

ОГЛЯД НЕРУЙНІВНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ БЕТОННИХ СПОРУД

В роботі представлено огляд неруйнівних методів аналізу структурної цілісності та довговічності бетонних конструкцій, їх переваги та недоліки. Розглянуто можливість застосування даних методів для оцінки стану конструкцій при впливі агресивних середовищ. Встановлено необхідність відбору зразків кернів для прогнозування довговічності бетонних конструкцій. Представлені методи: фенолфталеїнова реакція на глибину проникнення карбонізації бетонів, визначення міцності методом пружного відскоку з використанням молотка Шмідта, ультразвуковий аналіз цілісності структури, визначення міцності методом відриву зі сколом, електричні методи аналізу корозії залізобетонних конструкцій. Відбір зразків, кернів та кубів, ефективно слугує для зовнішньої оцінки, наявних деформацій, якості формування бетонної композиції та перевірки міцності конструкції. Метод фенолфталеїнової реакції на глибину проникнення карбонізації ефективно застосовувати безпосередньо на свіжих кернах та по місцю відбору зразків. Метод пружного відскоку є найпоширенішим через його простоту та високу транспортабельність основного обладнання молотка Шмідта. Проте одними з вимог по експлуатації пристрою (молотка) та до поверхні дослідження конструкції потребують наявності розрахованих перевідних коефіцієнтів для визначення міцності. Метод відриву зі сколом є ефективним та найменш деструктивним. Він враховує вплив агресивного середовища на міцність конструкції, проте, він є недостатнім для оцінки внутрішніх змін у структурі так само як і молоток Шмідта. Метод ультразвукового аналізу та електричного моніторингу процесів корозії враховують зміни в структурі бетонів, та виявляють відхилення у цілісності структури в середині конструкції у разі відсутності явних зовнішніх пошкоджень та дозволяють вирахувати ступінь пошкодження.

Ключові слова: бетон, в'язуче, неруйнівні методи аналізу, довговічність, вилигування, моніторинг.

MONZHERAN DMYTRO

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

RVIEW OF NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS METHODS AND THEIR APPLICATION FOR MONITORING THE DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES

An overview of non-destructive methods (NDM) of analyzing the structural integrity and durability of concrete structures, their advantages and disadvantages and use to assess the condition of structures under the influences of aggressive environments. The need to select core samples for predicting the durability of concrete structures has been established. Presented methods: phenolphthalein reaction to the depth of penetration of carbonization of concrete, determination of strength by the method of elastic rebound using a Schmidt hammer, ultrasonic analysis of the integrity of the structure, determination of strength by the method of detachment with chipping, electrical methods of corrosion analysis of reinforced concrete structures. The selection of samples, effectively serves for external assessment of existing deformations, the quality of concrete composition formation and the strength measurements. The method of phenolphthalein reaction can be effectively applied directly on fresh samples and at the place of sampling. The elastic rebound method is the most common due to its simplicity and high transportability of the main equipment - the Schmidt hammer. The requirements for the exploitability of the device (hammer) and the surface of the structure requires the presence of calculated transfer coefficients to determine strength. The method of detachment with chipping is effective and the least destructive NDM. It takes into account the influence of an aggressive environment on the structure, yet, it is insufficient to assess internal changes in the structure. The method of ultrasonic analysis and electrical monitoring of corrosion reveals deviations in the integrity of the structure in the absence of obvious external damage and allows to calculate the degree of damage.

Keywords: concrete, binder, non-destructive analysis methods, durability, leaching, monitoring.

Вступ

Питання забезпечення довговічності бетонних конструкцій є однією з актуальних проблем сучасності. Близько 75% будівельних конструкцій, які експлуатуються у різних країнах постійно піддаються руйнівному впливу агресивних середовищ [1]. У будівництві підземних споруд, ця збільшується до 80-90%. Ремонт та відновлення пошкоджених конструкцій у промислових регіонах поглинає до 40% капіталовкладень, що в свою чергу, при порівнянні до будівництва нової споруди менше 60%. Найбільші витрати на ремонт та відновлення пов'язані з будівництвом мостів.

У 1990-х роках, в Сполучених Штатах, на ремонт та відновлення мостів витрачалося понад 20 млрд. доларів, де впродовж років ці витрати зростали на 0,5 млрд. У Великобританії ці ремонтні витрати становлять понад 1 млрд фунтів [1].

На підприємствах промислового сектору, в особливості хімічної промисловості, можливі пошкодження конструкцій, пов'язані з агресивною дією розчинів солей, кислот тощо. Проте найбільший вплив на довговічність конструкцій має довкілля: водоповітряне середовище, ґрунтові води та агресивні речовини, що містяться в них, тощо [1-4].

Вплив агресивних середовищ, а саме компонентів, таких як: двоокис вуглецю (CO_2), сульфати (SO_4^{2-}), слугують чинниками [3, 4] ініціації хімічного руйнування матриці бетонів, через хімічні реакції з компонентами основного в'язучого – цементу. Через що в товщі бетонів виникають тріщини, через які волога, разом з агресивними іонами сполук солей, кислот та ін., потрапляють до структурної компоненти конструкцій бетонів

– залізної арматури – тим самим викликаючи інтенсивну деградацію. Всі ці чинники є основними факторами виникнення потреби у ремонті та реконструкції бетонних споруд.

В роботі розглянуті методи неруйнівного моніторингу експлуатаційної довговічності конструкційних елементів бетонних споруд, котрі розроблені для того аби можливо було попередити руйнуючі процеси за рахунок систематичних перевірок та плануванні ремонтних робіт для ізолювання процесів руйнації або капітальних ремонтів. Кожен метод базується на відповідному дослідженні та різниться один від одного, саме на цих різницях та їх ефективності акцентовано увагу в даній роботі.

Методи неруйнівного аналізу їх ефективність та застосування

Методологія дослідження стану бетонних конструкційних споруд [1], здебільшого, базується на необхідності проведення перевірок конструкційної цілісності та міцності на об'єктах котрі вже тривалий час введені у експлуатацію. Через що необхідність у неруйнівних методах аналізу є найкритичнішою. Більшість існуючих стандартів [2] регламентують: перевірку міцності шляхом вирізання кернів або кубів з конструкції, метод пружного відскоку, відриву зі сколом, визначення цілісності структури за допомогою ультразвукового імпульсу (UPV), та моніторинг корозійних процесів залізобетонних конструкцій методами електричного моніторингу. Кожен з цих методів відноситься до неруйнівних, через їх низький або повністю відсутній деструктивний вплив на цілісність конструкцій.

Контроль якості бетонних конструкцій шляхом вирізування кернів або кубів з проектного місця на об'єкті (забудові) [5] є одним з найпоширеніших методів моніторингу якості бетонних розчинів у період після зведення та підготовки зразків для визначення змін механічної міцності. Даний метод полягає в тому, що по всій площі існуючої конструкції, у визначених точках, проводиться відбір (вирізування) одиночних зразків кернів або кубів [6]. Даний метод не шкодить загальній цілісності та є загальнопоширеним при моніторингу стану бетонних конструкцій.

Ефективність даної методики полягає в наступному [5]:

- прогнозування довговічності конструкцій та розрахунок проведення планових ремонтних або робіт по реконструкції;
- перевірка несучої здатності конструкційних споруд у разі появи зовнішніх дефектів після нетривалого періоду експлуатації або впливу руйнуючого фактору (пожежа, землетрус, наводнення, тощо);
- оцінка відповідності характеристикам бетонної суміші під час конструкційних робіт.

Розміри кернів та кубів регламентуються відповідними стандартами для кожного виду випробування. Усі зразки ретельно перевіряються зовнішньо. Досліджуючи дані зразки, окрім дослідження міцнісних характеристик руйнівними методами аналізу, можна визначити такі показники, як: пористість, ступінь карбонізації/вилуговування, наявність внутрішніх дефектів.

Дослідження карбонізації на основі аналізу реакції на фенолфталеїновий індикатор [7] є одним з сучасних методів дослідження впливу зовнішнього середовища на довговічність бетонних конструкцій. Даний метод полягає в наступному принципі: середовище бетонної суміші має рН в межах значень 8..10, що у свою чергу при взаємодії з фенолфталеїновим індикатором набудатиме фіолетового відтінку (рис. 1), в той час як при карбонізації, бетон втрачає свою лужність, тим самим зменшуючи $pH < 8$ – місце контакту індикатора та бетону не забарвлюється.



Рис. 1. Визначення ступеню карбонізації за допомогою фенолфталеїну та порівняння проектних зразків (кернів) до контрольного (паралелограм)

Використання даного методу дозволяє спрогнозувати потенційну швидкість деструктивного впливу середовища на цілісність конструкцій. Проте, не дивлячись на ефективність методу, дану методику не можливо застосовувати на зразках, котрі були ізолювані від дії середовища експлуатації на тривалий період. Це пов'язано з тим що при зменшенні впливу агресивного агента [3, 4], двоокису вуглецю (CO_2), можливе відновлення процесів кристалоутворення еtringіту, тим самим відновлюючи рН середовища до лужного ($pH=8..10$). Дане зауваження вказується багатьма дослідниками [1-7], через що, ефективне застосування методу полягає у проведенні дослідження на свіжих зразках або по місцю відбору зразків.

Метод пружного відскоку є популярним, оптимальним та менш деструктивним в порівнянні до методів дослідження довговічності на зразках кернів та кубів. Основний принцип – використання співвідношення між поверхневою твердістю та міцністю бетону на стиск. Висота відскоку на шкалі, котру

вимірюють за допомогою молотка Шмідта (рис. 2) є мірою твердості. Даний метод застосовується для перевірки однорідності формовки бетону та для оцінки його міцності на стиск за рахунок його неруйнівного характеру. Проте, в порівнянні до руйнівного методу визначення на стиск, отримані результати методом пружного відскоку можуть сильно різнитися один від одного.



Рис. 2. Визначення міцності методом пружного відскоку за допомогою вимірювального пристрою «Молоток Шмідта»

Різниця у методах дослідження полягає у тому, що міцність на поверхні та всередині бетону, за рахунок пружно-напруженого стану суміші в середині зразку, того ж самого керну, може сильно відрізнятись. Для запобігання цьому, зазвичай на підприємствах існує крива калібрування з відповідним коефіцієнтом переведення відповідно до марки бетону.

Також на значення показників міцності, варто враховувати [8] як наявність порожот під поверхнею зони дослідження, так і якість поверхневого шару через карбонізацію. Додатково, одним з недоліків даного методу є те, що до та після кожного дослідження молоток Шмідта необхідно перевіряти за допомогою спеціальної калібруючої наковальні та попередня підготовка поверхні дослідження.

Ультразвуковий метод моніторингу (UPV) [9] застосовується для конструкцій з товстим шаром бетону або таких де є неможливим відбір кернів. Проводячи випробування в різних точках конструкції, оцінюють якість і однорідність бетону. Локально збільшений час проходження передаючого імпульсу є індикатором втрати міцності, даний характер можливо пояснити через: дослідження матеріалу низької жорсткості, тріщини, порожечі, зони замерзлого бетону, розшарування та інших неоднорідних ділянок, котрі, по своїй суті, є результатом різноманітних механічних пошкоджень, хімічних, термічних та екологічних впливів. Імпульс може бути дифрагований через розриви, тим самим збільшуючи як час проходження хвилі, так і довжину шляху виміру (позначення L рис. 3). Даним методом, можлива оцінка однорідності бетонної конструкції, коли сітка вимірювань ультразвукового імпульсу виконується в області інтересу (рис. 3).



Рис. 3. Принцип дослідження цілісності бетонних конструкцій ультразвуковим методом моніторингу [9]

Таким чином, різні зони (пошкоджені чи ні) локалізуються в структурі, що контролюється, що дозволяє оператору зосередитися на найбільш підозрілих, де можна провести подальші додаткові тести, що, очевидно, збільшує загальний час і вартість проекту. Хоча метод UPV можна успішно використовувати для виявлення дефектів бетону, він не може визначити їх природу. Крім того, можливе не тільки виявлення пошкоджень, але й моніторинг їх прогресу та можливої реабілітації [10, 11].

Ефективність методу полягає в тому що, при наявних даних кореляцій міцності по структурі бетонної конструкції та щільності структури при розподіленні наповнювача під час формовки, можливо достовірно визначити чи відбувається руйнація конструкції чи ні, що візуально відображається на відповідних кривих, дані котрих формуються устаткуванням. В той же час це є недоліком даного методу. Оскільки для конструкцій, вік експлуатації котрих є більшим, для прогнозування зміни міцності та відповідної довговічності конструкції [9], необхідне паралельне проведення випробування міцності на стиск – що у свою чергу передбачає паралельну підготовку кернів. На сьогодні даний спосіб застосовують для моніторингу свіжих бетонних конструкцій [12], коли більшість підприємств документують контрольні показники якості та проводять періодичний контроль об'єктів елементів конструкцій на будівництві.

Визначення міцності бетонних конструкцій **методом відриву зі сколом** [13] базується на принципі відриву анкера 16 x 35 (діаметр – 16 мм, глибина закладення – 35 мм) з бетонної конструкції (рис. 4). Пристрій для визначення міцності за даним методом дозволяє перерахувати силу висмикування в міцність бетону на

розрив. Додатково даним методом передбачено модифікування зони дослідження, у разі вивчення тривалого впливу зовнішніх факторів деградації [13]. Однією з таких модифікацій є насичення зони відриву оливою, що у свою чергу є аналогом впливу середовища на бетонні конструкції автошляхів, промислових зон нафтопереробки та металургійно-виробничих секторів, де негативний вплив на середовище є переважним.

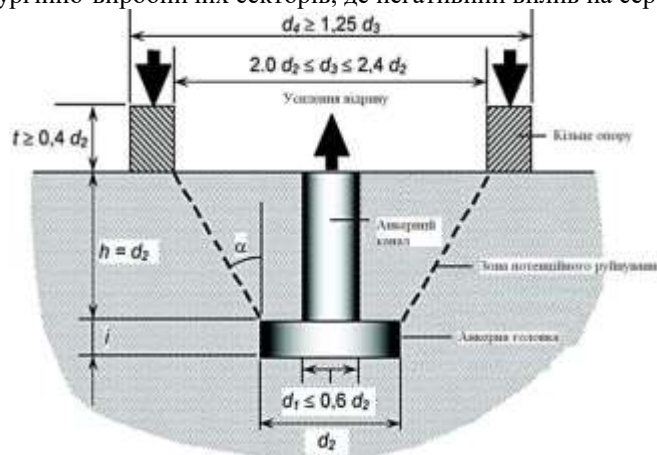


Рис. 4. Принцип розміщення анкери для відриву [13]

Оскільки даний метод базується на визначенні міцності на розтяг, а сама рідина для склеювання анкери додатково створює розтягуючу напругу на бетонні конструкції, це дозволяє знехтувати розклинювальною дією. Проте, даний метод сепарації зі сколюванням має свої переваги і недоліки. До переваг можна віднести додатковий розклинюючий ефект, який виникає при насиченні пір бетону клеючою сумішшю або маслом для додаткового збільшення ефективності. При цьому, як зазначається в роботах [13, 14], недоліками даного методу є вплив масла на слизкість анкери під час відриву, а також те, що не враховується міцність та цілісність конструкції у товщі бетону.

Методи електричного моніторингу корозійних процесів також варті своєї уваги. До даних методів неруйнівного аналізу [15] відноситься наступна група досліджень:

- вимірювання потенціалу корозії;
- вимірювання питомого опору бетону (по Веннеру);
- вимірювання поляризаційного опору.

Ці методи зосереджені безпосередньо на визначенні швидкості корозії арматури бетонних конструкцій та проведенні спостерегань за швидкістю проникнення агресивних компонентів із навколишнього середовища. Їх переваги засновані на:

- швидкості вимірювання;
- виявлення основних точок дефектів з високим ризиком корозії;
- надані уявлення про довговічність бетону;
- у випадку активного процесу корозії - узгоджується з гравіметричними втратами.

Недоліком даних методологій, як зазначено авторами [15, 16], є необхідність у паралельному дослідженні міцнісних показників. Це пов'язано з неоднорідністю отримуваних даних. Через що, оцінка результатів та їх порівняння, є одним з трудомістких моментів при проведенні дослідження.

Висновки

Розглянуті методи контролю довговічності бетонних конструкцій у свою чергу зорієнтовані на моніторинг експлуатаційної надійності: впливу середовища на цілісність структур, а також планування ремонтних та робіт з реконструкції.

Всі методи передбачають проведення досліджень безпосередньо на об'єктах та збору зразків у вигляді кернів або кубів. Відбір зразків є одним з найважливіших аспектів для дослідження конструкцій з високим віком експлуатації. В особливості коли це стосується впливу зовнішніх факторів таких як агресивне середовище. Карбонізація бетонних конструкцій є одним з чинників руйнування та деградації конструкційної цілісності бетонів, через що застосування фенол-фталейнового методу індикації є універсальним та зручним. Але через те, що даний метод лише вказує на візуальний показник впливу, він не є показовим для визначення міцності.

Метод визначення міцності за рахунок пружного відскоку (Молоток Шмідта), має перевагу над методом прямого механічного дослідження міцності на стиск. Але через низку вимог щодо експлуатації приладу та підготовки поверхні, а також урахування структури області дослідження, вносять свої недоліки у точність показників.

Ультразвуковий метод аналізу є ефективним для визначення зон ініціації руйнування бетонів, що у свою чергу є ефективним для прогнозування термінів проведення ремонтних або робіт по реконструюванні. Проте, ультразвуковий метод не дає повну картину зміни міцності, через що, необхідність відбору зразків для визначення фактичної зміни міцності від проектної до фактичної є суттєвою. Те ж саме відноситься і до методів електричного контролю довговічності конструкцій.

Моніторинг зміни міцності, за методом відриву зі сколом, є одним з найменш деструктивних. Даний метод передбачає відрив анкеру з товщі бетонної конструкції. Глибина занурення та урахування можливих чинників впливу на бетонне в'язуче є сприятливими факторами для широкого використання, але через те, що дослідження проводиться на поверхневих шарах бетону, він не є універсальним.

Окремо кожен метод не є ефективним. Проте, їх застосування як комплексного дослідження не деструктивного моніторингу довговічності є достатнім для прогнозування експлуатаційної ефективності бетонних споруд для періодичного або постійного моніторингу.

Література

1. Титаренко Р. Ю. До проблеми оцінки залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій, що знаходяться в експлуатації [Електронний ресурс] / Р. Ю. Титаренко, Р. Є. Хміль // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2023. – № 41. – С. 339–345. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.038>
2. Сікорський О. О. Карбонізація бетону: причини, наслідки, діагностика / О. О. Сікорський, Д. Ю. Монжеран, Д. С. Зюзь // XIII Міжнародна науково-практична WEB-конференція «Композиційні матеріали». – 2024. – С. 84–96.
3. Kovalenko Yurii, Tokarchuk Volodymyr, Kovaleko Svitlana Influence of sulfate ion environment on the cement matrix modified by redispersible polymers. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2023. Vol. 319, no. 2. P. 154–162. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-154-162>
4. Christian Orozco Comparison of environmental impacts of fly ash and slag as cement replacement materials for mass concrete and the impact of transportation. Sustainable Materials and Technologies. 2023. P. e00796. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00796>.
5. Setare Ghahri Saremi, Dimitrios Goulias Concrete strength gain monitoring with non-destructive methods for potential adoption in quality assurance. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 260. P. 120464. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120464>
6. Yee Yan Lim Monitoring of concrete curing using the electromechanical impedance technique: review and path forward. Structural Health Monitoring. 2019. P. 147592171989306. <https://doi.org/10.1177/1475921719893069>
7. Nadjat Djerfaf, Zahreddine Nafa, Akram Salah Eddine Belaidi Durability of high-performance concrete to an attack by a mixture of sulfuric acid and acetic acid. Epitoanyag - Journal of Silicate Based and Composite Materials. 2023. Vol. 75, no. 1. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2023.01>
8. Рогачук А. Ю. Дослідження міцності бетону методом ударного імпульсу [Електронний ресурс] / Рогачук Андрій Юрійович, Rohachuk Andriy. – [Б. м.], 2021. – Режим доступу : <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35186>
9. Karaiskos, G. Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method / G. Karaiskos, A. Deraemaeker, D. G. Aggelis, D. Van Hemelrijck // Smart Materials and Structures. – 2015 – 24(11). – Режим доступу: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/11/113001>
10. Shiotani T. Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage [Електронний ресурс] / T. Shiotani, D. G. Aggelis // Materials and Structures. – 2008. – Vol. 42, no. 3. – P. 377–384. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9388-4>
11. Healing performance monitoring using embedded piezoelectric transducers in concrete structures [Електронний ресурс] / G. Karaiskos [et al.] // Emerging Technologies in Non-Destructive Testing VI. – [S. l.], 2015. – P. 367–373. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1201/b19381-63>
12. Design and Validation of Embedded Piezoelectric Transducers for Damage Detection Applications in Concrete Structures [Електронний ресурс] / Grigoris Karaiskos [et al.] // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol. 569-570. – P. 805–811. – Режим доступу: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.569-570.805>
13. Gamal T. S. F. Comparative analysis of reliability of non-destructive methods of strength control of concrete impregnated with vegetable oil: Basalt fiber for increasing the concrete strength [Електронний ресурс] / Tareq Sedeq Futaini Gamal, Paschal Chimeremeze Chiadighikaobi // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19. – P. 2479–2482. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.113>
14. Panasyuk V. V. Methods and Devices for Technical Diagnostics of Long-term Concrete Structures [Електронний ресурс] / V. V. Panasyuk, V. I. Marukha, V. P. Sylovanyuk // Injection Technologies for the Repair of Damaged Concrete Structures. – Dordrecht, 2013. – С. 185–206. – Режим доступу: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7908-2_7
15. Kovalenko Y. O. Basic methods of monitoring of corrosion processes of cement structures and their implementation for projecting of possible mineralogical changes in matrix composition: review [Електронний ресурс] / Yu. O. Kovalenko // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. – 2024. – № 5. – С. 191–198. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.23>
16. Gu P. A discussion of the paper “electrode potential measurements of concrete reinforcement for corrosion evaluation” by R. Francois, G. Arliguie and D. Bardy [Електронний ресурс] / Ping Gu, Ping Xie, J. J. Beaudoin // Cement and Concrete Research. – 1995. – Vol. 25, no. 5. – P. 1111–1114. – Режим доступу: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)94168-r](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)94168-r)

References

1. Tytarenko R. Yu. Do problemy otsinky zalyszkovoho resursu zalizobetonnykh konstruksii, shcho znakhodiatsia v ekspluatatsii [Elektronnyi resurs] / R. Yu. Tytarenko, R. Ye. Khmil // Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy. – 2023. – № 41. – S. 339–345. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.038>
2. Sikorskyi O. O. Karbonizatsiia betonu: prychyny, naslidky, diahnostyka / O. O. Sikorskyi, D. Yu. Monzheran, D. S. Ziuz // XIII Mizhnarodna nauково-praktychna WEB-konferentsiia «Kompozytsiini materialy». – 2024. – S. 84–96.
3. Kovalenko Yurii, Tokarchuk Volodymyr, Kovaleko Svitlana Influence of sulfate ion environment on the cement matrix modified by redispersible polymers. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2023. Vol. 319, no. 2. P. 154–162. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-154-162>
4. Christian Orozco Comparison of environmental impacts of fly ash and slag as cement replacement materials for mass concrete and the impact of transportation. Sustainable Materials and Technologies. 2023. P. e00796. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00796>.
5. Setare Ghahri Saremi, Dimitrios Goulias Concrete strength gain monitoring with non-destructive methods for potential adoption in quality assurance. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 260. P. 120464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120464>
6. Yee Yan Lim Monitoring of concrete curing using the electromechanical impedance technique: review and path forward. Structural Health Monitoring. 2019. P. 147592171989306. <https://doi.org/10.1177/1475921719893069>
7. Nadjat Djerfah, Zahreddine Nafa, Akram Salah Eddine Belaidi Durability of high-performance concrete to an attack by a mixture of sulfuric acid and acetic acid. Epitoanyag - Journal of Silicate Based and Composite Materials. 2023. Vol. 75, no. 1. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2023.01>
8. Rohachuk A. Yu. Doslidzhennia mitsnosti betonu metodom udarnoho impulsu [Elektronnyi resurs] / Rohachuk Andrii Yuriiovych, Rohachuk Andriy. – [B. m.], 2021. – Rezhym dostupu : <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35186>
9. Karaiskos, G. Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method / G. Karaiskos, A. Deraemaeker, D. G. Aggelis, D. Van Hemelrijck // Smart Materials and Structures. – 2015 – 24(11). – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/11/113001>
10. Shiotani T. Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage [Elektronnyi resurs] / T. Shiotani, D. G. Aggelis // Materials and Structures. – 2008. – Vol. 42, no. 3. – P. 377–384. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9388-4>
11. Healing performance monitoring using embedded piezoelectric transducers in concrete structures [Elektronnyi resurs] / G. Karaiskos [et al.] // Emerging Technologies in Non-Destructive Testing VI. – [S. l.], 2015. – P. 367–373. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.1201/b19381-63>
12. Design and Validation of Embedded Piezoelectric Transducers for Damage Detection Applications in Concrete Structures [Elektronnyi resurs] / Grigoris Karaiskos [et al.] // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol. 569-570. – P. 805–811. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.569-570.805>
13. Gamal T. S. F. Comparative analysis of reliability of non-destructive methods of strength control of concrete impregnated with vegetable oil: Basalt fiber for increasing the concrete strength [Elektronnyi resurs] / Tareq Sedeq Futaini Gamal, Paschal Chimereze Chiadighikaobi // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19. – P. 2479–2482. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.113>
14. Panasyuk V. V. Methods and Devices for Technical Diagnostics of Long-term Concrete Structures [Elektronnyi resurs] / V. V. Panasyuk, V. I. Marukha, V. P. Sylovanyuk // Injection Technologies for the Repair of Damaged Concrete Structures. – Dordrecht, 2013. – S. 185–206. – Rezhym dostupu: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7908-2_7
15. Kovalenko Y. O. Basic methods of monitoring of corrosion processes of cement structures and their implementation for projecting of possible mineralogical changes in matrix composition: review [Elektronnyi resurs] / Yu. O. Kovalenko // Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky. – 2024. – № 5. – S. 191–198. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.23>
16. Gu P. A discussion of the paper “electrode potential measurements of concrete reinforcement for corrosion evaluation” by R. Francois, G. Arliguie and D. Bardy [Elektronnyi resurs] / Ping Gu, Ping Xie, J. J. Beaudoin // Cement and Concrete Research. – 1995. – Vol. 25, no. 5. – P. 1111–1114. – Rezhym dostupu: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)94168-r](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)94168-r)