

АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕМОНТУ ТРІЩИН В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Масштаби пошкоджень інфраструктурних об'єктів України досягли критичного рівня, що вимагає негайного відновлення транспортних, енергетичних та житлових фондів. Проте реалізація цих завдань ускладнюється гострим дефіцитом кваліфікованих кадрів у будівельній галузі, що робить традиційні ресурсомісткі методи демонтажу та реконструкції економічно та логістично неможливими. У таких умовах стратегічним пріоритетом стає перехід до технологій автоматизованого прецизійного ремонту, які мінімізують залучення ручної праці та скорочують терміни робіт. Оскільки тріщини в бетоні є детермінуючим фактором корозії арматури та деградації споруд, впровадження високотехнологічних ін'єкційних систем, здатних замінити масивні загальнобудівельні процеси, є критичною умовою збереження несучої здатності об'єктів. Аналіз згідно з ДСТУ EN 1504-5:2022 підтверджує, що ін'єкційний метод є на 40–60% економічно вигіднішим за повну заміну бетонних елементів. Для ремонту тріщин в бетоні застосовуються три основні класи ін'єкційних матеріалів.

Акрилатні гелі. Двокомпонентні суміші з в'язкістю 1–5 мПа·с. Відзначаються високою еластичністю (200–500%) та реверсивністю (повторне розширення при контакті з вологою). Ін'єктування акрилатних гелів базується на використанні двокомпонентних пневматичних насосів. Компоненти А та Б змішуються у статичному міксері безпосередньо перед нагнітанням у пакер. Наднизька в'язкість дозволяє складу просочувати мікропори бетону, а регульована полімеризація (від 10 сек) дозволяє миттєво зупиняти активні течі. Переваги: проникнення у мікротріщини та реверсивність. Недоліки: потребують складного 2-комп. обладнання.

Силікатні (мінеральні) гелі. Формують міцний зв'язок із бетоном через утворення кристалів гідросилікату кальцію (C-S-H). Забезпечують довговічність статичних вузлів. Силікатні системи нагнітаються під тиском через шпури, заповнюючи порожнечі статичних конструкцій. У ході хімічної реакції з гідроксидом кальцію бетону формується міцна кристалічна решітка, що відновлює монолітність та підвищує водонепроникність без зміни геометрії об'єкта. Переваги: хімічна єдність з бетоном. Недоліки: крихкість, не витримують динамічні впливи.

Гнучкі поліуретанові смоли. Гідроактивні полімери, що розширюються на 1500–4000% при контакті з водою. Забезпечують еластичну герметизацію рухомих тріщин. Поліуретанові смоли потребують буріння шпурів під кутом 45° до площини тріщини у шаховому порядку з кроком 25–38 см. Нагнітання насосом високого тиску проводиться від нижнього до верхнього пакера. У разі сухих тріщин проводиться попереднє промивання водою для активації гідроактивного складу, який при розширенні створює щільну еластичну пробку. Переваги: миттєва зупинка течі, гнучкість. Недоліки: чутливість до ультрафіолетового випромінювання.

Для підвищення точності та мінімізації технологічних помилок пропонується впровадження автоматизованих ін'єкційних комплексів. Роботизовані платформи, оснащені сенсорами тиску та витратомірами, забезпечують: дистанційне керування, точне дозування, контроль наповнення та автоматичне буріння. Інтеграція робототехніки з BIM-моделями дозволяє автоматично фіксувати координати кожного пакера та обсяг введенного матеріалу, формуючи «цифровий паспорт» відремонтованої ділянки. Це забезпечує прозорість технічного нагляду та дозволяє прогнозувати поведінку конструкції в майбутньому. В тому числі, дефіцит кваліфікованих робітників частково компенсується автоматизацією, і вплине на оптимізацію вартості виконання робіт.

Список літератури

1. **Usman M., Noman M.** Experimental investigations of the effects of various low-cost repair techniques to restore the mechanical properties of fire-damaged concrete. *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 8. DOI: 10.3389/fmats.2021.801464.
2. **Bano S., Jaiswal G.** Experimental Study on the Crack Repair Techniques of Concrete Structures: A Case Study. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2023. 1273 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/1273/1/012006.
3. **Yadollahi, M.** Crack Repair by Epoxy – Injection Method vs. Gravity Feed Method. *MATEC Web Conf.* 2025. Vol. 409 09004. DOI: 10.1051/mateconf/202540909004.