

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТИПІВ БЕТОНУ, ЩО САМОВІДНОВЛЮЄТЬСЯ

Вінницький національний технічний університет

### **Анотація**

*Найпопулярнішим методом обробки бетонних конструкцій є метод самовідновлення для підвищення довговічності бетону. Взаємозв'язок між тріщинами та можливими методами самовідновлення є складним і враховують екологічні аспекти. У даній статті проведено огляд біологічних, природних та хімічних механізмів самовідновлення бетону. Дослідження спрямоване на вивчення механізмів самовідновлення, а також їхньої здатності забезпечувати герметизацію тріщин у різних середовищах.*

**Ключові слова:** самовідновлювальний бетон, хімічні, природні, біологічні процеси, тріщини, бактерії.

### **Abstract**

*The most popular method for treating concrete structures to enhance durability is self-healing. The relationship between cracks and potential self-healing methods is complex and considers environmental aspects. This article provides an overview of concrete self-healing's biological, natural, and chemical mechanisms. The research studies self-healing mechanisms and their ability to seal cracks in various environments.*

**Keywords:** self-healing concrete, chemical, natural, biological processes, cracks, bacteria.

### **Вступ**

Бетон є крихким матеріалом, тому повністю запобігти утворенню тріщин не вдається. Таким чином, тріщини сприяють проникненню агресивних речовин, таких як карбонати, хлориди і сульфати, які здатні завдати шкоди структурі бетону. Існує два варіанти усунення дефектів: герметизація бетону або його відновлення. Через зростання вартості герметизації дослідники шукають альтернативний метод, зосереджуючись зараз на відновленні бетону. Результати численних досліджень вказують на те, що органічні та неорганічні матеріали можуть ефективно застосовуватися для герметизації тріщин.

Самовідновлювальний бетон широко досліджується науковими спільнотами та вченими. По суті, здатність бетону до самовідновлення, яка призводить до автоматичного усунення тріщин, називається самовідновлюваним бетоном [1]. Як і будь-який інший науковий підхід, він був запозичений і в той же час натхненний природними організмами, такими як тварини або дерева. Пошкодження шкіри та тріщини тварин і дерев здатні самостійно відновлюватися [2]. Більшість досліджень у цій галузі розпочалися наприкінці 1990-х років, і лише кілька робіт датуються 1980-ми роками.

У глобальному контексті впровадження самовідновлюваного бетону дозволяє досягти кількох важливих цілей. По-перше, він допомагає знизити витрати на ремонт та обслуговування, що є ключовим чинником у країнах із розвиненою інфраструктурою. По-друге, його застосування сприяє підвищенню екологічності будівництва, зменшуючи обсяги будівельного сміття та споживання ресурсів. По-третє, він підвищує надійність конструкцій у складних умовах, таких як висока вологість, різкі температурні коливання або вплив агресивних хімічних середовищ. Це особливо актуально для критично важливих об'єктів, таких як мости, греблі, тунелі та інші інфраструктурні споруди, де надійність і безпека є ключовими вимогами.

Існує три процеси, запропоновані для розробки та проектування бетону, що самовідновлюється. Це дослідження охоплює всі ці три процеси: природний, хімічний та біологічний. На рисунку 1 розглянуто повну класифікацію самовідновлювального бетону.

Природні процеси самовідновлення	Хімічні процеси самовідновлення	Біологічні процеси самовідновлення
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Природні категорії:               <ul style="list-style-type: none"> <li>а) утворення гідроксиду карбонату кальцію;</li> <li>б) домішки у воді, які блокують тріщини;</li> <li>в) гідратація непрореагованих цементних матеріалів;</li> <li>г) подальше розширення гідратованої цементної матриці у флангах тріщин.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Пасивний режим:               <ul style="list-style-type: none"> <li>а) капсули;</li> <li>б) неглибокі піпетки;</li> <li>в) судинні мережі без прив'язки до зовнішнього постачання клею.</li> </ul> </li> <li>• Активний режим: судинні мережі із зовнішнім зв'язком для постачання клею..</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Типи біосприйняття:               <ul style="list-style-type: none"> <li>а) карбонат кальцію;</li> <li>б) поліморфний залізо-алюмосилікат.</li> </ul> </li> <li>Їх переносять:               <ul style="list-style-type: none"> <li>а) гриби;</li> <li>б) бактерії.</li> </ul> </li> <li>Сімейства мікроорганізмів можуть бути використані для створення бетону, що самовідновлюється:               <ul style="list-style-type: none"> <li>а) мезофіли;</li> <li>б) теплолюби.</li> </ul> </li> <li>- Анаеробні мікроорганізми</li> <li>- Аеробні мікроорганізми</li> </ul>

Рис. 1. Напрямки розвитку бетону, що самовідновлюється [3].

### Результати дослідження

#### *Природний самовідновлювальний бетон*

У звичайному бетоні від 20 до 30 відсотків цементу залишається негідратованим. Частинки негідратованого цементу реагують з проникаючою водою, якщо бетон починає тріскатися. Ця реакція знову запускає процес гідратації, і продукти гідратації заповнюють тріщини. Цей успадкований процес самовідновлення відомий як аутогенне відновлення. За цей процес в першу чергу відповідає один або декілька з наступних чотирьох механізмів [4] (рис. 2). Як показано на рис. 2, у природних процесах чотири наступні процеси можуть блокувати тріщину (1) утворення карбонату кальцію або гідроксиду кальцію є іншим процесом блокування тріщини (рис. 2-А). (2) тріщина блокується домішками в присутності води, як показано на (рис. 2-Б). (3) Тріщина додатково блокується шляхом гідратації непрореагованого цементу або цементного матеріалу (рис. 2-В). (4) Тріщина блокується розширенням гідратованої цементної матриці на боках тріщини (набухання гідратного гелю силікату кальцію), як показано на (рис. 2-Г). У багатьох випадках більше одного з цих процесів або механізмів можуть відбуватися одночасно. Насправді більшість із цих механізмів можуть лише частково заповнити вхідні отвори деяких тріщин і не можуть повністю заповнити тріщини. Це буде корисно для запобігання розвитку. Природне самовідновлення може бути цінним і корисним одночасно для тріщин шириною 0,1-0,2 мм. [5]

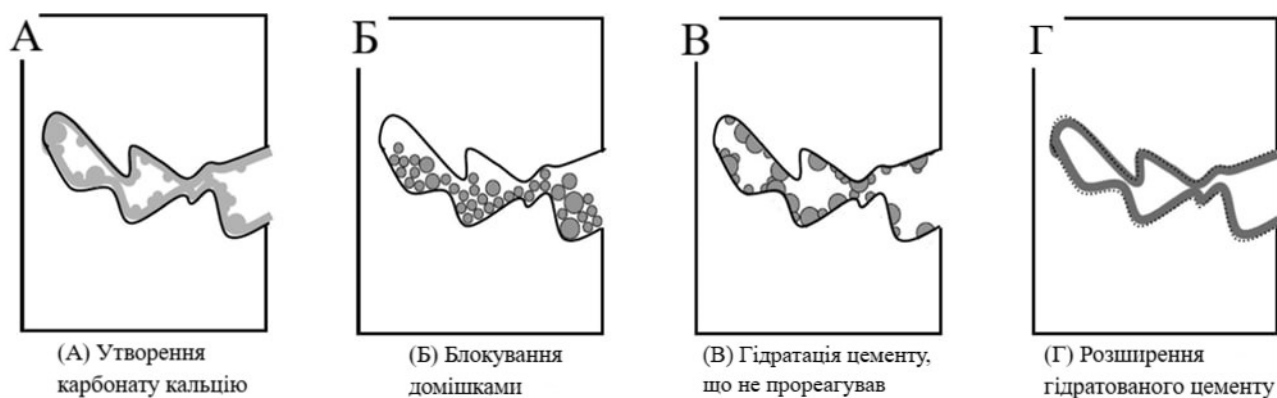


Рис. 2. Типи механізмів природного самовідновлення бетону [6].

#### *Хімічний самовідновлювальний бетон*

### ***Сітки капіляр і порожнисті волокна, що містять клей***

В хімічному самовідновлювальному бетоні існує два режими. Перший режим - це активний режим. У цьому режимі використовується мережа судин, яка з'єднана із зовнішніми джерелами клею для його розподілу. Другий режим - пасивний. У пасивному режимі використовуються капсули, порожнисті волокна або мережа судин для розподілу клею, але вони не з'єднані з зовнішнім джерелом клею.

Бетон, що самовідновлюється, імітує біологічні судинні системи, вбудовуючи мережу мікроканалів або порожнистих волокон у структуру бетону. Ці канали попередньо заповнені відновлювальними агентами, такими як полімерні гелі, епоксидні смоли або органічні рідини. Коли в бетоні утворюються тріщини, напруга змушує канали вивільняти відновлювальні агенти через капілярну дію або різницю тиску. Потім агенти потрапляють у тріщини та реагують, заповнюючи та герметизуючи їх. Клей, що міститься у порожнистих волокнах, має здатність зміщуватися зі свіжим бетоном, хоча він руйнується під час поширення тріщини. Таким чином, клей проникає в тріщину і відновлює її цілісність (рис. 3а), а суміш клею разом із флуоресцентним барвником використовувалася для контролю моменту розриву порожнистих волокон (рис. 3б). Цей метод особливо ефективний для більших тріщин і значних пошкоджень, забезпечуючи надійну здатність до самовідновлення, що може значно підвищити довговічність бетонних конструкцій у критичних інфраструктурних об'єктах, таких як мости, шосе (бетонні споруди) та морські споруди [7].

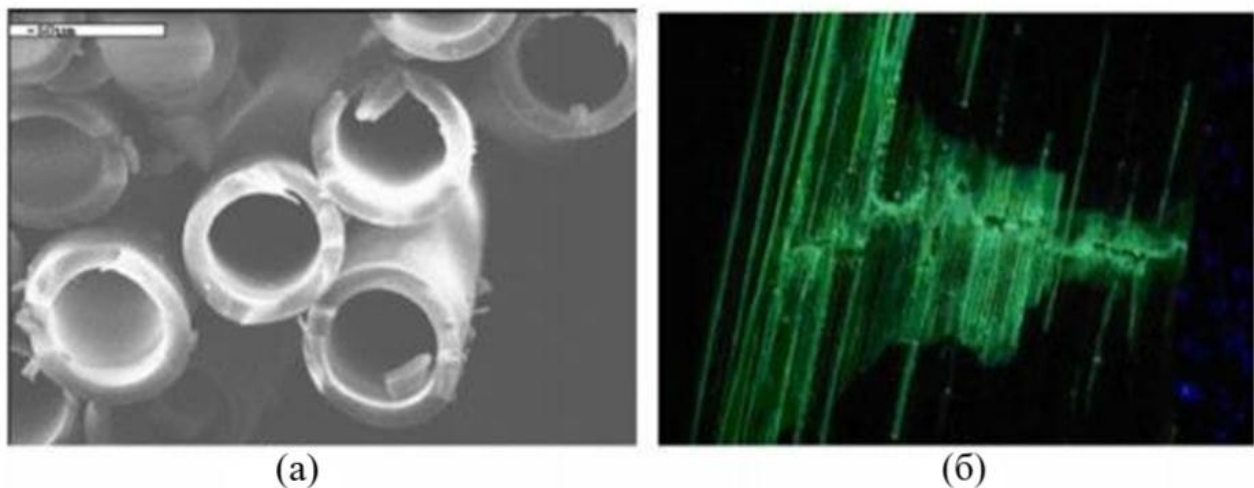


Рис. 3. (а) Порожністі скляні волокна, (б) візуальне підсилення ушкоджень у композитному ламінаті завдяки «кровоточивій» дії флуоресцентного барвника з порожнистих скляних волокон [7].

### ***Самовідновлювальний бетон на основі капсул:***

Самовідновлювальний бетон на основі капсул використовує мікрокапсули, що містять цілющі речовини, які змішуються з бетоном під час виробництва. Ці капсули розроблені таким чином, щоб руйнуватися при утворенні тріщини, викидаючи свій вміст на уражену ділянку. Реагенти для відновлення, які можуть включати епоксидні смоли, поліуретан або інші сполуки, реагують з такими елементами навколишнього середовища, як волога або вуглекислий газ, утворюючи міцний і довговічний зв'язок на поверхні тріщини. Цей метод є універсальним і може бути адаптований до різних умов навколишнього середовища та структурних вимог. Самовідновлювальний бетон на основі капсул особливо корисний у середовищах, де очікується часте розтріскування та високі навантаження, наприклад, промислові підлоги та місця з інтенсивним рухом людей [7].

### ***Біологічний бетон з використанням бактерій***

Бактеріальний бетон, що самовідновлюється, використовує природні біологічні процеси специфічних бактерій, таких як *Bacillus subtilis*, для підвищення довговічності бетону. Спори бактерій вводяться в бетонну суміш, де вони залишаються в стані спокою, поки не активуються під впливом води через тріщини. Коли волога проникає в бетон, бактерії активізуються і виробляють карбонат кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ) як побічний продукт метаболізму. Цей карбонат кальцію осідає та заповнює тріщини, ефективно їх закладаючи та відновлюючи структурну цілісність бетону. Цей метод пропонує стійке та екологічне рішення для ремонту бетону, використовуючи природні біологічні процеси для досягнення самовідновлення. Бактеріальний бетон, що самовідновлюється,

особливо корисний у середовищах, схильних до частого розтріскування та впливу вологи, таких як морські споруди та підземні споруди [7-9].

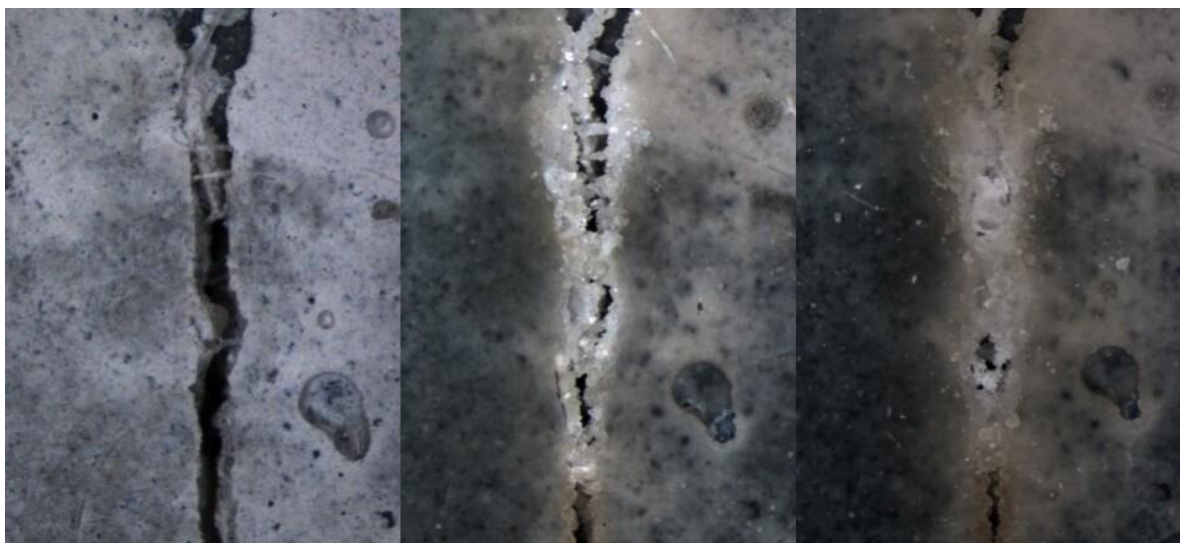


Рис. 4. Самовідновлювальний бетон з використанням бактерій *Bacillus subtilis*

Як і будь-який новий матеріал, самовідновлювальний бетон має не лише переваги, але й певні недоліки, представлені в таблиці 1. Серед них - висока вартість, обмежена ефективність при великих тріщинах та необхідність додаткових тестувань у різних кліматичних умовах.

Таблиця 1. Переваги та недоліки самовідновлювального бетону

Переваги	Недоліки
<b>Герметизація тріщин:</b> бетон, що самовідновлюється, призначений для автономної герметизації мікротріщин, які можуть утворитися через усадку, теплове розширення або інші фактори.	<b>Обмежена ефективність при великих тріщинах:</b> бетон самовідновлюється лише в межах невеликих тріщин; більші тріщини потребують традиційного ремонту.
<b>Гідроізоляція:</b> однією з найважливіших функцій бетону в будівництві є його здатність виступати в якості бар'єру від вологи.	<b>Тривалість відновлення:</b> процес самовідновлення може бути досить повільним і залежить від зовнішніх умов (температура, вологість та ін.)
<b>Підвищена довговічність:</b> здатність бетону, що самовідновлюється, ремонтувати тріщини та підтримувати водонепроникність значною мірою сприяє його загальній довговічності.	<b>Висока вартість.</b> Виробництво є дорогим через використання спеціальних матеріалів, таких як мікрокапсули з клеєм або бактеріальні агенти.
<b>Зменшення витрат на технічне обслуговування:</b> однією з найбільш значущих переваг бетону, що самовідновлюється, є його здатність зменшувати витрати на технічне обслуговування протягом життєвого циклу конструкції.	<b>Необхідність тестування в різних кліматичних умовах:</b> самовідновлювальний бетон ще недостатньо вивчений для використання в екстремальних кліматичних умовах, і його властивості можуть змінюватися залежно від середовища
<b>Екологічна стійкість:</b> бетон, що самовідновлюється, підтримує екологічну стійкість, сприяючи ефективному використанню матеріалів і зменшенню відходів.	<b>Висока вартість.</b> Виробництво є дорогим через використання спеціальних матеріалів, таких як мікрокапсули з клеєм або бактеріальні агенти.
<b>Збереження структурної цілісності:</b> постійна здатність бетону до самовідновлення забезпечує збереження структурної цілісності конструкцій протягом усього терміну служби.	<b>Складність виробництва:</b> технології для виготовлення самовідновлювального бетону є новими та вимагають спеціального обладнання і контролю якості, що ускладнює його масове виробництво.

Самовідновлюваний бетон є перспективним матеріалом, який має низку важливих переваг, таких як герметизація тріщин, гідроізоляція, підвищена довговічність, зменшення витрат на технічне обслуговування, екологічна стійкість та збереження структурної цілісності конструкцій.

Однак використання самовідновлюваного бетону, також супроводжується певними недоліками. Серед них обмежена ефективність при великих тріщинах, тривалість процесу відновлення, висока вартість виробництва, складність виготовлення та необхідність додаткових тестувань в умовах різних кліматичних зон.

Постійні дослідження та розробки зосереджені на вирішенні цих проблем та оптимізації технологій самовідновлення для більш широкого впровадження в будівельні проекти по всьому світу. Майбутні напрямки для самовідновлювального бетону включають підвищення ефективності та надійності механізмів відновлення, оптимізацію складу матеріалів для конкретних застосувань та інтеграцію цифрових технологій для моніторингу та оцінки ефективності бетону в реальному часі.

#### Висновок

У результаті дослідження підтверджується, що самовідновлювальний бетон має великий потенціал для покращення довговічності будівельних конструкцій та зменшення витрат на їх обслуговування. Природний метод самовідновлення забезпечує обмежену герметизацію тріщин, але є економічно вигідним і простим у впровадженні. Хімічний підхід дозволяє досягти вищого рівня відновлення, особливо для більших тріщин, але потребує використання дорогих матеріалів та складного виробництва. Біологічний метод з використанням бактерій забезпечує природний та стійкий процес відновлення, однак ефективність залежить від рівня вологості та умов середовища. Загалом, кожен з методів має свої переваги та недоліки, і їх оптимальне застосування може варіюватися залежно від умов та вимог конкретного будівельного проекту. Подальші дослідження рекомендується спрямувати на вдосконалення кожного з підходів, а також на створення комбінованих рішень для оцінки ефективності бетону в експлуатації.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ghosh SK, editor. Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications. John Wiley & Sons; 2009 Aug 4.
2. Van Breugel K. Is there a market for self-healing cement-based materials. Proceedings of the first international conference on self-healing materials 2007 Apr 18 (pp. 1-9).
3. Talaiekhazan A, Keyvanfar A, Shafaghat A, Andalib R, Majid MA, Fulazzaky MA, Zin RM, Lee CT, Hussin MW, Hamzah N, Marwar NF. A review of self-healing concrete research development. Journal of Environmental Treatment Techniques. 2014; 2(1):1-1.
4. N. ter Heide, E. Schlangen, Self-healing of early age cracks in concrete, in: Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, 2007, pp. 18–20. (- Wu M, Johannesson B, Geiker M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. Construction and Building Materials. 2012 Mar 1; 28(1):571-83.)
5. Li VC, Yang EH. Self-healing in concrete materials. In Self healing materials 2007 (pp. 161-193). Springer, Dordrecht.
6. Wu M, Johannesson B, Geiker M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. Construction and Building Materials. 2012 Mar 1; 28(1):571-83
7. Innovative Construction Material: Self-Healing Concrete For Advancing Durability and Sustainability in Construction. Режим доступа: <https://therealtytoday.com/news/innovative-construction-material-self-healing-concrete-for-advancing-durability-and-sustainability-in-construction>
8. Kalafat, K., L. Vakhitova, and V. Drizhd. "Technical research and development." International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 616 p. (2021)
9. Bereziuk V. et al. High-precision ultrasonic method for determining the distance between garbage truck and waste bin //Mechatronic Systems 1. – Routledge, 202

*Балинська Анастасія Володимирівна* - студентка групи БМ-23б, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [nastiabalynska@gmail.com](mailto:nastiabalynska@gmail.com).

**Ковальський Віктор Павлович** - к.т.н., доцент кафедри доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, e-mail: [kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com](mailto:kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com).  
ORCID 0000-0002-3103-6319.

**Balynska Anastasia V** - student of the BM-23b group, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [nastiabalynska@gmail.com](mailto:nastiabalynska@gmail.com).

**Kovalskiy Viktor P** - Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction, Urban Management and Architecture, Vinnitsa National Technical University. Email: [kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com](mailto:kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com).  
ORCID 0000-0002-3103-6319.