

УДК 624.21:625.745.1
UDC 624.21:625.745.1

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-080-092

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН КОРОЗІЇ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ
ПРИ АВАРІЙНОМУ РУЙНУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ ПРОГОНОВОЇ
БУДОВИ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО МОСТА**

**INVESTIGATION OF THE CAUSES OF CEMENT STONE CORROSION IN THE EMERGENCY
DESTRUCTION OF THE DECK STRUCTURE OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE**



Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди»
Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010
e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>



Коваленко Валентина Володимирівна, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник Інституту проблем
матеріалознавства НАН України
вул. Омеляна Прицака (Кржижановського), 3, Київ, Україна, 03142
e-mail: ykovdp@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1196-7730>



Риковцев Олексій Ігорович, аспірант кафедри «Мости, тунелі і
гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010
e-mail: rykovtsevoleksii@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-8751-9934>



Ковальчук Віталій Володимирович, доктор технічних наук,
професор, професор кафедри залізничного транспорту,
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013
e-mail: kovalchuk.diit@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-1715-6058>

Анотація. Робота присвячена проведенню досліджень стану конструкцій мосту Повітрофлотського проспекту через р. Либідь в м. Київ. Для цього застосовано методи вибіркової оцінки залізобетонних конструкцій прогонової будови мосту, експрес-методики мікроструктурного, мікрорентгеноспектрального та фрактографічного аналізів.

Метою роботи є дослідження та виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій через р.Либідь.

Об'єкт дослідження: конструкції прогонових будов моста.

У результаті досліджень встановлено, що у складі бетону на границі заповнювачів піску та цементного каменю спостерігається наявність підвищеної кількості лужних металів та галогенів, яка перевищує вимоги державних стандартів у декілька разів.

Встановлено, що середнє значення концентрації оксиду сірки складає 4,93 % (мас.). Має місце локальне підвищення концентрації її оксиду до 6,15 % (мас.), що значно перевищує нормативний показник у 3,5 % (мас.). Крім того, значний відсоток вуглецю в структурі цементного каменю усіх зразків свідчить про його карбонізацію, що додатково знижує механічні характеристики бетону в конструкціях мосту.

З метою попереджень випадків передчасного руйнування бетону мостів, шляхопроводів, автодоріг пропонуємо проводити моніторинг якості бетону існуючих конструкцій та під час будівництва нових об'єктів за експрес-методикою мікроструктурного аналізу, а також для наочного спостереження за швидкістю корозійних процесів слід встановити гіпсовий маяк на тріщину на опорній колонні моста з боку тротуару.

Для усунення активного впливу галогенів на структурні перетворення в бетоні, що експлуатується пропонуємо дослідити можливість використання менш агресивних речовин, які менше впливатимуть на корозійні процеси в бетоні і арматурі залізобетонних споруд, але ефективно будуть сприяти очищенню тротуарів та проїзної частини доріг від снігу.

Ключові слова: прогонові будови мостів, балкові мости, бетон, корозія цементного каменю, мікроструктурний аналіз, мікрорентгеноспектральний аналіз, лужно-кремнієвокисла реакція, аварійне руйнування, прогнозування довговічності бетону.

Вступ. Корозія бетону є актуальною проблемою у всіх країнах світу. Особливу увагу процесам корозії цементного каменю приділяють для умов експлуатації бетонних труб в якості обсадних для добичі газу та нафти. Вплив на бетон високих тисків газу CO₂, нафти при високих температурах призводить до прискореної корозії цементного каменю та втраті його механічних властивостей [1–2].

Однак процес карбонізації бетону, який працює на відкритому повітрі відбувається із швидкістю приблизно 20 мм у 25 років. Зниження міцності бетону в приповерхневому шарі відбувається за рахунок впливу карбонільної кислоти, яка знижує лужність цементного каменю. Дана загально відома проблема виникає виключно в приповерхневих ділянках бетонного масиву. Більш небезпечним видом корозії є лужно-кремнієвокисла корозія цементного каменю, яка відбувається у всьому масиві бетону залізобетонних виробів, конструкцій, споруд.

Проблема лужно-кремнієвокислої корозії бетону в Україні досі не контролюється державними організаціями так, наприклад, за умов уведення в 2010 р. ДСТУ Б В. 2.6-145:2010 [3], вимоги цього стандарту не вносяться в проекти будівництва стратегічних інфраструктурних об'єктів, які будуються за кошти державного бюджету, та споруд комунального загального і промислового користування.

Передчасне руйнування бетону після 1–10 років експлуатації в Україні доволі часто явище при тому, що термін служби бетону складає від 50 до 100 років. Вигода від впровадження зазначеного стандарту в проектну документацію усіх будівельних об'єктів є очевидною і дотримання норм цього національного стандарту буде сприяти попередженню передчасних руйнувань бетону. Необхідно також зауважити, що традиційні стандартизовані методи досліджень характеристик сировинних матеріалів дозволяють отримати результати аналізів не раніше ніж за тиждень від їх початку, а швидкість переробки цементу та заповнювачів на бетонних заводах і вузлах значно перевищує можливості лабораторних досліджень. Таким чином, неможливість вчасно отримати результати досліджень викликає проблему забезпечення довговічності бетону конструкцій.

Відновлення економіки України потребує значних закордонних інвестицій, в тому числі приватних інвесторів, які будуть стежити за ефективністю власних інвестицій. Таким чином,

застосування стандарту ДСТУ Б В. 2.6-145: 010 [3] сприятиме ефективному витрачання коштів в будівництві, суттєво підвищить інвестиційну привабливість та ефективність розбудови України.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Довговічність бетону, як основного матеріалу для будівництва інфраструктурних споруд є об'єктом досліджень багатьох вітчизняних авторів, а саме: Пшінька О.М., Рунова Р.Ф., Коваленка В.В., Плугіна А. А. та інші, що відображено у науково-дослідних роботах [4] - [9].

Мостові конструкції витримують значні динамічні навантаження в корозійно-активному середовищі у комплексі із температурними коливаннями. Такі складні умови експлуатації вимагають строгої технологічної дисципліни під час виготовлення та використання мостових конструкцій.

Згідно чинного законодавства в сфері будівництва бетон конструкцій повинен відповідати таким стандартам: ДСТУ: ДСТУ ISO 3696:2003 [10] (ISO 3696:1987, IDT) ДСТУ Б EN12620:2013 [11] ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [3]; ДСТУ Б В.2.7-32-95 [12]; ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [13]; ДСТУ Б В.2.7-71 -98 [14]; ДСТУ Б В.2.7-75-98 [15]; ДСТУ Б В.2.7-210:2010 [16]; ДСТУ Б EN 197-1:2015[17]; ДСТУ 9183:22 [18]; ДСТУ EN 197-2:2023[19]; ДСТУ 8858:2019 [20]. Вміст хлор-іонів у цементобетонах дорожніх не повинен бути більше ніж: 0,2 % від маси цементу для цементобетонів з ненапруженою арматурою та 0,1 % від маси цементу для цементобетонів з напруженою арматурою. Інші не менш важливі вимоги до сировинних матеріалів та бетону наведено в стандартах [21] – [29].

Із проведеного аналізу наукових робіт [1–9] встановлено, що задачі досліджень технічного стану прогонових будов мостів та виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій є актуальними та своєчасними.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій через р. Либідь.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести обстеження конструкцій прогонової будови моста;
- провести експериментальні дослідження із визначення причин аварійного руйнування прогонової будови моста із використанням мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкодженого корозією та цілого бетону конструкцій прогонової будови мосту та опор мосту;
- визначити мікроструктуру та хімічний склад бетону на границі цементний камінь – піщана частка.

Матеріали та методика досліджень. Проведемо дослідження причин аварійного руйнування мосту через ріку Либідь по Повітрофлотському проспекту в м. Київ. Міст збудовано в 1954 р. з реконструкцією в 1982 р., більшість елементів конструкцій мосту знаходяться в незадовільному стані. Присутнє корозійне розтріскування бетону та руйнування окремих частин бетонного масиву.

Конструкції мостової будови нерівномірно пошкоджені та причини пошкоджень відрізняються: від лужно-кремнієвокислої реакції до прискореного руйнування під дією хімічних реагентів.

Загальний вид пошкоджень наведено на рис. 1. Як видно з рис. 1, а, б на поверхні бетону опор і прогонової будови оголені арматурні прутки. За нормативними документами шар бетону над арматурою не повинен бути меншим за 20 мм задля забезпечення захисту арматури від корозії. Також наявна корозія бетону між ребрами мостової балки. Шар бетону над арматурою зруйновано та спостерігається оголена арматурна решітка.

Незахищена арматурна решітка активно кородує та разом із бетоном втрачає проектну міцність. На поверхню бетону виділяється білява кремнієва рідина, що свідчить про активність процесу лужно-кремнієвокислої реакції між цементним каменем та піском у складі бетону.

Огляд нижньої прогонової частини мосту показав наявність подальшого осипання бетонних брил, нещільного прилягання бетону до арматурної решітки (рис. 1, в).

Макроструктурний аналіз бетону прогонової частини мостових конструкцій показав, що бетонна суміш під час будівництва була якісно укладена в конструкціях мосту. Непошкоджені частини конструкції мають гладку поверхню, яка свідчить про відсутність зовнішніх ознак процесів корозійного розтріскування та відносного збереження міцності основних несучих конструкцій (надалі

мікроструктурний аналіз має показати наскільки бетон є дефектним та можливий термін його подальшої експлуатації).

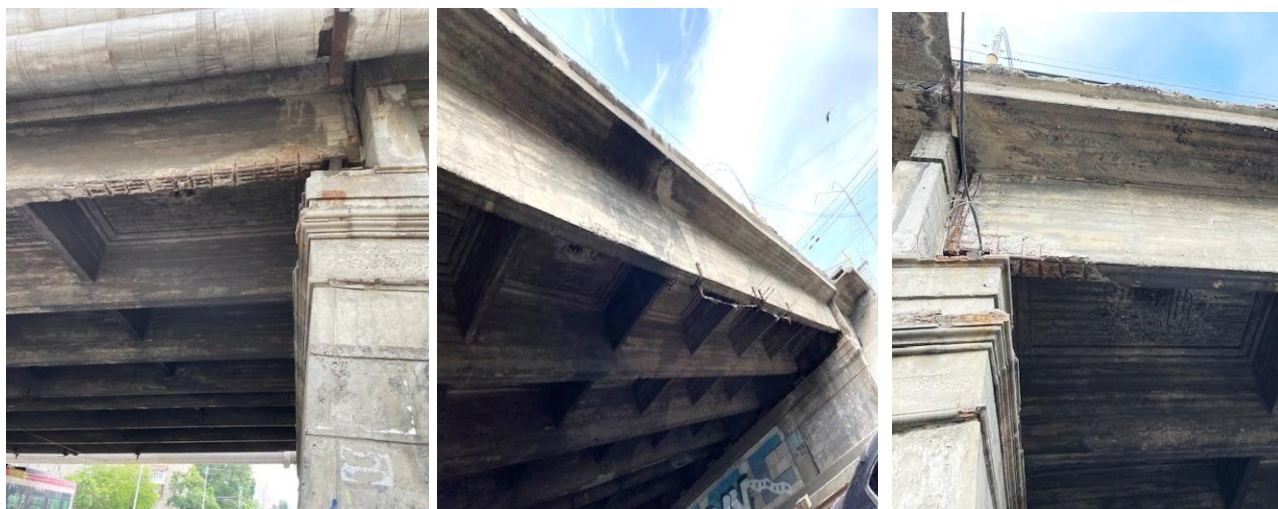


Рисунок 1 – Загальний вигляд пошкоджень мосту Повітрофлотського проспекту через р. Либідь в м. Київ

Figure 1 – General view of the damage to the Povitroflotskyi Avenue bridge across the Lybid River in Kyiv

Наявність активної корозії балок мостових говорить про необхідність їх заміни. Руйнування огорожень і частини пішохідного проходу мосту відбулося з однієї сторони мосту. Це доводить, що подібна аварійна ситуація відбулася із зовнішніх причин (нанесення, або задування вітром речовини агресивної до цементного каменю бетону).

Таким чином, усі наведені на рис. 1 дефекти прогонових будов моста є результатом дії різних зовнішніх та внутрішніх факторів на бетон споруди.

Аварійне руйнування бетону мостових конструкцій ініційоване різними типами корозії бетону. Переважне значення має лужно-кремнієвокисла корозія, швидкість якої прискорюється активними реагентами. Макроструктурний аналіз виявив наявність виділень кремнієвої рідини із зони прискореного руйнування бетону. Для визначення подальшої активності процесу корозії необхідно встановити гіпсові маяки на тріщини на опорах мосту.

Результат експериментальних досліджень із визначення причин аварійного руйнування прогонової будови моста із дослідженням мікроструктури та хімічного складу. Більш глибоке вивчення причин аварійного руйнування проводили за допомогою дослідження мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкодженого корозією та цілого бетону конструкцій прогонової будови моста та опор моста.

Аналіз хімічного складу цементу, окремих піщаних часток, цементного каменю та продуктів лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні прогонової частини моста і опор проводили із використанням методів скануючої мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу. Результати кількісного аналізу вмісту хімічних елементів, та особливо співвідношень концентрацій хімічних елементів в структурних складових на плоских поверхнях речовин та кристалах (наприклад, кремнієвого гелю, на розколі пісочних часток, масиві цементного каменю) у високому вакуумі з напругою, яка прискорює – 10 кВ, дозволяють виявляти наявність та кількість хімічних елементів з точністю до 0,01 відсотка мас. Що є на рівні, або перевищує точність діючих стандартних методів аналізу. При цьому необхідно відмітити швидкість проведення вказаних випробувань, що дозволяє їх віднести до експрес-методів визначення

характеристик матеріалів. Експрес методику важливо поєднувати із застосуванням традиційних методів аналізу, які прописані в відповідних діючих стандартах України.

У дослідженні проведено послідовне сканування структурних складових бетону за допомогою енергодисперсійного аналізатора з Оксфордськими програмами кількісного аналізу хімічних елементів. Максимальна точність отриманих результатів мікрорентгеноспектрального аналізу базується на застосованому методі, при якому дослідження зразків проводиться у глибокому вакуумі до 10^{-5} Па.

Від відповідності характеристик цементу нормам стандарту ДСТУ Б.В. 2.7-46:2010 залежить структуроутворення цементного каменю, морфологія кристалів, фізико-механічні характеристики та довговічність залізобетонних виробів. При підвищеній лужності цементу (приведений коефіцієнт лужності $(\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O})$ більший за 0,6 % (мас.)) в процесі гідратації та під час експлуатації мостових конструкцій відбувається реакція хімічної взаємодії луг цементу з кислотами заповнювачами, які за стандартами не повинні містити більше ніж 50 ммоль/л діоксиду кремнію розчинного в лугах (аморфного кремнезему) ДСТУ Б.В.2.6-145:2010.

За державним стандартом ДСТУ Б.В. 2.7-46:2010 в портландцементі співвідношення за масою кальцій оксиду до силіцій діоксиду повинно становити не менше ніж 2,0, а масова частка магній оксиду не повинна перевищувати 5 % (мас.), вміст сірки у перерахунок на SO_3 не повинен перевищувати 3,5 % (мас.), але бути більше ніж 1 % (мас.), глини не більше 1,2 % (мас.), вміст хлорид-іонів не повинен перевищувати 0,1 % (мас.).

Середній коефіцієнт приведеної лужності цементу непошкодженого бетону першого зразка становить 1,15 % (мас.), що у 1,9 рази перевищує нормативний показник, визначений ДСТУ Б.В.2.6-145:2010 (ГОСТ 31384:2008, NEQ). Результати досліджень наведено на рис. 2.

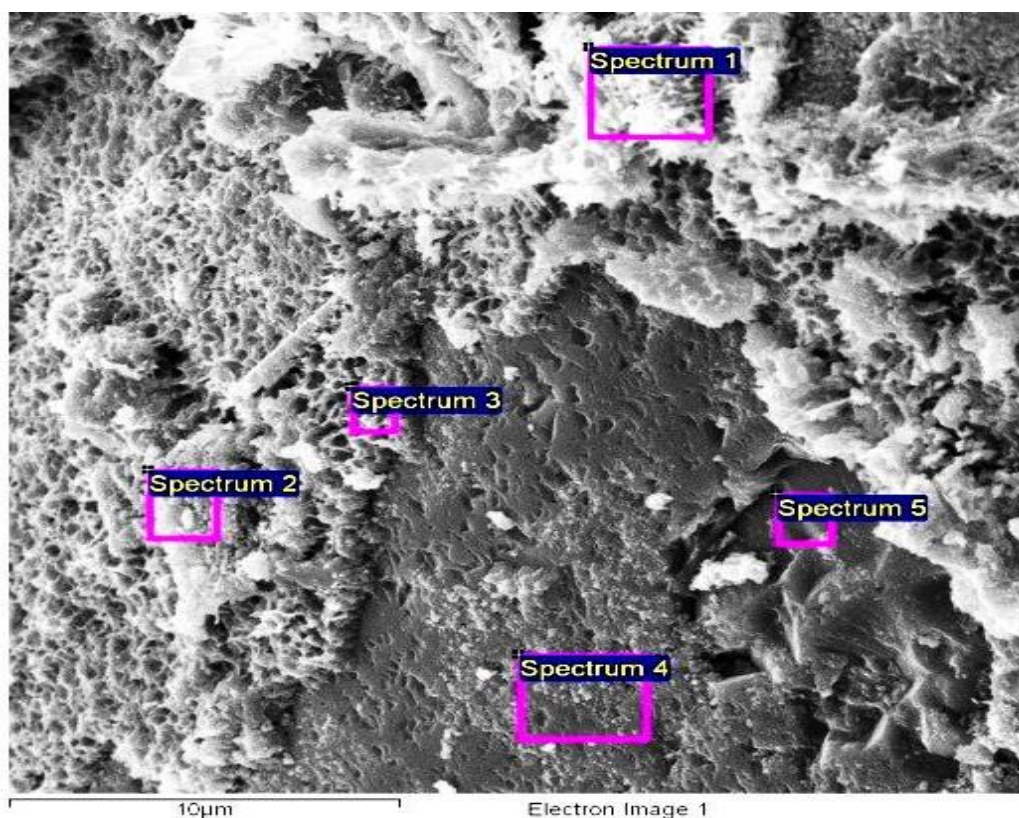
За розрахунками співвідношення оксиду кальцію до оксиду кремнію в першому дослідженому зразку складає 2,55, що задовольняє вимогам стандарту (рис. 2). Трикальцієвий алюмінат у складі цементу не повинен перевищувати 8 % за масою. У бетоні кількість трикальцієвого алюмінату складає 5,85 % (мас.). Кількість оксиду магнію дорівнює 0,17 % (мас.), що набагато менше граничної кількості у 5 % (мас.). Кількість глини дорівнює 6,6 % (мас.), що не задовольняє вимогам стандарту.

Середнє значення концентрації оксиду сірки складає 4,93 % (мас.). Має місце локальне підвищення концентрації її оксиду до 6,15 % (мас.), що значно перевищує нормативний показник у 3,5 % (мас.).

Крім того, значний відсоток вуглецю в структурі цементного каменю усіх зразків свідчить про його карбонізацію, що додатково знижує механічні характеристики бетону в конструкціях мосту. Але точність визначення концентрації вуглецю є дуже низькою і тому ретельний аналіз ступеню карбонізації не проводили. Із загальної практики використання бетону швидкість карбонізації складає 20 мм за 25 років. Для захисту бетону від карбонізації застосовують спеціальні добавки.

Другий зразок бетону був відібраний на ділянці пошкодженого бетону, що знаходився біля пішохідної частини мосту. Для зазначеного бетону характерно нормативне співвідношення оксидів кальцію та кремнію $k=7,02$, вміст оксиду сірки SO_3 0,62 % (мас.), глини 1,02 % (мас.), коефіцієнт приведеної лужності цементу 0,18 % (мас.), відсутність з'єднань магнію, але має місце наявність іонів фтору в кількості 0,71 % (мас.). Цей хімічний елемент називають отрутою для бетонів, бо він сприяє розм'якшенню цементного каменю та мінеральних гелів всередині бетону, разом із кремнієм та натрієм утворює гелеподібні і стрічкоподібні кристалічні структури, що руйнують бетон з середини протягом року.

Наступний зразок відібраний із тріщини на опорній конструкції мосту. Цементний камінь зазначеної ділянки бетону має нормативні показники співвідношення оксидів кальцію та кремнію 3,73, концентрація оксиду магнію дорівнює 0,28 % (мас.), концентрація трикальцієвого алюмінату дорівнює 1,47 % (мас.), оксиду сірки SO_3 0,21 % (мас.), глини – 0,75 % (мас.).



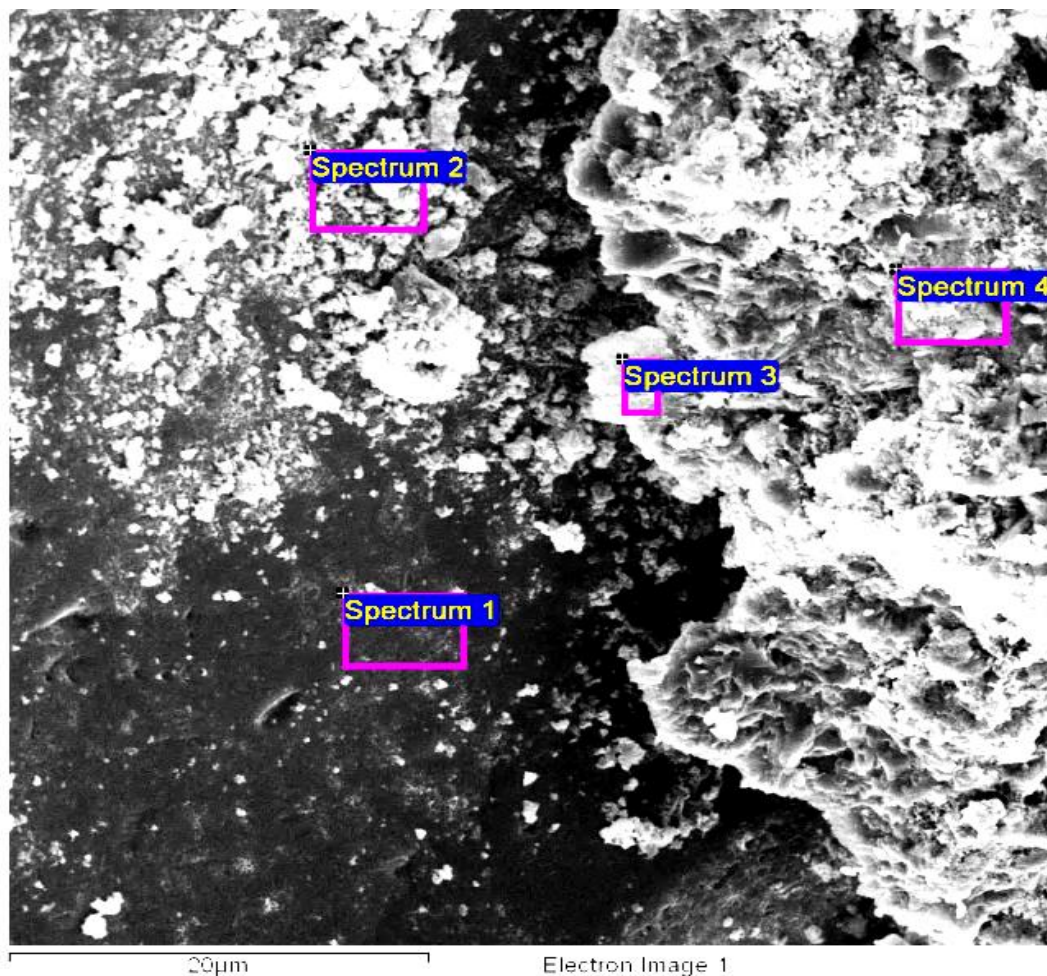
Spectrum	In stats.	C	O	F	Na	Al	Si	S	Ca	Total
Spectrum 1	Yes	16.40	52.93	1.21	0.20	0.81	5.94	0.46	22.04	100.00
Spectrum 2	Yes	16.96	54.47	1.37	0.00	0.54	4.10	0.38	22.17	100.00
Spectrum 3	Yes	18.40	52.36	0.98	0.14		7.86	0.41	19.85	100.00
Spectrum 4	Yes	11.03	57.92		0.00		29.27		1.77	100.00
Spectrum 5	Yes	9.54	57.13		0.00		31.95		1.38	100.00

Рисунок 2 – Мікроструктура та хімічний склад бетону, % (мас.), на границі цементний камінь–пісочна частка

Figure 2 – Microstructure and chemical composition of concrete, % (wt.), at the cement stone–sand particle boundary.

Середня приведена лужність бетону складає 1,7 %, що в 2,8 рази перевищує норму, до того ж в реакційній зоні приведена лужність складає 26,29 % (мас.), що в 43,82 рази перевищує нормативний показник і свідчить про активність корозійних процесів та неможливість їх припинення. До того ж бетон має середню концентрацію фтору 0,86 % (мас.) зі збільшенням концентрації в реакційній зоні до 1,04 % (мас.). Також він містить хлор із середньою концентрацією 0,13 % (мас.) і в реакційній зоні 0,21 % (мас.) (рис. 2). Усі зазначені галогени сприяють прискоренню процесу корозійного руйнування. І кінцевий термін втрати конструкції міцності не перевищує 1 рік від початку дії активаторів корозії - галогенів

На рис. 3 наведено межу пісочної частки з цементним каменем із кремнієвим гелем посередині, який демонструє процес корозії з продукуванням продукту реакції – мінеральним гелем.



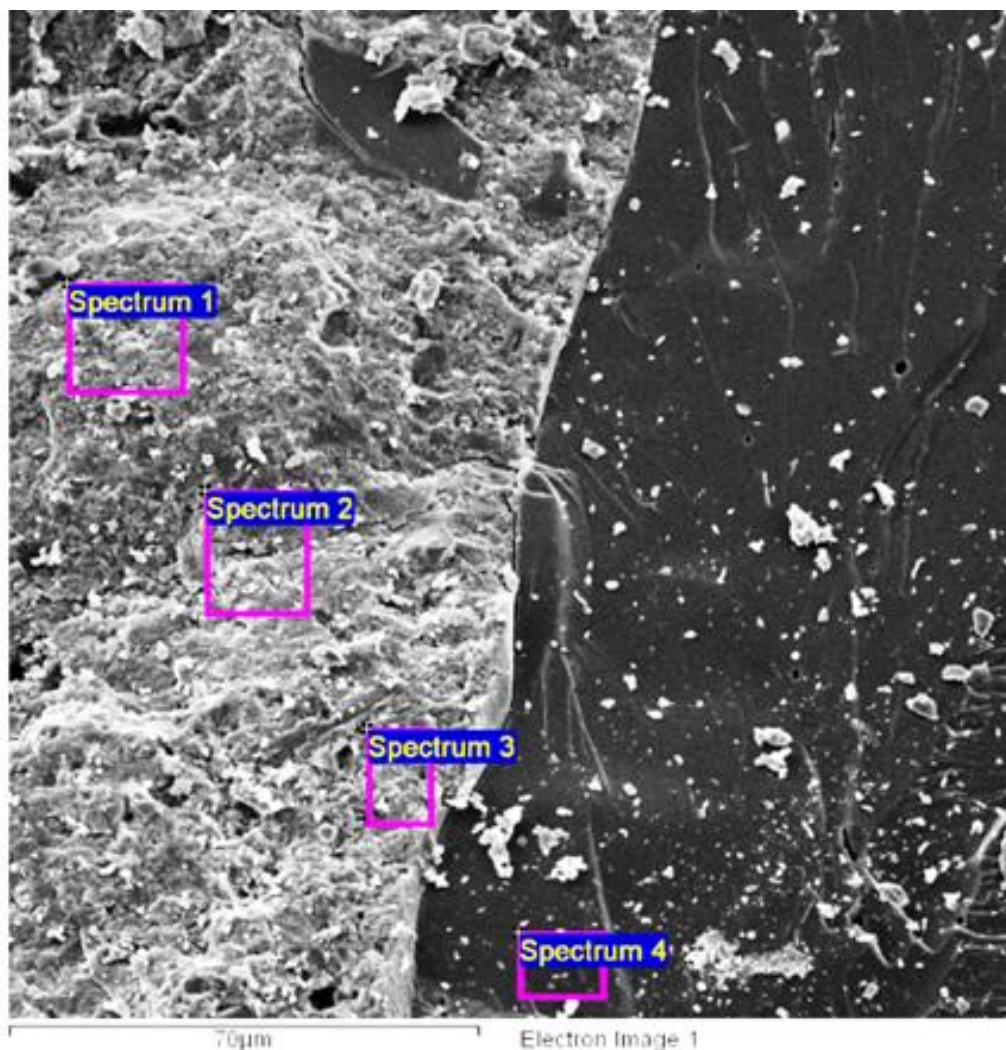
Spectrum	In stats.	C	O	F	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	10.10	56.46				32.51				0.92		100.0
Spectrum 2	Yes	15.99	53.63	1.48	0.23	1.04	23.49		0.47	0.52	3.15		100.0
Spectrum 3	Yes	16.09	54.76	1.08	0.99	6.00	10.29	0.33	1.47	0.85	8.13		100.0
Spectrum 4	Yes	17.17	55.37	1.02	0.44	1.65	4.94	0.30	0.64		16.41	2.07	100.0

Рисунок 3 – Мікроструктура та хімічний склад бетону, % (мас.), на границі цементний камінь/пісочна частка.

Figure 3 – Microstructure and chemical composition of concrete, % (wt.), at the cement stone/sand particle boundary.

У зоні тріщини підвищена кількість глини 10,96 % (мас.) та трикальцієвого алюмінату 8,5 % (мас.), а також значна концентрація галогенів фтору і хлору 1,19 % (мас.) і 0,86 % (мас.) відповідно.

Із зони непошкодженого бетону отримано наступний зразок для досліджень (рис. 4). Бетон має задовільне співвідношення оксидів кальцію та кремнію, що дорівнює $k=2,69$. Кількість триоксиду сірки дорівнює 1,22 % (мас), трикальцієвий алюмінат (6,11 % (мас.)) і кількість глини (1,2 % (мас.)) не виходять за рамки дозволених стандартом концентрацій.



Spectrum	In stats.	C	O	F	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Total
Spectrum 1	Yes	11.28	42.31		1.01	1.39	6.77	0.53	0.00	1.69	35.02	100.0
Spectrum 2	Yes	13.40	49.06		1.64	0.96	9.76	0.44	0.00		24.73	100.0
Spectrum 3	Yes	10.03	47.36	0.86	1.64	1.02	5.92	0.74	0.00		32.43	100.0
Spectrum 4	Yes	12.30	40.35				47.09	0.00	0.26			100.0

Рисунок 4 – Хімічний склад та мікроструктура структурних складових бетону на непошкодженій ділянці, % (мас.)

Figure 4 – Chemical composition and microstructure of structural components of concrete in the undamaged area, % (wt.)

Середня приведена лужність цементу перевищує нормативні показники в 10,88 раз і становить 6,53 % (мас.). Зазначені обставини у поєднанні з підвищеним вмістом галогенів в реакційній зоні

(фтору - 0,86 % (мас.), та хлору 0,26 % (мас.) дозволяють робити висновок про подальше інтенсивне корозійне руйнування бетону до втрати міцності протягом до одного року (рис.4).

Із проведених досліджень встановлено, що для попередження передчасного руйнування бетону інфраструктурних об'єктів необхідно: проводити моніторинг якості бетону існуючих конструкцій та під час будівництва нових об'єктів за експрес-методикою мікроструктурного аналізу за вимогами ДСТУ Б В. 2.6-145: 010. При цьому для наочного спостереження за швидкістю корозійних процесів пропонуємо встановити гіпсовий маяк на тріщину на опорній колонні мосту з боку тротуару.

З метою усунення активного впливу галогенів на структурні перетворення в бетоні, що експлуатується пропонуємо дослідити можливість використання менш агресивних речовин, що менше впливатимуть на корозійні процеси у бетоні і арматурі залізобетонних споруд, але ефективно будуть сприяти очищенню тротуарів та проїзної частини доріг від снігу.

Висновки. За результатами дослідження цементного каменю в конструкціях прогонової будови та опорної аркової колони мосту через р. Либідь по проспекту Повітряних сил України в м. Київ можна зробити наступні висновки:

1. Проведені в роботі дослідження показали невідповідність за реакційною спроможністю цементу та піску досліджуваного бетону вимогам стандартів України.

2. Прогонові та опорні конструкції мосту в яких проходить лужно-кремнієвокисла реакція необхідно міняти на нові. Так як, будь-які ремонтні матеріали, що можуть бути нанесені на масив бетону будуть розриватися з причини реструктуризаційних процесів в середині бетону.

3. Наявність підвищеної приведеної лужності цементу призводить до лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні, що експлуатується. Чим більш реакційно спроможний хімічний елемент знаходиться в бетоні, тим активніше проходить лужно-кремнієвокисла реакція, яка руйнує бетон з середини. Агресивними реагентами - каталізаторами лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні є речовини з вмістом галогенів.

4. Швидкість реакції корозії цементного каменю залежить від наявності агресивних реагентів всередині бетону.

5. У випадку дослідженого бетону необхідно відмітити, що поєднання підвищених концентрацій фтору та хлору сприяє максимальній швидкості зазначеної реакції. Реакція проходить з утворенням нових фаз із вторинного еtringіту, гелевих прошарків, які згодом кристалізуються. Питомий об'єм кристалів перевищує наявний внутрішній об'єм пористості і сприяє утворенню мікро- та згодом макротріщин в бетонній матриці, по-перше, по границях заповнювач-цементний камінь.

Перелік посилань

1. Zhang Y. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO₂ corrosion in ultra-high temperature sour gas wells Yihan Zhang, Mingbiao Xu, Jianjian Song, Chunli Wang, Xiaoliang Wang, Bahati Adnan Hamad Construction and building materials, Vol. 323, March 14, 2022, 125879 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125879>.

2. Cheng X.W. Study of interface structure during unidirectional corrosion of oil well cement in H₂S based on computed tomography technology XiaoWei Cheng, KaiYuan Mei, ZaoYuan Li, Xingguo Zhang, XiaoYang Guo Research in Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 55/Issue 41, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b02162>.

3. ДСТУ Б В. 2.6-145:2010 Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 31384-2008, (NEQ).

4. Пшінько О.М., Рунова Р.Ф. Рунова Р.Ф., Руденко І.І., Троян В.В. Роль добавок у зменшенні клінкерної складової під час виробництва товарних бетонних сумішей // М-ли 10-й Міжн. науково-практ. конф. «Дні сучасного бетону». – Запоріжжя: «Планета», 2008. – С. 45 – 59.

5. Рунова Р.Ф., Руденко І. І., Троян В. В. Аналіз факторів, що визначають властивості товарних бетонних сумішей // Матеріали 1-ї Міжнародної науково-практичної конференції «ТОВАРНИЙ БЕТОН — НОВІ МОЖЛИВОСТІ У БУДІВЕЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ». – Харків 2008. – С. 16-43.

6. Шейніч Л. О. Сучасні уявлення про корозію цементного каменю в бетоні під дією води Шейніч Л.О. Ю Колесник, К.К. Пушкарьова, Л.О. Шейніч Автошляховик України 2012 – № 4. – С. 33-37.
7. Рибкін В. В. Дослідження фізико-хімічних властивостей дрібних заповнювачів для виробництва залізобетонних шпал [Текст]/ В.В. Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О.Пшінько, В.П.Лисняк, Л.О.Яришкіна, С.В.Васильєва// Вісник ДНУЗТ Вип. 40 – Д.:В-во ДНУЗТ – С. 140-145.
8. Рибкін В. В. Дослідження експлуатаційної стійкості залізобетонних шпал та основні технологічні прийоми її покращення [Текст] / В.В.Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О.Пшінько, С.В.Коваленко, В.О.Яковлев // Будівництво України. № 4 - К. – 2011 – С.19-23.
9. Рибкін В. В. Деякі аспекти технологічних прийомів виробництва та контролю експлуатаційного ресурсу залізобетонних шпал в Україні та світі[Текст] / В.В.Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О. Пшінько, С.В.Коваленко, В.О.Яковлев// Залізничний транспорт України № 3/4 – К. – 2012 – С. 76-81.
- 10.ДСТУ ISO 3696:2003 Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння; (ISO 3696:1987, IDT).
- 11.ДСТУ Б EN12620:2013 Заповнювачі для бетону (EN12620:2002+A1:2008, IDT).
- 12.ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови.
- 13.ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загально-будівельного призначення. Технічні умови.
- 14.ДСТУ Б В.2.7-71 -98 (ГОСТ 8269.0-97) Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань.
- 15.ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови.
- 16.ДСТУ Б В.2.7-210:2010 Будівельні матеріали. Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови.
- 17.ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цементи. Частина 1 Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197-1:2011, IDT).
- 18.ДСТУ 9183:22 Цементи. Загальні технічні умови.
- 19.ДСТУ EN 197-2:2023 (EN 197-2:2020,IDT) Цемент Частина 2 Оцінювання та перевірка стабільності експлуатаційних характеристик.
- 20.ДСТУ 8858:2019 Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній Технічні умови.
- 21.ДСТУ Б В.2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови (ГОСТ 23732-79, MOD);
- 22.ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Конструкції будинків і споруд. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови.
- 23.ДСТУ Б.А 1.1-55-94 Природні піски для виробництва будівельних матеріалів Терміни та визначення.
- 24.ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови.
- 25.ДСТУ Б В.2.7-176:2008 Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови.
- 26.ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
- 27.ДСТУ Б В.2.7-224:2009 Бетони. Правила контролю міцності.
- 28.17. ДСТУ-Н Б А.1.1-83:2008 Система стандартизації та нормування у будівництві. Настанова. Керівний документ В щодо визначення контролю виробництва на підприємстві в технічних умовах на будівельні вироби.
- 29.ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008 Настанова щодо застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах.

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF CEMENT STONE CORROSION IN THE
EMERGENCY DESTRUCTION OF THE DECK STRUCTURE
OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE

Onyshchenko Artur, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Bridges and Tunnels
National Transport University Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-
mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, tel.: +380687771899, <http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Kovalenko Valentyna, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Institute for
Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine Omelyana Prytsaka (Kryzhizhanovskogo) str., 1, Kyiv,
Ukraine, 03142, e-mail: ykovdp@gmail.com, tel.: +380504890772, <https://orcid.org/0000-0002-1196-7730>

Rykovtsev, Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University,
Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-mail: rykovtsevoleksii@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0001-1715-6058>

Kovalchuk Vitalii, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Railway Transport Lviv
Polytechnic National University S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: kovalchuk.diit@gmail.com,
tel.: +380972237243, <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

Summary. The work is dedicated to conducting research on the condition of the bridge structures of
the Povitroflotsky Avenue bridge over the Lybid River in Kyiv. To achieve this, methods of rejected
assessment of reinforced concrete structures of the bridge deck, as well as express techniques of
microstructural, micro-X-ray spectroscopic, and fractographic analysis, were applied.

The aim of the work is to investigate and identify the causes of the emergency destruction of bridge
structures over the Lybid River.

Object of study: the deck structures of the bridge.

As a result of the research, it was found that in the concrete composition, at the boundary of the sand
aggregate and cement stone, there is an increased amount of alkaline metals and halogens, which exceeds the
requirements of national standards several times.

It was established that the average concentration of sulfur oxide is 4.93 % (by weight). There is a local
increase in the concentration of sulfur oxide to 6.15 % (by weight), which significantly exceeds the normative
value of 3.5% (by weight). In addition, a significant percentage of carbon in the structure of cement stone in
all samples indicates its carbonation, which further reduces the mechanical properties of the concrete in the
bridge structures.

To prevent cases of premature destruction of concrete in bridges, overpasses, and highways, it is
suggested to monitor the quality of concrete in existing structures and during the construction of new objects
using the express method of microstructural analysis. Additionally, to visually monitor the speed of corrosion
processes, a gypsum marker should be installed on a crack in the support column of the bridge from the side
of the sidewalk.

To eliminate the active impact of halogens on structural transformations in operating concrete, it is
recommended to investigate the possibility of using less aggressive substances that would have a smaller
impact on corrosion processes in concrete and reinforcement in reinforced concrete structures but effectively
contribute to cleaning sidewalks and roadways from snow.

Keywords: bridge deck structures, beam bridges, concrete, cement stone corrosion, microstructural
analysis, micro-X-ray spectroscopic analysis, alkaline-silica reaction, emergency destruction, concrete
durability forecasting.

References

1. Zhang Y. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with
CO₂ corrosion in ultra-high temperature sour gas wells Yihan Zhang, Mingbiao Xu, Jianjian Song, Chunli
Wang, Xiaoliang Wang, Bahati Adnan Hamad Construction and building materials, Vol. 323, March 14, 2022,
125879 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125879>.

2. Cheng X.W. Study of interface structure during unidirectional corrosion of oil well cement in H₂S based on computed tomography technology XiaoWei Cheng, KaiYuan Mei, ZaoYuan Li, Xingguo Zhang, XiaoYang Guo Research in Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 55/Issue 41, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b02162>.
3. DSTU B V. 2.6-145:2010 Konstruktsiyyi budynkiv i sporud. Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruktsiy vid koroziiyi. Zahalni tekhnichni vymohy (HOST 31384-2008, (NEQ).
4. Pshinko O.M., Runova R.F. Runova R.F., Rudenko Y.Y., Troyan V.V. Rol dobavok v umensheny klynkernoy sostavlyayushchey pry proyzvodstve tovarnykh betonnykh smesey// Mat. 10-y Mezhd. nauchno-prakt. konf. «Dny sovremennogo betona». – Zaporozhe: «Planeta», 2008. – s. 45 – 59.
5. Runova R.F., Rudenko Y.Y., Troyan V.V. Analiz faktorov, opredelyayushchykh svoystva tovarnykh betonnykh smesey// Materyaly 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyy «TOVARNY BETON — NOVYE VOZMOZHNOTY V STROYTEL'NYKH TEKHNOLOGIYAKH».- Kharkov 2008. - S.16-43.
6. Sheynich L.O. Suchasni uyavlennya pro koroziiyu tsementnoho kamenyu v betoni pid diyeyu vody Sheynich L.O. Yu Kolesnyk, KK Pushkarova, LO Sheynych Avtoshlyakhovyk Ukrayiny 2012 № 4, s. 33-37.
7. Rybkin V.V. Doslidzhennya fizyko-khimichnykh vlastyvostey dribnykh zapovnyuvachiv dlya vyrobnytstva zalizobetonnykh shpal [Tekst]/ V.V. Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O.Pshinko, V.P.Lysnyak, L.O.Yaryshkina, S.V.Vasylyeva// Visnyk DNUZT Vyp. 40 – D.:V-vo DNUZT – S. 140-145.
8. Rybkin V.V. Doslidzhennya ekspluatatsiynoyi stiykosti zalizobetonnykh shpal ta osnovni tekhnolohichni pryomy yi pokrashchennya [Tekst]/ V.V.Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O.Pshinko, S.V.Kovalenko, V.O.Yakovlyev//Budivnytstvo Ukrayiny. № 4 - K. – 2011 – S.19-23.
9. Rybkin V.V. Deyaki aspekty tekhnolohichnykh pryomiv vyrobnytstva ta kontrolyu ekspluatatsiynoho resursu zalizobetonnykh shpal v Ukrayini ta sviti[Tekst]/ V.V.Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O. Pshinko, S.V.Kovalenko, V.O.Yakovlyev// Zaliznychnyy transport Ukrayiny № 3/4 – K. – 2012 – S. 76-81.
- 10.DSTU ISO 3696:2003 Voda dlya zastosuvannya v laboratoriyakh. Vymohy ta metody perevirannya; (ISO 3696:1987, IDT).
- 11.DSTU B EN12620:2013 Zapovnyuvachi dlya betonu (EN12620:2002+A1:2008, IDT).
- 12.DSTU B V.2.7-32-95 Budivelni materialy. Pisok shchilnyy pryrodnyy dlya budivelnnykh materialiv, vyrobiv, konstruktsiy i robit. Tekhnichni umovy.
- 13.DSTU B V.2.7-46:2010 Budivelni materialy. Tsementy zahalno-budivelnnoho pryznachennya. Tekhnichni umovy.
- 14.DSTU B V.2.7-71 -98 (HOST 8269.0-97) Budivelni materialy. Shchebin i hraviy iz shchilnykh hirskeykh porid i vidkhodiv promyslovoho vyrobnytstva dlya budivelnnykh robit. Metody fizyko-mekhanichnykh vyprobuvan.
- 15.DSTU B V.2.7-75-98 Budivelni materialy. Shchebin i hraviy shchilni pryrodni dlya budivelnnykh materialiv, vyrobiv, konstruktsiy ta robit. Tekhnichni umovy.
- 16.DSTU B V.2.7-210:2010 Budivelni materialy. Pisok iz vidsiviv droblennya vyverzhennykh hirskeykh porid dlya budivelnnykh robit. Tekhnichni umovy.
- 17.DSTU B EN 197-1:2015 Tsementy. Chstyna 1 Sklad, tekhnichni umovy ta kryteriyi vidpovidnosti dlya zvy chaynykh tsementiv (EN 197-1:2011, IDT).
- 18.DSTU 9183:22 Tsementy. Zahalni tekhnichni umovy.
- 19.DSTU EN 197-2:2023 (EN 197-2:2020,IDT) Tsement Chastyna 2. Otsinyuvannya ta perevirka stabilnosti ekspluatatsiynykh kharakterystyk.
- 20.DSTU 8858:2019 Sumishi tsementobetonni dorozhni ta tsementobeton dorozhniy Tekhnichni umovy.
- 21.DSTU B V.2.7-273:2011 Voda dlya betoniv i rozchyniv. Tekhnichni umovy (HOST 23732-79, MOD).
- 22.DSTU B V.2.6-209:2016 Konstruktsiyyi budynkiv i sporud. Shpaly zalizobetonni poperedno napruzheni dlya zaliznyts koliyi 1520 i 1435 mm. Tekhnichni umovy.
- 23.DSTU B.A 1.1-55-94 Pryrodni pisky dlya vyrobnytstva budivelnnykh materialiv Terminy ta vyznachennya.

24.DSTU B V.2.7-171:2008 Budivelni materialy. Dobavky dlya betoniv i budivelnykh rozchyniv. Zahalni tekhnichni umovy.

25.DSTU B V.2.7-176:2008 Sumishi betonni ta beton. Zahalni tekhnichni umovy;

26.DSTU B V.2.7-214:2009 Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrolnymiy zrazkami.

27.DSTU B V.2.7-224:2009 Betony. Pravyla kontrolyu mitsnosti.

28. DSTU-N B A.1.1-83:2008 Systema standartyzatsiyi ta normuvannya u budivnytstvi. Nastanova. Kerivnyy dokument V shchodo vyznachennya kontrolyu vyrobnytstva na pidpryyemstvi v tekhnichnykh umovakh na budivelni vyroby.

29.DSTU-N B V.2.7-175:2008 Nastanova shchodo zastosuvannya khimichnykh dobavok u betonakh i budivelnykh rozchynakh. Pshinko O.M., Runova R.F., Rudenko I.I., Troyan V.V. The role of additives in reducing the clinker component in the production of ready-mix concrete mixes// Proc. of the 10th Int. scientific-practical. conf. "Days of modern concrete". - Zaporozhye: "Planeta", 2008. - pp. 45 - 59.

Дата надходження до редакції 17.09.2025