речовин і виділенням іонів карбонату, які у присутності іонів кальцію з пор цементного каменю утворюють осад нерозчинного кальциту ($CaCO_3$). На відміну від традиційних цементних гідратів, цей кристалічний осад має високу щільність і здатність повністю блокувати шлях для агресивних іонів хлору та сульфатів, які є головними каталізаторами корозії робочої арматури.

З точки зору будівельної фізики та механіки руйнування, ефект кольматації мікротріщин має вирішальне значення для підвищення марки бетону за водонепроникністю та морозостійкістю . Відновлення суцільності матеріалу на локальних ділянках знімає концентрацію напружень навколо вершини тріщини, перешкоджаючи її подальшому макроскопічному розвитку. Це особливо актуально для інженерних споруд, що експлуатуються в умовах постійного динамічного навантаження та агресивного середовища.

Економічна ефективність впровадження самовідновлюваних бетонів полягає не лише в прямому скороченні обсягів поточних ремонтів, а й у мінімізації витрат на експлуатаційний моніторинг важкодоступних конструктивних елементів. Зменшення швидкості карбонізації та захист від проникнення вологи дозволяють суттєво знизити захисний шар бетону без втрати проєктної довговічності, що дає додаткову економію матеріалів.

Для аналізу ефективності технологій у таблиці 1 наведено порівняння характеристик звичайного та різних типів самовідновлюваного бетону при тривалій експлуатації.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика технологій самовідновлення бетону

| **Тип бетону за способом відновлення** | **Активний відновлювальний агент** | **Максимальна ширина затягуваної тріщини, мм** | **Зміна водонепроникності після відновлення** | **Орієнтовне збільшення терміну служби споруди** |
|---|---|---|---|---|
| Традиційний (автогенне відновлення) | Негідратований цемент | 0,10 | Часткове відновлення | Контрольний показник |
| Бактеріальний (біомінералізація) | Спори бактерій + лактат кальцію | 0,60 | Повне відновлення (до 95%) | у 1,5–2,0 рази |
| Капсульний (хімічне відновлення) | Мікрокапсули з епоксидною смолою | 0,40 | Відновлення міцності на розтяг | у 1,3–1,6 рази |

З табл. 1 випливає, що бактеріальний метод є найбільш ефективним для забезпечення герметичності конструкцій, оскільки дозволяє ліквідувати тріщини завширшки до 0,60 мм, повністю перекриваючи шлях для проникнення вологи. Капсульна технологія, у свою чергу, показує кращі результати у відновленні структурної міцності елементів, оскільки полімерна смола, що вивільняється при руйнуванні капсули тріщиною, діє як внутрішній клей.

Впровадження таких матеріалів має колосальні перспективи для будівництва об'єктів підвищеної відповідальності: гідротехнічних споруд, резервуарів, мостових конструкцій, злітно-посадкових смуг, а також підземних паркінгів та сховищ.

**Висновки**

У даній роботі обґрунтовано можливість та високу доцільність переходу до масового виробництва та впровадження самовідновлюваних бетонів у сучасну будівельну практику. Використання бактеріальних добавок та хімічних мікрокапсул дозволяє автоматично вирішувати проблему утворення тріщин на

початковому етапі, запобігаючи доступу вологи до сталевої арматури.

Хоча первинна вартість сумішей з інтелектуальними компонентами є вищою за традиційні аналоги, довгостроковий економічний ефект повністю компенсує ці витрати завдяки радикальному зменшенню або повній ліквідації потреби в поточних ремонтах. Самовідновлюваний бетон є ключовим елементом створення сталої інфраструктури, що знижує антропогенне навантаження на навколишнє середовище та забезпечує довговічність будівельних об'єктів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ


1. Ковальський, Віктор Павлович, et al. "Вплив спеціальних модифікуючих добавок на експлуатаційні характеристики доріжного цементного бетону в умовах сучасних логістичних викликів." Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві 40.1 (2026): 41-46.
2. Галяновська, В. О., П. О. Зоря, and В. П. Ковальський. Модифікація бетонів полімерними фібрами для підвищення ударної в'язкості. Вінницький національний технічний університет, 2026.
3. Вознюк, І. М., М. В. Рижкова, and В. П. Ковальський. *Використання композитних сумішей в адитивному будівництві*. Diss. Вінницький національний технічний університет, 2026.
4. Тарнавський, В. В., В. П. Ковальський, М. С. Барбалюк. *Напрямки використання відходів промисловості для приготування важких бетонів*. Вінницький національний технічний університет, 2026.
5. Лемешев М. С. Теоретичні передумови підвищення довговічності електропровідних бетонів [Текст] / М. С, Лемешев, О. В. Березюк // Тези доповідей II-ої міжнародної інтернет-конференції «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій», 12 листопада 2014 . – Вінниця: ВНТУ, 2014. – Ч. 1. - С. 21.
6. Ковальський В. П. Композиційні в'яжучі речовини на основі відходів промисловості [Електронний ресурс] / В. П. Ковальський, Т. Г. Шулік, В. П. Бурлаков // Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 14-23 березня 2018 р. - Електрон. текст. дані. - 2018. - Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2018/paper/view/5035/4128
7. Любарський, В. С., and В. П. Ковальський. "Переваги використання енергоефективних композиційних в'яжучих." Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference «Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions», Dnipro, Ukraine, June 2-3, 2022: 183-185., 2022.
8. Очеретний, В. П., В. П. Ковальський, and М. П. Машницький. "Комплексна активна мінеральна добавка на основі відходів промисловості." (2006). Дорошенко В. М., Маркевич О. І. Інтелектуальні будівельні матеріали: самовідновлювані цементні композити // Будівельні матеріали і вироби. – 2025. – № 1. – С. 24–31.
9. Дорошенко В. М., Маркевич О. І. Інтелектуальні будівельні матеріали: самовідновлювані цементні композити // Будівельні матеріали і вироби. – 2025. – № 1. – С. 24–31.
10. Сергієнко Ю. В. Біомінералізація в технології бетонів та підвищення їх водонепроникності // Сучасні технології в будівництві. – 2023. – Вип. 4. – С. 112–119.



**Сойчук Оксана Олегівна** — студентка гр. БМ-24б, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет. Email: oksanasoishuk@gmail.com

***Зоря Павло Олегович*** — аспірант кафедри міського будівництва та архітектури, Вінницький національний технічний університет, email: pavlo.zorja@gmail.com

***Ковальський Віктор Павлович*** — канд. техн. наук, доцент кафедри міського будівництва та архітектури, Вінницький національний технічний університет, email: kovalskiy@vntu.edul.ua

**Oksana Soychuk O.** — student in Class BM-24b, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University. Email: oksanasoishuk@gmail.com

**Pavlo Zoria O.** — Postgraduate student of the Department of Urban Construction and Architecture, Vinnytsia National Technical University, email: pavlo.zorja@gmail.com

***Viktor Kovalskyi P.*** — Ph.D. in Engineering, Associate Professor in the Department of Urban Construction and Architecture, Vinnytsia National Technical University., email: kovalskiy@vntu.edul.ua