

2. Urban Street Design Guide. National Association of City Transportation Officials (NACTO). 193 p. URL: [https://www.metamorphosis-project.eu/sites/default/files/downloads/Urban\\_Street\\_Design\\_Guide\\_NACTO.pdf](https://www.metamorphosis-project.eu/sites/default/files/downloads/Urban_Street_Design_Guide_NACTO.pdf)
3. Transportation research. No. E-C215, November 2016. Roadside Safety Design and Devices International Workshop. March 26, 2015. Melbourne, Australia. E-C215\_Cover1 [Converted] (trb.org)
4. Jeff Speck. Walkable City Rules : 101 Steps to Making Better Places. Island Press Washington, DC, 2019. ISBN 978-1-61091-899-2. DOI: <https://doi.org/10.5822/978-1-61091-899-2>; URL: <https://link.springer.com/book/10.5822/978-1-61091-899-2>
5. Guozhu Cheng, Rui Cheng, Yulong Pei, Juan Han. Research on Highway Roadside Safety. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. Vol. 2021, Article ID 6622360. 19 p. URL: <https://downloads.hindawi.com/journals/jat/2021/6622360.pdf>
6. Wire rope barriers shown to reduce serious crash incidence by up to 87% (2016). URL: <https://www.ipwea.org/blogs/intouch/2016/03/16/wire-rope-barriers-shown-to-reduce-crash-incidence-by-up-to-87>

УДК 625.7/.8

## ІННОВАЦІЇ В ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ: САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНІ БЕТОНИ

Чепурна К. О.<sup>1</sup>, студентка; Балашова Ю. Б.<sup>2</sup>, к. т. н., доц.  
*Придніпровська державна академія будівництва та архітектури*  
[kara.naw.law.2004@gmail.com](mailto:kara.naw.law.2004@gmail.com); [balashova.yuliia@pdaba.edu.ua](mailto:balashova.yuliia@pdaba.edu.ua)

**Постановка проблеми.** Використання самовідновлювальних бетонів у дорожньому будівництві є інноваційною технологією, що покращує якість дорожнього покриття та зменшує витрати на технічне обслуговування у майбутньому. Цей матеріал може відновлювати свою структуру після пошкодження, мінімізує витрати на ремонт, зміцнює дорожнє покриття та прискорює процес обслуговування.

**Мета дослідження.** Обґрунтування можливостей, обмежень та переваг самовідновлювального бетону на основі досліджень, спрямованих на поліпшення якості та ефективності матеріалів для дорожнього будівництва.

**Результати дослідження.** Самовідновлювальний бетон (Self-Healing Concrete – SHC) зменшує потребу у ремонті тріщин, обмежуючи витрати матеріалів. Він здатний самостійно відновлювати тріщини, що зменшує необхідність у ремонті та підвищує довговічність конструкцій, обмежуючи корозію арматури та деградацію бетону. Самовідновлювальний бетон використовує спеціальні матеріали, такі як капсули або волокна з ремонтними розчинами, для самовідновлення. Механізми самовідновлення включають аутогенне відновлення, автономні бактерії та автономні капсули. Аутогенне самовідновлення (Autogenic self-healing – ASH) – це здатність бетону автоматично відновлювати тріщини у вологому середовищі без наявності напруги розтягування [1]. Це важливо для подовження терміну служби та підвищення міцності бетонних конструкцій. Фізичні, хімічні та механічні фактори сприяють аутогенному самовідновленню. Фізичні фактори включають розширення цементної матриці навколо тріщини під дією поглинання води. Хімічні – включають реакцію цементу з водою та осадження карбонату кальцію. Механічний ефект полягає в заповненні тріщин дрібними частинками. Використання пуцоланових мінералів покращує аутогенну здатність бетону до самовідновлення, використовуючи їх як додаткові цементні

матеріали. Самовідновлення на основі вегетативних бактерій є альтернативним підходом, що використовує бактерії у формі сферичних товстостінних клітин, що утворюють ендоспори [2]. Цей процес відновлення полягає в утворенні карбонату кальцію, який заповнює тріщини залізобетону та запобігає проникненню води та корозії сталевій арматури. Цей механізм активується внаслідок змішування з водою, що спонукає бактерії до перетворення мінеральних хімічних речовин-попередників на карбонат кальцію. У разі розриву та проникнення води, сферичні клітини вздовж тріщини розширюються, блокуючи її. Вивільнення вмісту клітин сприяє осадженню мінералів на основі магнію та активує бактеріальні спори, що сприяють загоєнню тріщин. Механізм інкапсуляції є ефективним методом герметизації тріщин у бетоні. Розривання капсул при появі тріщин дозволяє вивільнювати лікувальний агент, який заклеює тріщину і запобігає подальшому поширенню. Використання різних матеріалів для інкапсуляції, таких як сечовиноформальдегід, скло, кремнезем, нітрат кальцію, епоксидна смола, поліуретан і суперабсорбуючі полімери, може покращити механічні властивості бетону і забезпечити повну герметизацію тріщин. Процес вивільнення реагента, який вступає в контакт з каталізатором, призводить до полімеризації. Важливо уникати надмірного використання порожнистих волокон або капсул, оскільки це може погіршити міцність цементної матриці. Процес самозагоєння бетону залежить від лікувального засобу, матеріалу захисної оболонки, дозування капсул, розміру і глибини тріщини, причин їх утворення, температури, вологості, складу бетонної суміші і часу загоєння. Додавання поживних речовин сприяє утворенню карбонату кальцію через реакції цементу та розчинення гідроксиду кальцію. Наявність вільної води є важливою характеристикою для самозагоєння тріщин у бетоні, оскільки вона полегшує хімічні реакції цементу та розчинення гідроксиду кальцію. Також варто відзначити, що ширина і кількість тріщин впливають на здатність бетону до самовідновлення, проте ефективність самозагоєння обмежена для великих і широких тріщин. Крім того, важливими факторами є вік і розмір тріщин, а також вміст різних агентів у цементних композиціях, таких як мінерали, бактерії та мікрокапсули з адгезивними елементами. Використання великої кількості цементу та низького водоцементного відношення сприяє здатності до аутогенного самовідновлення біобетону. Використання волокон для обмеження розширення тріщин та суперпластифікаторів для зниження водоцементного відношення може покращити ефективність аутогенного самовідновлення бетону. Дослідники з Мічиганського університету вказують, що після самовідновлення бетон практично має таку ж міцність та жорсткість, як новий. Дослідження показують, що самовідновлення бетону відбувається у декілька етапів, таких як осадження карбонату або гідроксиду кальцію, блокування тріщин домішками у воді, продовження гідратації цементу та розширення гідратованих продуктів навколо країв тріщини [3]. Деякі дослідники [4] виконували цикли заморожування-відтавання у воді та виявили повне відновлення бетону після пошкоджень. При вивченні можливостей самовідновлення волокнисто-армованих бетонів було виявлено, що використання кріогенного охолодження сприяє самовідновленню конструкцій, таких як бетонні балки. Для оцінки герметичності використовують тестування на водонепроникність під різними тисками, капілярне поглиблення води, рентгенівську або нейтронну радіографію для візуалізації проникнення води, а також механічні тести для вимірювання відновлення механічних властивостей. Дослідження [4] описує два методи оцінки ефективності герметизації тріщин. Перший метод полягає в тестуванні поглинання води цементною матрицею у межах загоєної тріщини, порівнянні зі зразком без тріщини для визначення ефективності загоєння. Другий метод оцінює здатність герметизуючих матеріалів, що закривають тріщину, утримувати потік води під тиском через внутрішній отвір у зразку,

що дозволяє визначити ефективність герметизації шляхом порівняння потоку води через загоєні та незагоєні тріщини. Дослідження [5] показали, що механічний розрив залежить від ймовірності того, що тріщина пройде через мікрокапсулу, та чутливості мікрокапсули до напруг, що виникають внаслідок тріщин. Капсули трубчастої форми, мають більшу ймовірність перетинання площини тріщини. Важливо також враховувати механічні параметри мікрокапсули, такі як міцність і жорсткість, оскільки вони впливають на поширення руйнування поруч з капсулою. Шорстка поверхня мікрокапсул може поліпшити механічне зчеплення з цементною матрицею, але досягнення ідеального зв'язку є складним. Механічна міцність мікрокапсул є ключовою для ефективного вивільнення лікувальних речовин під час появи тріщин, особливо під час механічного змішування води для приготування бетону, де мікрокапсули піддаються значному навантаженню, що може призвести до їх розриву. Товсті оболонки мікрокапсул мають більшу міцність, але тонкі оболонки забезпечують більшу ємність для зберігання. Стійкість мікрокапсул до електричного струму також є важливою характеристикою, оскільки електричний струм може спричинити заживлення тріщин і поліпшення структури мікрокапсул. Дослідження [6] показує, що збільшення тривалості служби бетону з тріщинами можливе шляхом зменшення проникності пошкодженої зони за рахунок закладення тріщин або ущільнення цементної матриці. Використання епоксидних капсул у бетонному розчині під час ремонту призводить до зменшення капілярної пористості, діаметра пор, сполученості пор і проникнення хлоридів. Більші мікрокапсули ефективніше зменшують проникність, ніж менші, при однаковій кількості цілющої речовини. Силікат натрію виявився більш ефективним у герметизації тріщин порівняно з полімерами. Повна герметизація спостерігається в тріщинах шириною 110–170 мкм. Хімічні речовини, які змінюють в'язкість, покращують розподіл більших об'ємних часток мікрокапсул, що збільшує продуктивність процесу. Використання більшого вмісту силікату натрію у мікрокапсулах може підвищити рівень самовідновлення при менших концентраціях мікрокапсул.

**Висновки.** Розробка цементних матеріалів зі здатністю до самовідновлення є ключовою для підвищення довговічності об'єктів дорожньої інфраструктури. Використання бактерій та мікрокапсул з цілющими речовинами дозволяє створювати матеріали, які застосовуються у мостах, морських спорудах, тунелях та інших об'єктах для зменшення витрат на обслуговування та запобігання проникненню води. Поєднання самовідновлювальних матеріалів із високоміцним бетоном сприяє створенню тривалих і надійних конструкцій, які можуть працювати у екстремальних умовах експлуатації.

#### Список використаних джерел

1. Qureshi T., Kanellopoulos A., Al-Tabbaa A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing. *Constr. Build. Mater.* (2018); 192:768–784. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.10.143](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.143). URL: [https://www.researchgate.net/publication/328290640\\_Autogenous\\_self-healing\\_of\\_cement\\_with\\_expansive\\_minerals-I\\_Impact\\_in\\_early\\_age\\_crack\\_healing](https://www.researchgate.net/publication/328290640_Autogenous_self-healing_of_cement_with_expansive_minerals-I_Impact_in_early_age_crack_healing)
2. Wang J., Mignon A., Snoeck D., Wiktor V., Van Vliergerghe S., Boon N., De Belie N. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: A promising strategy for crack self-healing. *Front. Microbiol.* 2015. 6:1088. doi: [10.3389/fmicb.2015.01088](https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01088). URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4602304/>

3. Griño A. A., Daly M. K. M., Ongpeng J. M. C. Bio-influenced self-healing mechanism in concrete and its testing : A review. *Appl. Sci.* 2020. 10:5161. doi: [10.3390/app10155161](https://doi.org/10.3390/app10155161). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/15/5161>
4. Jacobsen S., Sellevold E.J., Matala S. Frost durability of high strength concrete: Effect of internal cracking on ice formation. *Cem. Concr. Res.* 1996. 26:919–931. doi: [10.1016/0008-8846\(96\)00066-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00066-X). URL: <https://www.researchgate.net/publication/223484088> Frost durability of high strength concrete Effect of internal cracking on ice formation
5. Lv L., Yang Z., Chen G., Zhu G., Han N., Schlangen E., Xing F. Synthesis and characterization of a new polymeric microcapsule and feasibility investigation in self-healing cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* 2016. 105:487–495. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2015.12.185](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.185). URL: <https://www.researchgate.net/publication/288933274> Synthesis and characterization of a new polymeric microcapsule and feasibility investigation in self-healing cementitious materials
6. Li W., Jiang Z., Yang Z., Zhao N., Yuan W. Self-healing efficiency of cementitious materials containing microcapsules filled with healing adhesive : Mechanical restoration and healing process monitored by water absorption. *PLoS ONE*. 2013. 8:e81616. doi: [10.1371/journal.pone.0081616](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081616). URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0081616>