

Гайдамака Д.В. студент 2-го курсу, групи ГС-41, НН ІЕЕ,
Косенко Т.В., старший викладач,
Науковий керівник: Вапнічна В.В., к.т.н., доц.
*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ БЕТОНУ: ВІД ПАСИВНИХ БАР'ЄРІВ ДО АКТИВНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СИСТЕМ

Вступ. Бетон по праву вважається основою сучасної цивілізації. Від фундаментів хмарочосів і прольотів мостів до тунелів і гідроелектростанцій – цей матеріал формує середовище нашого існування. Ми цінуємо його за міцність, негорючість та економічність. Однак, за макроскопічною міцністю бетону ховається парадокс: на мікрорівні його структура є пористою та проникною.

Цементний камінь, що зв'язує інертні заповнювачі, пронизаний мережею капілярів та пор, що залишилися після гідратації цементу. Ця пористість є «ахіллесовою п'ятою» бетону, відкриваючи доступ для головного ворога – води, яка несе з собою агресивні хімічні речовини. Проникнення вологи запускає каскад руйнівних процесів, які щороку призводять до мільярдних збитків на ремонт та відновлення бетонних конструкцій у всьому світі.

Мета дослідження: проаналізувати еволюцію інженерної думки в галузі захисту бетону, провести порівняльний аналіз традиційних пасивних та сучасних активних методів, і детально розглянути найбільш перспективну на сьогодні технологію – інтегральну кристалічну гідроізоляцію.

Наукова новизна представленої роботи полягає у системному обґрунтуванні переходу від парадигми пасивного бар'єрного захисту бетону до концепції активного інтегрального управління його властивостями. На відміну від традиційних методів, що фокусуються на створенні зовнішнього, вразливого до пошкоджень шару (мембрани, покриття), запропонований підхід передбачає хімічну модифікацію самої матриці бетону. Новизна полягає у впровадженні біоміметичного принципу – «самозаліковування» (Self-Healing). Це означає, що матеріал набуває здатності автономно реагувати на виникнення нових пошкоджень (мікротріщин) шляхом активації «сплячих» хімічних компонентів та повторної кристалізації. Таким чином, бетон перетворюється зі статичного, вразливого матеріалу на динамічну, адаптивну систему, здатну підтримувати свою водонепроникність протягом усього життєвого циклу.

Викладення матеріалу. Розуміння ефективності захисту неможливе без чіткого аналізу загроз. Уся деградація бетону так чи інакше пов'язана з його пористістю. Насамперед, це фізична деградація через цикли заморожування-розмерзання, коли вода в порах замерзає, розширюється в об'ємі та буквально розриває структуру бетону зсередини. Це призводить до поверхневого лущення та розтріскування. Не менш небезпечною є хімічна деградація, зокрема сульфатна та кислотна агресія, коли хімічні сполуки з ґрунтових вод чи промислових стоків вступають в реакцію з компонентами цементного каменю, утворюючи нові сполуки, що також розширюються та викликають внутрішні напруження.

Однак, найбільш катастрофічним процесом для залізобетону є електрохімічна деградація – корозія арматури. У здоровому бетоні (з високим рН) сталеві арматури захищені пасивною оксидною плівкою. Проте іони хлоридів, проникаючи крізь пори, руйнують цей захисний шар. У присутності вологи та кисню запускається процес іржавіння (рис. 1). Продукти корозії мають об'єм, що у 2-6 разів перевищує об'єм металу, і цей «розпираючий» тиск призводить до глибоких тріщин та відшарування захисного шару бетону, що врешті-решт веде до втрати несучої здатності.

Ці комплексні загрози стимулювали еволюцію методів захисту. Історично першою інженерною думкою було створення фізичного бар'єру на шляху води. До цього типу належать рулонні бітумні мембрани, полімерні плівки, обмазувальні мастики та полімерні покриття. Логіка їх проста: створення водонепроникного «чохла» або «кокона» навколо конструкції. Проте, ці пасивні системи мають фундаментальні недоліки: вони вразливі до механічних пошкоджень під час монтажу та засипання котловану, їхня якість критично залежить від виконання швів та примикань, знайти та усунути місце протікання під землею практично неможливо, і вони абсолютно безсилі, якщо волога проникає крізь конструкцію зсередини (негативний тиск води).

Саме ці обмеження стимулювали пошук технологій, які б не «покривали» бетон, а ставали його невід'ємною частиною. Так з'явилися інтегральні системи, що працюють всередині самої бетонної матриці.

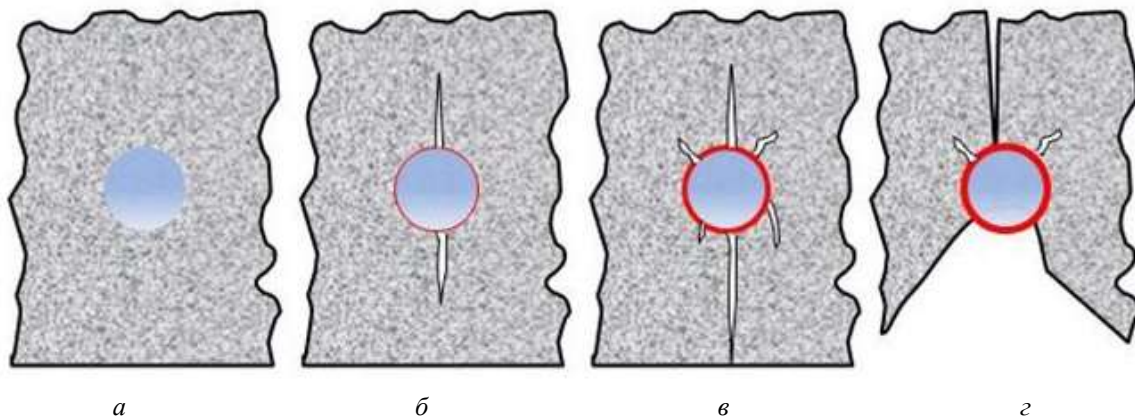


Рис. 1. Вплив корозії на бетон: а) до корозії; б) ознаки корозії; в) поява тріщин; г) подальша корозія

Найяскравішим представником таких систем є технологія проникаючої кристалічної гідроізоляції. Це вже не просто фізичний бар'єр, а хімічна модифікація бетону на мікрорівні. Принцип дії заснований на введенні в бетон (у вигляді домішки або покриття) спеціалізованих хімічно активних компонентів. При контакті з вологою та побічними продуктами гідратації цементу (такими як гідроксид кальцію, що завжди присутній у бетоні), ці компоненти вступають в каталітичну реакцію. Результатом є формування мільйонів нерозчинних, голкоподібних кристалів (гідросилікатів кальцію). Ці кристали ростуть і заповнюють пори, капіляри та мікротріщини, фізично блокуючи шляхи для міграції води та розчинених у ній хімікатів. Таким чином, бетонна матриця стає водонепроникною по всій своїй товщі, зберігаючи при цьому паропроникність, тобто здатність «дихати».

Ключовою перевагою цієї технології є активний захист, а саме – унікальна властивість «самозаліковування» (Self-Healing). Хімічні компоненти залишаються в «сплячому» стані в структурі бетону. Якщо в процесі експлуатації (наприклад, через усадку) в бетоні утворюється нова мікротріщина шириною до 0.4-0.5 мм, і в неї потрапляє вода, ця вода поновлює каталітичну реакцію. Починається ріст нових кристалів, які герметизують дефект. Бетон, по суті, «самозаліковується», автоматично ремонтуючи себе без зовнішнього втручання.

На практиці технологія застосовується у двох основних формах. Перша – це домішки в бетонну суміш (Admixtures), що є найбільш прогресивним методом для нового будівництва. Активні компоненти у вигляді сухого порошку додаються на бетонному заводі, забезпечуючи інтегральну гідроізоляцію всієї конструкції з моменту її створення та значно прискорюючи будівництво. Друга форма – це покриття (Coatings), що застосовуються для ремонту та модернізації існуючих конструкцій шляхом нанесення суспензії на ретельно зволожену поверхню.

Переваги такого підходу очевидні: це інтегральність (захист є частиною бетону), довговічність (працює весь термін служби), здатність до самозаліковування та універсальність (працює при позитивному та негативному тиску води). Це також значно підвищує хімічну стійкість бетону. Сфери застосування охоплюють усі критично важливі об'єкти: підземне будівництво (фундаменти, паркінги), гідротехнічні споруди (дамби, греблі), резервуари (включно з питною водою) та будь-які об'єкти транспортної інфраструктури, такі як тунелі та мостові конструкції.

Висновки. Аналіз показує, що у філософії захисту бетону відбулося тектонічне зрушення. Ми переходимо від парадигми «пасивного приховування» дефектів за допомогою мембран до парадигми «активного управління» властивостями матеріалу.

Сучасні інтегральні кристалічні технології – це вже не просто «витрати на гідроізоляцію». Це активні інвестиції в життєвий цикл об'єкта. Вони дозволяють на етапі проектування запрограмувати довговічність конструкції, кардинально знизити ризики, прискорити будівництво та виключити майбутні колосальні витрати на періодичний ремонт і відновлення. Зрештою, це перехід від боротьби з наслідками до усунення першопричини деградації бетону.

Список використаної літератури:

1. Shetiya R.K., Elhadad S., Salem A., Fulop A., & Orban Z. (2024). Investigation into the Effects of Crystalline Admixtures and Coatings on the Properties of Self-Healing Concrete. *MDPI, Materials*, 17, 767. <https://doi.org/10.3390/ma17030767>
2. Ammar M.A., Chegenizadeh A., Budihardjo M.A., & Nikraz H. (2024). The Effects of Crystalline Admixtures on Concrete Permeability and Compressive Strength: A Review. *MDPI, Buildings*, 14, 3000. <https://doi.org/10.3390/buildings14093000>
3. Зміцнення та захист бетону: як продовжити термін служби конструкцій за допомогою обробки. URL: <https://aquaron.com.ua/zmicnennya-ta-zahust-betonu/> (дата звернення 15.11.2025)