

МОНЖЕРАН ДМИТРОКПІ ім. Ігоря Сікорського
<https://orcid.org/0009-0008-5578-1154>
e-mail: info@rbst.pro**СІКОРСЬКИЙ ОЛЕКСІЙ**КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.т.н.
<https://orcid.org/0000-0002-3730-2016>
e-mail: alexey.sikorskiy@ukr.net**КОВАЛЕНКО ЮРІЙ**КПІ ім. Ігоря Сікорського, Доктор філософії
<https://orcid.org/0000-0003-0714-3816>
e-mail: kovalenko.yurii@lil.kpi.ua

МОНІТОРИНГ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ В ПЕРІОДІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В роботі представлено результати моніторингу довговічності елементів мостових бетонних споруд та оцінку їх експлуатаційної тривалості. Збірні бетонні конструкції спрощують процеси зведення складних об'єктів транспортної інфраструктури. Моніторинг довговічності таких об'єктів є ускладненим у зв'язку з необхідністю використання методів руйнівного аналізу. Існуючі методи аналізу з високою точністю потребують повну руйнацію зразків. В роботі використовуються методи неруйнівного аналізу. Використовувалися методи визначення міцності на стиск стандартизованих кернів та метод визначення агресивного впливу за рахунок виявлення процесів карбонізації. Моніторинг проводиться у ранні строки експлуатації об'єкту. При дослідженні використовувалися стандартизовані керни малих та великих розмірів. Характер руйнування відповідає нормам державних стандартів, а визначена середня міцність не є меншою за паспортну. Визначення можливого початку хімічних процесів карбонізації, при використанні методу фенол-фтолеїнового ідентифікування, показав відсутність процесів карбонізації. На ранньому етапі моніторингу важко спрогнозувати залишковий період експлуатації, через що доцільність комплексного моніторингу, двох або більше методів дослідження є вагомим. Методологія «напружено-деформаційного» навантаження застосовувалася для порівняння отриманих значень коефіцієнтів міцності до тих що зазначені у стандартах. Деформаційний коефіцієнту ($\epsilon_{cu,\theta}$), розрахований показник для $\theta = 20^\circ\text{C}$ згідно до нормативних документів, складає 2,5. Проектний показник $\epsilon_{cu,\theta}=25$ дорівнює 3,13. Дослідження кернів показало, що за період експлуатації показники міцності зберігаються у межах проектної марки бетонів C25/30, відповідно середні значення складають 27,7 ... 29,6 МПа. Застосування метил-фтолеїнового індикатора вказує на відсутність карбонізаційних процесів корозії.

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

MONZHERAN DMYTRO**SIKORSKYI OLEKSII****KOVALENKO YURIY**

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

MONITORING OF THE BEARING CAPACITY OF BRIDGE STRUCTURES DURING OPERATION

The paper presents the results of monitoring the durability of elements of bridge concrete structures and assessing their operational duration. Precast concrete structures simplify the processes of constructing complex transport infrastructure facilities. Monitoring the durability of such facilities is complicated due to the need to use destructive analysis methods. Existing high-precision analysis methods require complete destruction of samples. The paper uses non-destructive analysis methods. Methods for determining the compressive strength of standardized cores and a method for determining aggressive effects by detecting carbonization processes were used. Monitoring is carried out in the early stages of the facility's operation. The study used standardized cores of small and large sizes. The nature of the destruction complies with the norms of state standards, and the determined average strength is not less than the passport value. Determination of the possible onset of chemical carbonization processes using the phenol-phthalein identification method showed the absence of carbonization processes. At the early stage of monitoring, it is difficult to predict the remaining period of operation, which is why the feasibility of comprehensive monitoring, two or more research methods is significant. The "stress-strain" loading methodology was used to compare the obtained values of strength coefficients to those specified in the standards. The deformation coefficient ($\epsilon_{cu,\theta}$), the calculated indicator for $\theta = 20^\circ\text{C}$ according to regulatory documents, is 2.5. The design indicator $\epsilon_{cu,\theta}=25$ is 3.13. The core study showed that during the operation period, the strength indicators remain within the design grade of concrete C25/30, respectively, the average values are 27.7 ... 29.6 MPa. The use of methyl-phthalein indicator indicates the absence of carbonization corrosion processes.

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

Вступ

Залізобетонні мостові конструкції – споруди котрі в своїй переважній більшості є об'єктами швидкого зведення з малою витратою часу за рахунок готових елементів конструкції, котрі попередньо були виготовлені на бетонних заводах. Арматурні каркаси заливають спеціальними цементуючими (бетонними) розчинами, котрі повинні слідувати наступним фізико-механічним характеристикам: висока міцність на стиск та вигин, витримувати вібраційне навантаження, а також мати високу довговічність [1].

З моменту появи збірних бетонних конструкцій, котрі в подальшому спростили процеси зведення складних об'єктів транспортної інфраструктури, моніторинг їх стану став ускладненим у

зв'язку з необхідністю використання методів руйнівного аналізу [2]. Існуючі методи аналізу з високою точністю потребують повну руйнацію зразків, через що були створені методи неруйнівного моніторингу довговічності залізобетонних конструкцій [1-10]. В залежності від середовища та періоду експлуатації, бетонні конструкції, в особливості мостові, мають низку ефективних методів, двоє з яких [3-10], є визначення міцності на стиск стандартизованих кернів та метод визначення агресивного впливу за рахунок виявлення процесів карбонізації.

Основними компонентами, котрі використовуються у виробництві збірних елементів є бетон, котрий відповідно модифікують до потреб у зонах експлуатації конструкцій. Зазвичай це є цементу типу ПЦ І, з низьким або високим вмістом Аліту (C_3A) або лужні цементи, магнезіальні та в деяких випадках фосфатні або алюмінатні [1, 11-12]. У якості заповнювачів – щебінь різної фракції, пісок, вапняк. У якості додаткових наповнювачів, котрі впливають на регулювання фізико-механічних показників та реологію сумішей – мікрокремнезем, шлак [11-12]. Армування відбувається за рахунок використання арматури. Найефективнішим є сталева арматура, котру і по нині використовують як основу для каркасів збірного залізобетону [1,12].

З прогресом технології полімерних матеріалів, стали з'являтися і новітні види арматури [1, 11]. Котрі, у свою чергу, отримали своє місце як потенційно ефективних заміників сталевих [11]. Питання можливого використання сталевих арматур з покриттям полімерного шару, або повноцінно полімерної (скловолоконної, карбонової, тощо) [10-12] полягало в тому що з часом за рахунок хімічних процесів, котрі мали місце при довготривалому часі експлуатації бетонних конструкцій, відбувався початок корозії як бетону, так і сталевих арматур [13-14].

Основні об'єкти мостових споруд, котрі найчастіше піддаються руйнуванню впливу середовища є [14]: плити перекриття, стикові шви, занурені у воду основи мостових опор. Основними чинниками руйнації є [2, 13-14]: пористість бетонних конструкцій та агресивні середовища з високим вмістом солей аніонів Cl^- , SO_4^{2-} . При цьому, хімічні процеси котрі перебігають при цьому однаково впливають на цілісність як бетону так і арматури. Це призводить до збільшення напруженості у конструкціях [15] та може викликати передчасне руйнування за рахунок руйнації бетону через вилугування та карбонізацію, та роз'їдання сталевих арматур за рахунок окислення оголених армуючих елементів.

При вирішенні деяких питань покращення довговічності бетонних мостових конструкцій, авторами [16] було досліджено низку самоущільнюючих бетонних розчинів з використанням суперпластифікатору та наповнювача крейди. При дослідженні п'яти складів та порівнянні до контрольного, в роботі [16], було отримано оптимальний склад з маркою міцності В35-В40. Проте, авторами не зазначалося про їх ефективність в умовах реальної експлуатації.

В роботі [17], автори приводять низку нормативних документів, котрі направлені на механізми моніторингу та оцінки руйнуючого впливу на бетонні конструкції. Наведені в роботі державні стандарти характеризують види цементних в'язучих, їх складів та видів, відповідно, до кожної сфери експлуатації. Таким чином зазначаючи у висновку [17], що в разі планування ремонтних робіт та виробництві збірних конструкцій з самого початку необхідно використовувати спеціалізовані в'язучі, котрі забезпечуватимуть зменшення впливу агресивного середовища в цілому, або подальшого руйнуючого впливу на вже існуючому об'єкті. При цьому, до схожого висновку, прийшли і автори [18], котрі в своїй роботі, на відміну від авторів [17], проводили дослідження на об'єкті - підприємстві з виготовлення елементів мостових бетонних перекриттів.

Мета та об'єкти дослідження

Робота спрямована на дослідження довговічності елементів мостових конструкцій за рахунок використання методів неруйнівного аналізу. Об'єктом дослідження є керни вирізані з плити дорожнього покриття та балки прогонової будови котрі випробовувалися на визначення початку процесів карбонізації та прогнозування строків експлуатації. Проектний розчин бетонної суміші має марку В20 - В25 (С25/30 за ДСТУ EN 206-2018).

Для дослідження було вирізано 2 серії по 6 зразків залізобетонних кернів. Було обрано керни малих та великих розмірів для набору та аналізу статистичних даних.



Рис. 1. Вигляд вихідних зразків циліндрів до обробки опорних поверхонь

Малі керни характеризуються розмірами 65 мм в діаметрі та 150 мм висотою а великі - 100 та 200 мм відповідно. Поверхні досліджуваних зразків були підготовлені згідно нормативних документів і не мають відхилень опорних поверхонь від центральної осі зразка більше ніж ± 1 мм.

Випробування проводились на Пресі 506/600M Form Test, виробництва Німеччина Максимальне зусилля – 600 кН (Рис. 2 а)

Пружна деформація в роботі визначається за допомогою стрілочного годинникового типу лінійного індикатора переміщення (Рис. 2 б)

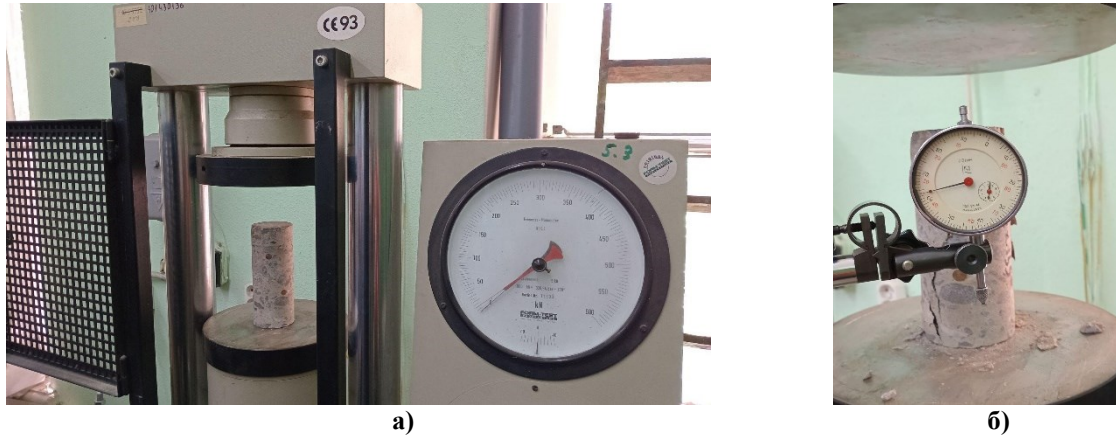


Рис. 2. Лабораторне обладнання

Визначення пружної деформації проводилось одночасним випробуванням зразків кернів біля яких був розміщений лінійний індикатор переміщення.

Результати дослідження

Відповідно, експлуатаційна довговічність залізобетонних конструкцій, має основний критерій за котрим визначається та прогнозується фізико-механічна довговічність споруд - міцність при напруженому стані. Значення механічної пружності дорожніх залізобетонних конструкцій, відповідно до нормативних документів (EN 1992-1-2), вираховується за залежністю “напруження-деформація”, котра визначається за двома параметрами: міцністю на стиск (f_{cb}) та деформацією (ϵ_{cb}).

При дослідженні міцності кернів вирізаних з конструкції, враховувалися вимоги до об'єкту та зони дослідження участку конструкції. Результати дослідження проектних зразків були зведені у графік “залежності міцності до пружної деформації” відображений на рисунку 3.

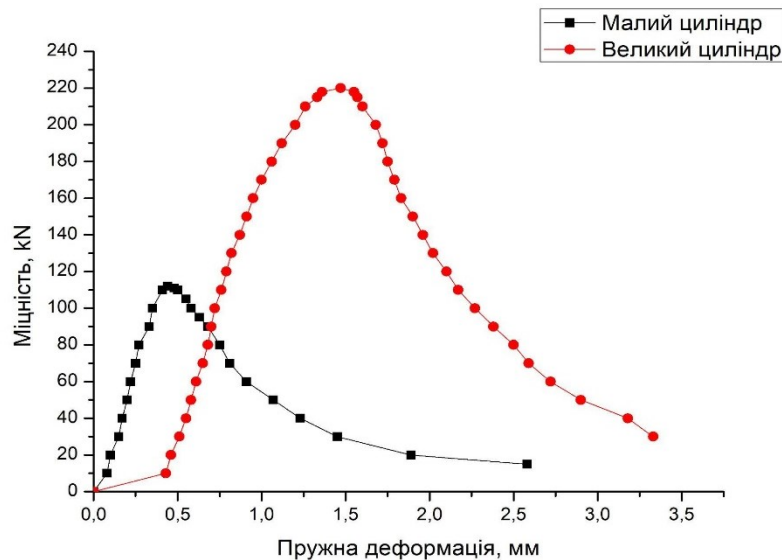


Рис. 3. Крива залежності міцності від пружної деформації за нормальної температури (25° С).

Відповідно отриманих даних та контрольних (вихідних) значень до класу міцності бетонних сумішей, враховуючи вимоги до ДСТУ EN 206-2018, та вимог до проведення досліджень на кернях згідно ДСТУ Б В.2.7-214-2009, показники міцності відповідають класам бетонів С25/30, що підтверджується згідно отриманих результатів міцності на стиск кернів, наведених у таблиці 1.

Охарактеризовуючи криву зміни міцності при пружній деформації на зразках малих та великих кернів та відповідні показники міцності при стиску, можна зауважити, що за період експлуатації, конструкційної деградації міцності не відбувається.

Таблиця 1

Показники міцності на стиск великих та малих кернів

№ зразка	Малі керни		Великі керни	
	міцність на стиск kN *	МПа **	міцність на стиск kN	МПа
1	109	29,6	216	27,5
2	110	29,8	220	28,0
3	108	29,3	223	28,4
4	112	30,4	218	27,8
5	109	29,6	215	27,4
6	107	29,0	211	26,9
Середнє значення	109,2	29,6	217,2	27,7

* - значення в kN без перевідного коефіцієнту

** - значення в МПа з урахування перевідного коефіцієнту. При перерахунку значень міцності на стиск з kN в МПа для малих кернів використовувався перевідний коефіцієнт. Для зразків діаметром 63 ± 6 мм - перехідний коефіцієнт становить 0,9.

Керуючись табличними даними згідно існуючого EN1992-1-2, де характерний показник коефіцієнту міцності при зміні пружності відповідає співвідношенню контрольних значень до проектних при експлуатації за температурних умов $\theta = 25^\circ\text{C}$, коефіцієнт $k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_c = 1,25$ (згідно EN, для температур $\theta = 20^\circ\text{C}$, коефіцієнт $k_{c,20} = 1$). А отже, значення даного коефіцієнту вказує на наявність запасу міцності, по котрій можна спрогнозувати та спланувати подальші точки експлуатаційного моніторингу з подальшим розрахунком періодів планового ремонту / реконструкцій. При цьому приймаючи до уваги табличні значення деформаційного коефіцієнту ($\varepsilon_{cu,\theta}$), розрахований показник для $\theta = 20^\circ\text{C}$ складає 2,5. У перерахунку до проектних показників $\varepsilon_{cu,\theta=25}$ дорівнюватиме 3,13. А отже, аби почалися процеси руйнування бетону, необхідно аби граничне значення відносної деформації бетону за $\varepsilon_{cu,\theta=25}$ знаходилися в межах 3,12 ... 5,13, що відповідатиме появі магістральних тріщин на об'єкті.

Паралельно дослідженням міцності проводилося визначення потенційного початку корозійних процесів карбонізації бетону при використанні фенол-фталейнового індикатора (рис. 4). Карбонізація бетону супроводжується утворенням карбонатних розчинних або малорозчинних сполук у середині матриці, знижуючи його лужність та зменшуючи, відповідно, його показники міцності. Даний тип корозійного впливу на залізобетонні конструкції збільшує тиск між кристалічними утвореннями продуктів гідратації цементу, що у свою чергу викликають пружно-напружені області за рахунок постійного накопичення нерозчинних структур у порах або мікротріщинах матриці. А за рахунок постійного впливу вологи (дощі, миття доріг, заморожування відтаювання), вимиває утворені сполуки лишаючи ще більші порожнечи, в котрих відбуватиметься подальше утворення солей. Це призводить до розтріскування структури, тим самим, сприяючи подальшій взаємодії цементу з агресивним середовищем. Результатом даної хімічної руйнації є оголення сталеві арматури та активація процесів корозії металу залізобетонної конструкції.

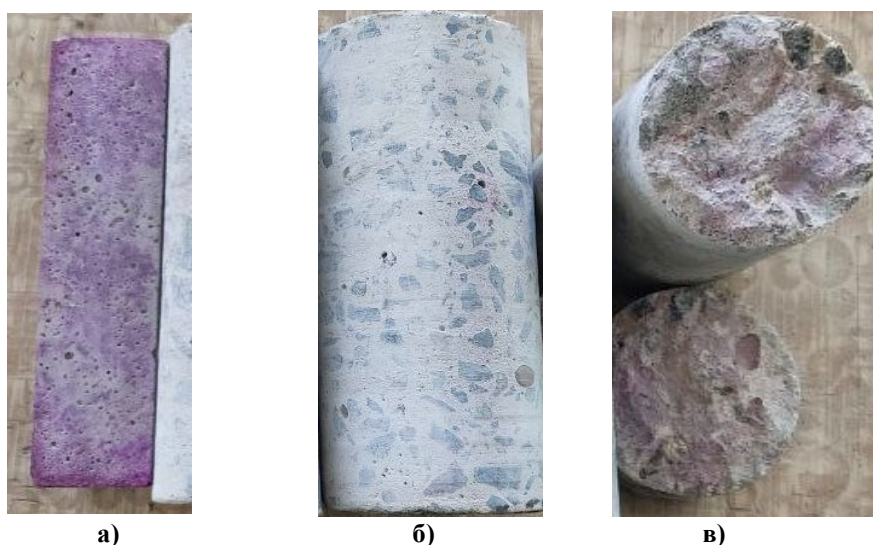


Рис. 4. Визначення початку процесів карбонізації: а) – контрольний свіжий зразок для референції; б) – проектний зразок (зовнішнє визначення); в) – проектний зразок (внутрішнє визначення).

Бетонний розчин, представляє собою лужне середовище в котрому відбуваються процеси кристалізації цементних мінералів, котрі активуються при гідратації. Відповідно процес створює сильне лужне середовище котре сприяє росту кристалогідратів та міцності бетону в цілому. При застосуванні

фенол-фталеїнового індикатору на поверхні бетонних зразків відбуватиметься поява фіолетового забарвлення як видно з рисунку 4.а. У разі початку процесу карбонізації бетону, відбувається зниження лужного середовища, і індикатор не проявлятиме на поверхні зразків фіолетового забарвлення. Проблематикою даного методу визначення карбонізаційної корозії бетонів, також є місце нанесення індикатору та чистота поверхні дослідження, що видно з рисунку 4.б., де індикатор наносився на неочищену поверхню керну та має тускле забарвлення. Через що доцільним є застосування індикатора на внутрішні частини керну, після випробування на міцність, як видно з рисунку 4.в. Прояв фіолетового кольору відбувався на всіх проектних зразках, що свідчить про те що за момент експлуатації не відбувалося негативного хімічного впливу на структуру конструкцій, що відповідно підтверджується і результатами дослідження міцності на стиск. У разі присутності карбонізаційної корозії в бетонних конструкціях відбувається зниження міцності бетонів в цілому, чого не спостерігається при визначенні міцності.

Висновки

Визначення та прогнозування експлуатаційної довговічності залізобетонних конструкцій є комплексним дослідженням котре включає в себе багато різноманітних аспектів. Окрім візуального моніторингу процесів корозії, також є необхідність у розрахунок його «напружено-деформаційних» характеристик, котрі не тільки визначають його максимальну механічну стійкість, але й дозволяють спрогнозувати зміну у експлуатаційний період. Відповідно керуючись значеннями коефіцієнтів та показників міцності, паралельний моніторинг корозійних процесів за рахунок застосування фенол-фталеїнового індикатору, для визначення корозійних процесів є доцільним. У разі невідповідності показників міцності та відсутності негативного результату зовнішнього моніторингу, можна спрогнозувати та розрахувати експлуатацію довговічності конструкції та визначити період ремонтних робіт.

Література

1. Virmani Y. P. Corrosion protection: Concrete bridges / Yash Paul Virmani. – McLean, VA : Federal Highway Administration, 1998. – 67 p.
2. 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 [Electronic resource] / Yu. O. Kovalenko // Tavriyskiy naukovy visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky. – 2024. – № 5. – С. 191–198. – Mode of access: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.23>
3. Монжеран Д. Огляд неруйнівних методів аналізу та їх застосування для моніторингу довговічності конструкції бетонних споруд [Електронний ресурс] / Дмитро Монжеран // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2024. – Т. 341, № 5. – С. 188–193. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-29>
4. Bień J. Strategies and tools for the monitoring of concrete bridges [Electronic resource] / Jan Bień, Mieszko Kuźawa, Tomasz Kamiński // Structural Concrete. – 2020. – Vol. 21, no. 4. – P. 1227–1239. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/suco.201900410>
5. Structural Health Monitoring of a Prestressed Concrete Bridge Based on Statistical Pattern Recognition of Continuous Dynamic Measurements Over 14 Years [Electronic resource] / Wei-Hua Hu [et al.] // Sensors. – 2018. – Vol. 18, no. 12. – P. 4117. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s18124117>
6. Kulprapha N. Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient thermal responses [Electronic resource] / Nonthachart Kulprapha, Pennung Warnitchai // Engineering Structures. – 2012. – Vol. 40. – P. 20–38. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.001>
7. Hybrid health monitoring of prestressed concrete girder bridges by sequential vibration-impedance approaches [Electronic resource] / Jeong-Tae Kim [et al.] // Engineering Structures. – 2010. – Vol. 32, no. 1. – P. 115–128. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.021>
8. Sumitro, S. Structural health monitoring paradigm for concrete structures / Sumitro, S., Hida, K., & Diouron, T. L. // In 28th Conference on Our World In Concrete & Structures, Singapore, 27-29 August 2003, Conference Documentation Volume XXII (pp. 525-532).
9. Sousa H. Construction assessment and long-term prediction of prestressed concrete bridges based on monitoring data [Electronic resource] / Helder Sousa, João Bento, Joaquim Figueiras // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 52. – P. 26–37. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.003>
10. Філоненко, С. Ф. Методи та засоби діагностики мостових конструкцій / Філоненко, С. Ф., Корнієнко, І. К., & Косицька, Т. М. // Вісник НАУ, 3, 2008, с. 172-182.
11. Lantsoght E. O. L. Advanced Structural Concrete Materials in Bridges [Electronic resource] / Eva Olivia Leontien Lantsoght // Materials. – 2022. – Vol. 15, no. 23. – P. 8346. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/ma15238346>
12. Investigating the Effects of Concrete Mix Design on the Environmental Impacts of Reinforced Concrete Structures [Electronic resource] / Hasan Mostafaei [et al.] // Buildings. – 2023. – Vol. 13, no. 5. – P. 1313. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/buildings13051313>
13. Kovalenko Y. Influence of sulfate ion environment on the cement matrix modified by redispersible polymers [Electronic resource] / Yurii Kovalenko, Volodymyr Tokarchuk, Svitlana Kovaleko // Herald of

Khmelnitskyi National University. Technical sciences. – 2023. – Vol. 319, no. 2. – P. 154–162. – Mode of access: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-154-162>

14. Бану, С. В. Причини раннього ушкодження бетонних і залізобетонних мостів / С. В. Бану, А. В. Седов // Збірник наукових праць 86-ї міжнародної наукової конференції студентів університету. Секція: Будівництво та експлуатація автомобільних доріг, 9–10 квіт. 2024 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2024. – С. 21–24.

15. Седов А. В. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних елементів мостів та шляхопроводів при використанні хлористих протижелезних матеріалів [Електронний ресурс] / А. В. Седов, О. О. Фоменко // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – 2023. – № 19. – С. 183–191. – Режим доступу: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9\(19\)-21](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9(19)-21)

16. Кабусь, О. В. Дослідження складів самоущільнюючих бетонів для виготовлення мостових балок [Електронний ресурс] / Кабусь, О. В., Буцька, Л. М., Латорець, К. В., & Гуркаленко, В. А. // Науковий вісник будівництва. – 2019 – 2, № 2 – с. 285-290. – Режим доступу: <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2019-96-2-285-290>

17. Киричок В. І. Проблема забезпечення довговічності бетонних та залізобетонних споруд на шляху євроінтеграції України / В. І. Киричок, П. В. Кривенко // Архітектурний вісник КНУБА : наук.-вироб. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт.; відп. ред. П. М. Куліков. – Київ : КНУБА, 2015. – Вип. 7. – С. 315-320.

18. Коваленко В. В. Комплексний підхід до вирішення проблем довговічності залізобетонних мостових конструкцій [Електронний ресурс] / В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, С. В. Коваленко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2018. – № 13. – С. 25–36. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15802/bttrp2018/151422>

References

1. Virmani Y. P. Corrosion protection: Concrete bridges / Yash Paul Virmani. – McLean, VA : Federal Highway Administration, 1998. – 67 p.
2. 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 [Electronic resource] / Yu. O. Kovalenko // Tavriyskiy naukoviy visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky. – 2024. – № 5. – С. 191–198. – Mode of access: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.23>
3. Monzheran D. Review of non-destructive analysis methods and their application for monitoring the durability of concrete structures [Electronic resource] / Dmytro Monzheran // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2024. – Vol. 341, No. 5. – P. 188–193. – Mode of access: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-29>
4. Bień J. Strategies and tools for the monitoring of concrete bridges [Electronic resource] / Jan Bień, Mieszko Kuźawa, Tomasz Kamiński // Structural Concrete. – 2020. – Vol. 21, no. 4. – P. 1227–1239. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/suco.201900410>
5. Structural Health Monitoring of a Prestressed Concrete Bridge Based on Statistical Pattern Recognition of Continuous Dynamic Measurements Over 14 Years [Electronic resource] / Wei-Hua Hu [et al.] // Sensors. – 2018. – Vol. 18, no. 12. – P. 4117. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s18124117>
6. Kulprapha N. Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient thermal responses [Electronic resource] / Nonthachart Kulprapha, Pennung Warnitchai // Engineering Structures. – 2012. – Vol. 40. – P. 20–38. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.001>
7. Hybrid health monitoring of prestressed concrete girder bridges by sequential vibration-impedance approaches [Electronic resource] / Jeong-Tae Kim [et al.] // Engineering Structures. – 2010. – Vol. 32, no. 1. – P. 115–128. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.021>
8. Sumitro, S. Structural health monitoring paradigm for concrete structures / Sumitro, S., Hida, K., & Diouron, T. L. // In 28th Conference on Our World In Concrete & Structures, Singapore, 27-29 August 2003, Conference Documentation Volume XXII (pp. 525-532).
9. Sousa H. Construction assessment and long-term prediction of prestressed concrete bridges based on monitoring data [Electronic resource] / Helder Sousa, João Bento, Joaquim Figueiras // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 52. – P. 26–37. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.003>
10. Філоненко, С. Ф. Методи та засоби діагностики мостових конструкцій / Філоненко, С. Ф., Корнієнко, І. К., & Косицька, Т. М. // Вісник НАУ, 3, 2008, с. 172-182.
11. Lantsoght E. O. L. Advanced Structural Concrete Materials in Bridges [Electronic resource] / Eva Olivia Leontien Lantsoght // Materials. – 2022. – Vol. 15, no. 23. – P. 8346. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/ma15238346>
12. Investigating the Effects of Concrete Mix Design on the Environmental Impacts of Reinforced Concrete Structures [Electronic resource] / Hasan Mostafaei [et al.] // Buildings. – 2023. – Vol. 13, no. 5. – P. 1313. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/buildings13051313>
13. Kovalenko Y. Influence of sulfate ion environment on the cement matrix modified by redispersible polymers [Electronic resource] / Yurii Kovalenko, Volodymyr Tokarchuk, Svitlana Kovaleko // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2023. – Vol. 319, no. 2. – P. 154–162. – Mode of access: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-154-162>
14. Banu, S. V. Causes of early damage to concrete and reinforced concrete bridges / S. V. Banu, A. V. Sedov // Collection of scientific papers of the 86th international scientific conference of university students. Section: Construction and operation of highways, April 9–10, 2024 / Kharkiv. national highway. univ. – Kharkiv, 2024. – pp. 21–24.
15. Sedov A. V. Investigation of the causes of premature destruction of reinforced concrete elements of bridges and overpasses when using chloride anti-icing materials [Electronic resource] / A. V. Sedov, O. O. Fomenko // Modern technologies and calculation methods in construction. – 2023. – No. 19. – pp. 183–191. – Mode of access: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9\(19\)-21](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9(19)-21)
16. Kabus, O. V. Research of self-compacting concrete compositions for the manufacture of bridge beams [Electronic resource] / Kabus, O. V., Butska, L. M., Latorets, K. V., & Gurkalenko, V. A. // Scientific Bulletin of Construction. – 2019 – 2, No. 2 – p. 285-290. – Mode of access: <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2019-96-2-285-290>
17. Kyrychok V. I. The problem of ensuring the durability of concrete and reinforced concrete structures on the path of European integration of Ukraine / V. I. Kyrychok, P. V. Kryvenko // Architectural Bulletin of the KNUBA: scientific-production collection / Kyiv. National University of Construction and Architecture; Deputy Editor P. M. Kulikov. – Kyiv: KNUBA, 2015. – Issue 7. – P. 315-320.
18. Kovalenko V. V. A comprehensive approach to solving the problems of durability of reinforced concrete bridge structures [Electronic resource] / V. V. Kovalenko, Yu. L. Zayats, S. V. Kovalenko // Bridges and tunnels: theory, research, practice. – 2018. – No. 13. – P. 25–36. – Mode of access: <https://doi.org/10.15802/bttrp2018/151422>