

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.072.2/.7-027.45

В. В. КОВАЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. ЗАЯЦЬ², С. В. КОВАЛЕНКО³

^{1*}Кафедра «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, ел. пошта kovalenkovv@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

²Кафедра «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 3731581, ел. пошта zyl41@ukr.net

³ПП «Логія», вул. Червона, 19-А, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 340 01 76, ел. пошта logiya2015@ukr.net

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета. Попередження передчасного руйнування мостових конструкцій. **Методика.** В роботі застосовані макроструктурний, фрактографічний, аналітичний аналізи, методи фізико-механічних випробувань зразків бетону. **Результати.** В роботі предметом дослідження є не тільки структурний стан та властивості бетону мостових конструкцій, а й фізико-хімічні властивості сировинних матеріалів. Проведені дослідження передчасно зруйнованих балок мостових плитного типу показали: 1) невідповідність сировинних матеріалів: піску, щебеню та цементу вимогам стандартів; 2) наявність у хімічному складі води затворювання великої кількості карбонатних та гідрокарбонатних комплексів; 3) невідповідність вимогам сучасної технології методів та технічного регламенту виробництва в цеху мостових конструкцій заводу, що належить ПАТ «Укрзалізниця». Інноваційна технологія виробництва бетону мостових конструкцій дозволить попередити їх передчасне руйнування. **Наукова новизна.** В роботі застосовано комплексний аналітичний і технічний підхід до виявлення причин передчасного руйнування балок мостових плитного типу. Оцінено максимальну кількість факторів, які могли вплинути на їх передчасне руйнування. Показано, що сукупність факторів, які негативно вплинули на структурні характеристики бетону балок мостових плитного типу була значно поглиблена наявністю ефективних каталізаторів руйнівних процесів. Упровадження додаткових до українських стандартів вимог випробувань мікроструктурних характеристик щойно виготовленого бетону мостових конструкцій дозволить на ранніх стадіях виявити небезпечні фактори та спрогнозувати строк служби мостових конструкцій. **Практична значимість.** Дослідження фізико-механічних властивостей зразків бетону, виготовленого за новітніми технологіями підтвердили їх високу якість. Складність контролю хімічного складу сировинних матеріалів значно спрощується шляхом дослідження структурних параметрів цементного каменю готових виробів. Доведено необхідність впровадження інноваційної технології виробництва бетону та залізобетону мостових конструкцій.

Ключові слова: бетон; балки мостові плитного типу; сировинні матеріали; передчасне руйнування; технологія виробництва; механічні характеристики

Вступ

Попередження передчасних руйнувань залізобетонних мостових конструкцій є пріоритетним завданням для інженерного будівництва нашої країни [1-5, 23-26]. Однак це завдання не можна вирішити базуючись лише на декількох дуже обмежених критеріях. Так, наприклад, сучасні заповнювачі для бетону, особливо пісок, мають підвищену реакційну спроможність. Зміна сировинної бази у бік використання більш лужної сировини при виробництві цементу значно збільшує ризик виникнення корозії бетону. Понаднормова кількість пиловидних та глинистих часток в заповнювачах бетонної су-

міші також викликає передчасні руйнівні процеси в бетоні. Однак, що не найбільшою проблемою виробництва є відсутність контролю структурних параметрів цементного каменю щойно виготовленого бетону. Так, наприклад, формування у пересиченому вологою цементі крупних кристалів цементного каменю сприяє протягом одного-п'яти років експлуатації реструктуризації первинних цементних кристалів з кристалізацією структур вторинного еtringіту та таумаситу [27]. Ці структурні складові різняться у декілька разів за питомим об'ємом із первинними кристалами та сприяють деформу-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ванню мостових балок плитного типу, корозії бетону [27].

Пропоновані Дніпропетровським національним університетом експрес-методики випробувань лужності цементу, концентрацій оксидів основних елементів в цементі та цементному камені, виявлення його морфологічних та хімічних особливостей дозволить прогнозувати довговічність залізобетонних конструкцій на початковому етапі їх виготовлення [2, 5, 25]. Такі випробування ДНУЗТ пропонує проводити за лічені хвилини на відмінність від методик майже єдиної в Україні акредитованої лабораторії у м. Харків, яка вимагає на проведення випробувань хімічного складу цементу не менше тижня.

Попередні випробування сировинних матеріалів в рамках передбаченого стандартами вхідного контролю [6-11, 14, 21], в огляді на високі темпи виробництва, робити надзвичайно важко, а іноді неможливо у разі обмеженої кількості та віддаленості від виробництва відповідних акредитованих лабораторій. Однак, можлива та необхідна для вчасного надання рекомендацій постачальникам сировинних матеріалів, у разі використання неякісної сировини, організація контролю структури цементного каменю, що надасть необхідні відомості про реакційну спроможність складових бетону, а також прогноз довговічності конструкцій. Методика запатентована ДНУЗТ ще в 2009 році.

Спираючись на власних дослідженнях кислотності українських пісків [4, 25], можна зробити висновок, що у більшій їх частині вони мають кислотність понад 50 ммоль/л. Таким чином, для запобігання корозії цементного каменю необхідні інноваційні підходи до виробництва бетону та залізобетону мостових конструкцій. Такі підходи Університет пропонує ПАТ «Укрзалізниця». На ряду з контролем структурних параметрів цементного каменю Університет пропонує технологію виробництва бетону на базі застосування сучасної будівельної хімії українських виробників.

Мета

Робота спрямована на виявлення причин передчасного руйнування балок мостових плитного типу та попередження передчасних руйнувань шляхом впровадження експрес методи-

ки аналізу структур цементного каменю в щойно виготовленому бетоні мостових конструкцій.

Об'єктом дослідження є бетон передчасно зруйнованих балок мостових плитного типу, технологія виготовлення бетону для мостових конструкцій, фізико-механічні властивості цього бетону.

Методика

У роботі застосовано макроскопічні, фрактографічні методи дослідження структури зломів бетону, аналітичні дослідження технічної документації українських та європейських стандартів [6-22].

Результати

Балки мостові плитного типу належать до найбільш навантаженої та вартісної частини конструкцій мостів.

У процесі роботи балки мостові плитного типу залізничних мостів навантажуються максимальними силами тиску вантажних локомотивів та навантажених вагонів, а також силами інерції поїздів, що рухаються. Ці сили викликають значні циклічні напруження вигину, внаслідок чого балки зазнають змінного навантаження, що може викликати мікро-розтріскування бетону, який не розрахований на напруження розтягу. Тому балки мостові плитного типу повинні мати високу міцність на стискання, жорсткість, зносостійкість поверхонь, і високі характеристики міцності на вигін. Необхідно відмітити, що максимальні навантаження на вигін (майже у 2 рази вищі ніж у звичайних бетонів) мають лише бетони з наноструктурованим цементним каменем.

Дослідження пошкоджених корозією балок мостових плитного типу проводили в Харківській області. Загальний вид пошкоджень наведено на рисунку 1. Як видно з рис. 1 (а, г, д), на поверхні бетону є сліди білої рідини – імовірно, так званого кальцієвого молочка. Всередині масиву бетону спостерігаються вологі грудки речовини жовтого кольору (рис. 1, б), з яких, у тому числі, інтенсивно вичавлюється на поверхню бетону балок мостових плитного типу гель жовтого кольору (рис. 1, е). На бетоні балок мостових плитного типу спостерігаються так звані «пухирці», при сколюванні поверхні яких

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

виявляються частки імовірно вапна, в діаметрі від 1 до 5 мм. Надалі припущення будуть експериментально перевірені.

а)



г)



б)



д)



в)



е)



Рис. 1. Загальний вигляд передчасно зруйнованих балок мостових плитного типу, що розташовані на ремонтно-виробничій базі виробничого підрозділу «Харківського будівельного поїзду» на ст. Нова Баварія регіональної філії «Південна залізниця»

Наявність вище згаданих дефектів, ілюстрованих на рис 1, викликало необхідність виявлення причин передчасного руйнування ненавантажених балок мостових плитного типу. Відбір зразків для мікроструктурного та хімічного аналізів було зроблено з представниками Південної залізниці, мостозагону, виробника та фахівців ДНУЗТ.

дбір зразків для мікроструктурного та хімічного аналізів було зроблено з представниками Південної залізниці, мостозагону, виробника та фахівців ДНУЗТ.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Результати досліджень показали, що при виробництві бетону використовувалися сировинні матеріали незадовільної якості. Крім того, технологія виробництва бетону з причини застарілості не змогла скасувати недоліки сировини та призвела до руйнування конструкцій протягом одного року зберігання на складі.

Випробування бетону у зрілому віці показали 60 МПа міцності на стискання.

Макроструктурний аналіз бетону балок мостових плитного типу показав, що бетонна суміш була неякісно укладена (рис.1, а, е) в результаті недостатньої її пластичності.

Утворення великих пор (рис.1, а, е) є наслідком перенасиченості бетонної суміші водою затворювання.

Наявність глибоких отворів в бетоні від щелебених часток вказує на погану адгезію щебеню до цементного каменя, що є наслідком підвищеної запиленості щебеню або наслідком проникнення продукту лужно-кремнієвокислої реакції до міжчасткових границь щебеню та кристалів цементного каменя (рис. 1, е).

Утворення імовірно «кальцієвого молочка» на поверхні бетонної конструкції вказує на підвищену пористість бетону, яка сприяє вимиванню з нього кальцієвих сполук (рис. 1, г). Подальші дослідження виявлять істинний хімічний склад білої рідини.

Виділення кремнієвого гелю з бетону (рис. 1, е) обумовлено, по-перше, його великою кількістю в структурі бетону, по-друге, утворенню сприятливих умов для його розрідження, тобто підвищення його текучості, по-третє, наявністю макро- та мікропористості в бетоні для виведення гелю з області високого тиску в середині бетонного масиву на його поверхню і четверте - регулярним продукуванням означеного гелю бетонним масивом.

Таким чином, усі представлені на рис. 1 дефекти є результатом недосконалості технологі-

чних прийомів виробництва балок мостових плитного типу.

Дослідження якості сировинних матеріалів для виробництва бетону балок мостових плитного типу проводили згідно чинного законодавства в сфері будівництва за ДСТУ [6-21].

Визначення фракційного складу, морфології та хімічного складу цементу, окремих піщаних часток, цементного каменя та продуктів лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні балок мостових плитного типу проводили з використанням методів електронної мікроскопії. Результати кількісного аналізу вмісту хімічних елементів, та особливо, співвідношень концентрацій хімічних елементів в структурних складових на плоских поверхнях речовин (наприклад кремнієвого гелю) та кристалах цементного каменя у високому вакуумі дозволяють виявляти кількість хімічних елементів з точністю до 0,01-0,01 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.

Дослідження проводились на скануючому електронному мікроскопі з напругою, яка прискорює, у 10 кВ.

Послідовне сканування областей запресованого цементного порошку за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізатора, з загальною площиною області дослідження 4 мм², дозволило отримати коректні дані про хімічний склад. Запресований зразок цементу виробництва ПрАТ «Волинь цемент» ПЦ І-500Н поміщали в камеру мікроскопу, відкачували атмосферу до отримання глибокого вакууму до 10⁵ Па та проводили мікрорентгеноспектральний аналіз. Результати аналізу наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад цементу, площина сканування 4 мм², % (мас.)

C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
3,87	38,7	0,28	0,35	2,24	7,47	2,64	0,00	1,01	40,74	2,73

Від відповідності характеристик цементу нормам стандарту ДСТУ Б. В 2.7-46:2010 [9] залежить структуроутворення цементного ка-

меня, фізико-механічні характеристики та довговічність залізобетонних виробів. При підвищеній лужності цементу (відносний коефіцієнт

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

лужності ($\text{Na}_2\text{O}+0,658 \text{ K}_2\text{O}$) більшої за 0,6 % (мас.) [7]) в процесі гідратації та під час експлуатації залізобетонних підрейкових основ та інших інфраструктурних конструкцій та споруд відбувається реакція хімічної взаємодії луг цементу з кислими заповнювачами [7].

За державним стандартом [9] в портландцементі співвідношення за масою кальцій оксиду до силіцій діоксиду повинно становити не менше ніж 2,0, а масова частка оксиду магнію не повинна перевищувати 5 %, вміст сірки у перерахунку на SO_3 не повинен перевищувати 3,5 %, але бути більше ніж 1 % (мас.), глини має бути не більше 1,2 % (мас.), вміст хлорид-іонів не повинен перевищувати 0,1 % (мас.). Трикальцієвий алюмінат у складі цементу не повинен перевищувати 8 % за масою.

Розрахунки вмісту нормованих елементів за концентрацією їх оксидів показали наступні результати. Вміст хлор-іонів не перевищує розмірів середньоквадратичної похибки експерименту та наближається до 0. Середнє співвідношення оксидів кальцію до оксидів кремнію ($k=3,57$) гарантовано задовольняє вимогам діючого стандарту, теж можна сказати про вміст оксиду магнію (середн. конц. MgO дорівнює 0,58 % (мас.)). Розрахунок середніх значень приведенного коефіцієнту лужності цементу, концентрацій алюмінатних з'єднань у перерахунок на Al_2O_3 , концентрації сірки у перераху-

нок на SO_3 показав, що вони не задовольняють вимогам діючого стандарту [9]. Так, наприклад, середнє значення концентрацій оксидів алюмінію та сірки складають 8,46 та 6,59 відсотків масових. Відповідно вміст оксиду сірки перевищує максимальний нормативний показник у 1,88 рази, оксиду алюмінію на 5,8 %.

Середній коефіцієнт приведенної лужності цементу становить 3,18 %, що у 5,3 рази перевищує нормативний показник, визначений ДСТУ [11].

Вміст оксидів сірки в цементних частках розмірами 25-48 мкм досягає від 36 до 41,34 % (мас.), що додатково сприяє сульфатній корозії бетону.

Вміст алюмінатної фази в частках цементу розміром близько 22 мкм досягає 10,43-33,07 % (мас.).

В достатньо великих цементних частках розміром близько 35 мкм підвищена концентрація атомів хлору – 0,13 % (мас.) може ініціювати та пришвидшувати лужно-кремнієвокислу реакцію та реструктуризацію в цементному камені зрілого віку.

В роботі досліджено сольовий склад води, що добувається з підземного верхнього водяного горизонту для виробничих процесів на Старокостянтинівському заводі ЗБШ. Результат випробувань наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад води затворювання для виробництва залізобетону на філії ПАТ Укрзалізниця «Старокостянтинівський завод ЗБШ»

Показник	Норматив на питну воду, для орієнтування її якості	Результат досліджень
Загальний вміст солей, мг/л	1000	412
Жорсткість загальна, мекв/л	7	3,5
Амоній сольовий, мг/л	0,5	0,17
Залізо, мг/л	0,3	-
Хлориди, мг/л	350	15,9
Сульфати, мг/л	500	34,95
Фосфати, мг/л	3,5	3,86
pH	6-9	6,76
Нітриди, мг/л	1,0	-
Нітрати, мг/л	45,0	-
Фториди, мг/л	0,7-1,5	0,19
Гідрокарбонати, мг/л		390,4
Карбонати, мг/л		192

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

З табл. 2 видно, що основний склад сольової частини води складають гідрокарбонати та карбонати натрію та калію, що підтверджує показник рН. Вода є доволі м'яка, але велика концентрація лужних металів сприятиме ініціюванню та пришвидшенню лужнокремнієвокислої реакції в бетоні. До того ж іони карбонової кислоти та іони лужних металів легко проникають в будь які матеріали, у тому числі в цементний камінь, та при зміні температур в критичних областях (в області 0° С, та температур структурних перетворень) карбонат іони не встигають виходити з їх складу при охолодженні та викликають додаткові внутрішні напруження в цементних кристалах, які також можуть їх руйнувати.

Реакційну спроможність піску та щебеню досліджено за стандартними методиками у відповідність с ДСТУ Б В.2.7-75-98 [11], визначали хімічними методами за ГОСТ 8269.0-97.

Методи засновані на визначенні вмісту в щебенях і піску реакційноспроможного кремнезему, розчинного в 1М розчині гідроксиду натрію. Вміст розчинного в лугах кремнезему визначають ваговим або фотокolorиметричним методом.

Щебінь і пісок вважають не реакційноспроможними стосовно лугів і придатними до використання в якості заповнювача для бетонів, якщо вміст у них розчинного кремнезему не перевищує 50 ммоль/л.

Значення концентрації кремнію розчинного лугах наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Середній вміст розчинного кремнезему SiO₂ в заповнювачах бетону

Найменування матеріалу	Пісок	Щебінь
Вміст розчинного кремнезему SiO ₂ , ммоль/л	132,5	0,2

В табл. 4 наведено результати розсіву піску Горинь-Крупецького родовища ВКПП «Явір-Транс».

Модуль крупності піску складає 2,14, зерновий склад задовольняє вимогам ДСТУ [8].

Дослідження розмірів часток щебеню та наявності в них великих кристалів слюди, які знижують як міцності характеристики матеріалу (утворення великої доли щебеню ліщадної та голкоподібної форми), так і адгезивні властивості цементного розчину при формуванні бетонної суміші, проводилося за нормами ДСТУ [11]. За означеним стандартом мінімальний розмір часток фракції повинен складати від 90 до 100 %, 0,5(d+D) – від 30 до 80 %, максимальний розмір D – до 10 %, фракція розмірів 1,25 D не повинна перевищувати 0,5 %.

Результати розсіву щебеню фракції 5-25 ВП Самчинецького кар'єру Філії ЦУП ПАТ «Укрзалізниця» наведено в табл. 5.

Таблиця 4

Результати розсіву піску Горинь-Крупецького родовища ВКПП «Явір-Транс»

Залишки	Розмір сит, мм							Пройшло скрізь сито 0,16, в %
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Часткові, г	0	220	1,10	8,30	231,00	475,00	9,10	9,60
Часткові, %	0	0	1,11	8,41	23,4	48,13	9,22	9,73
Повні, %	0	-	1,11	9,52	32,92	81,05	90,27	100

Таблиця 5

Результати розсіву щебеню фракції 5-25 ВП Самчинецького кар'єру Філії ЦУП ПАТ «Укрзалізниця»

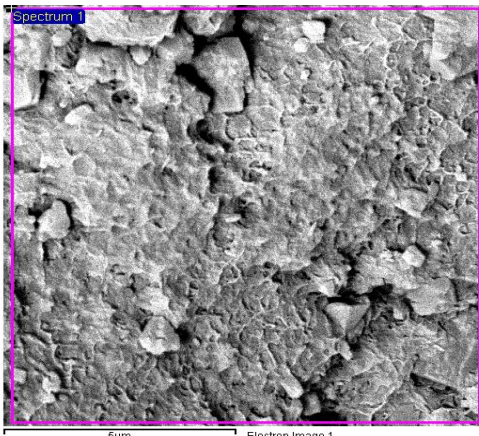
Залишки	Розмір сит, мм					Пройшло скрізь сито 0,16, в %
	25	20	10	5	0,16	
Часткові, г	-	2125	4350	275	13	-
Часткові, %	-	31,42	64,32	4,07	0,19	-
Повні, %	-	31,42	95,62	99,81	100	-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$d(5) = 99,81\%$; $0,5(5+20) = 65,615\%$; $D(20) = 31,42\%$; $1,25 D = 0$

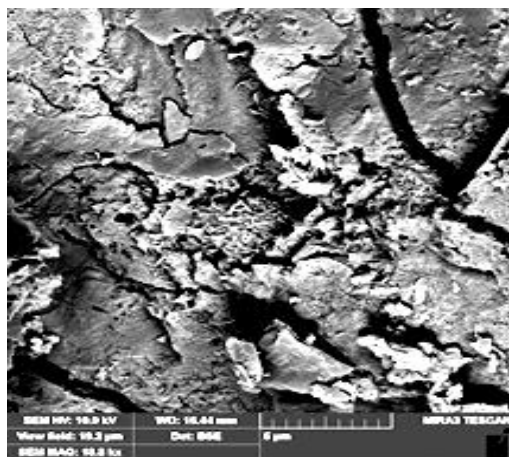
Виходячи з результатів розсіву щебінь Самчинецького кар'єру фракції 5-25 відповідає нормам ДСТУ [11], (см. табл. 5) Розмір кристалів слюди має до 30 мм в діаметрі.

Структура та хімічний склад цементного каменю на поверхні бетонного масиву мостових балок має подібний склад з таким у середині бетону (рис. 2, 3). В структурі присутні еtringітоподібні кристали, наявна значна пористість.



Spec trum	C	O	F	Na	Al	Si	Cl	K	Ca
1	23.65	40.41	0.28	0.11	0.28	1.45	0.38	0.26	33.17

Рис. 2. Мікроструктура та хімічний склад цементного каменю на поверхні бетону мостових балок плитного типу



Spec trum	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca
1	27.72	54.66	1.13	1.68	0.10	0.46	8.07	0.21	2.16	3.81

Рис.3. Мікроструктура цементного каменю в середині бетонного масиву мостових балок

Присутність активних елементів хлору, фтору в цементному камені та активних карбонатних сполук у воді дозволяє зробити висновок про високу активність реструктуризаційних процесів в бетоні, що досліджується. Також в структурі цементного каменю бетону присутні кристалічні новоутворення, схожі на еtringіт вторинний, що містить підвищену кількість каталізаторів реструктуризації. Інтенсивне його утворення відбувалося при температурі біля $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та спричинило вигін балки мостової плитного типу із стрілою прогину до декількох сантиметрів з випуклою стороною спрямованою на світловий потік від сонця.

Макроструктурний аналіз руйнування залізобетонних шпал показав наявність наскрізних тріщин, які проходять по цементному каменю та по межах часток щебеню і піску з цементними кристалами.

На поверхні бетону мостових балок є виділення кальцієвого молочка, кремнієвого гелю.

Структура та хімічний склад середньої частини цементного каменю бетону шпал, де є мінімальний вплив оточуючого середовища показав як наявність крупних еtringітних кристалів, схильних до реструктуризації, так і присутність продуктів лужнокремнієвокислої реакції навколо аморфних або тих, що містять аморфний кремнезем, пісочних часток.

Резюмуючи результати досліджень можна стверджувати, що:

1. Приведений коефіцієнт лужності цементу перевищує нормативний показник $0,6\%$ (мас.), визначений ДСТУ [7], в 5,3 рази та становить $3,18\%$. В максимальних за розмірами частках цементу близько $67\text{ }\mu\text{m}$ коефіцієнт приведеної лужності збільшується до $4,9\%$ (мас.), що у 8,17 раз перевищує максимальний показник за ДСТУ [7].

2. Вміст оксиду сірки в цементі складає $6,59\%$ відсотків масових, що перевищує максимальний нормативний показник у 1,88 рази. Сірка входить у склад великих еtringітних кристалів, які на основі щільної матриці рівноважних цементних кристалів знижують структурну однорідність та сприяють утворенню додаткової мікропористості, яка полегшує всмоктування вологи бетоном з атмосферного повітря. Вміст оксидів сірки в цементних частках розмірами $25\text{--}48\text{ }\mu\text{m}$ досягає від 36 до $41,34\%$ (мас.), що

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

додатково сприяє сульфатній корозії бетону під час розчинення означених часток в процесі експлуатації бетонних виробів.

3. Вміст алюмінатної фази в цементі складає 8,46 % (мас.), але в частках цементу розміром близько 22 мкм досягає 10,43-33,07 % (мас.) Подібна концентрація алюмінатної фази в цементі сприяє разом з підвищеним вмістом оксидів сірки утворенню підвищеної пористості та структурним перетворенням в процесі експлуатації бетонних виробів.

4. Наявність хлору в окремих цементних частках сприяє пришвидшенню усіх реструктуризаційних процесів в цементному камені.

5. В сертифікаті якості даного цементу вказано єдиний з тих, що досліджено показник, а саме: вміст СЗА в клінкері. В сертифікаті цей показник не перевищує 8 відсотків.

6. Дослідження хімічного складу води затворювання для бетонної суміші для виробництва бетону балок мостових плитного типу показує, що основа сольового вмісту води складають карбонатні та гідрокарбонатні сполуки, які сприяють підвищенню активності реструктуризаційних процесів в цементному камені бетону.

7. Запиленість щебеню не забезпечує надійної його адгезії до цементного каменю.

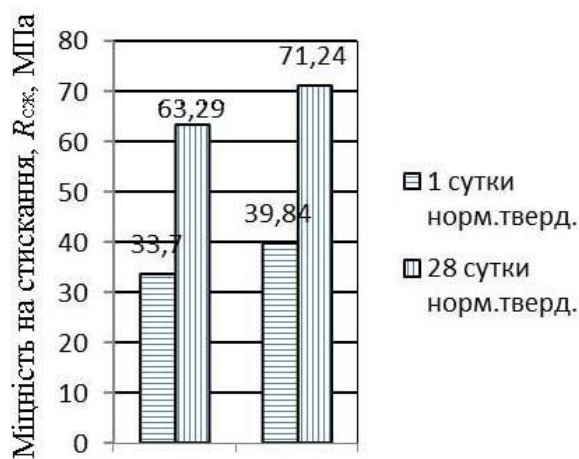
8. Жорсткість бетонної суміші не дозволяє ефективно проводити укладання форм для балок мостових плитного типу.

9. Термоволога обробка бетону прискорює та провокує реструктуризаційні процеси в бетоні балок.

Виходячи з встановлених причин руйнування автори розробили технологію виготовлення бетону із зниженою кількістю цементу (370 кг/м^3 бетону) на основі застосування вітчизняної добавки для бетонів ПЛКП виробництва ПП «Логія». Вплив означеної добавки у порівнянні із добавкою Sika viscocrete дозволив отримати підвищену міцність як на початковій стадії тужавіння так і на кінцевої (рис. 4).

Вітчизняна добавка дозволяє при температурі термовологої обробки $43 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 8 годин отримати відпускну міцність, яка на 18,2 % перевищує отриману з додаванням імпоротної добавки та кінцеву міцність, яка на 36 % перевищує нормативну.

Пропонована технологія дозволяє формувати сприятливу мікроструктуру цементного каменю близьку до наноструктурованої та отримувати підвищені характеристики міцності і завдяки зниженню кількості цементу – підвищену довговічність.



Sika Viscocrete ПЛКП 121
ТВО 8 ч.=33,7 МПа ТВО 8 ч.=39,84 МПа

Рис. 4. Вплив хімічних добавок для бетону на жорстких сумішах на його ранню і кінцеву міцність

Наукова новизна та практична значимість

Науковою новизною даної роботи є застосування нової експрес-методики для виявлення небезпечних характеристик сировинних матеріалів та щойно виготовленого бетону.

Для попередження передчасних руйнувань пропонується застосування нової технології виготовлення бетону, яка економить ресурси та дозволяє отримувати більш якісний бетон.

Висновки

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Причиною передчасних руйнувань балок мостових плитного типу є невідповідна діючим стандартам якість сировинних матеріалів та застаріла технологія виготовлення.

2. В сучасних умовах українського виробництва мостових конструкцій та іншого залізобетону єдиним способом попередження передчасних руйнувань є застосування нової ресурсозаощадної технології з використанням хімічних добавок українських виробників, які

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

створюються спеціально для кожного окремого виробництва та враховують усі його особливості. Пропоновані добавки до бетонів не поступаються, а навіть перевищують властивості закордонних добавок для українських цементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бутт, Ю. М. Химическая технология вяжущих материалов [Текст] / Ю. М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев. – Москва : Высшая школа. – 1980. – 237 с.
2. 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, та інші. // *Залізничний транспорт України*, № 3/4. – Київ : – 2012. – С. 76-81.
3. Дослідження структури і властивостей мінеральних добавок для бетонів та будівельних розчинів [Текст] / В. Коваленко, С. Коваленко, А. Вовк, Ю. Заяць // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. – 2012. Вип. 1. – С. 28-32.
4. Дослідження фізико-хімічних властивостей дрібних заповнювачів для виробництва залізобетонних шпал [Текст] / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, та інші. // *Вісник ДНУЗТ*. – 2012. Вип. 40 – С. 140-145.
5. Дослідження експлуатаційної стійкості залізобетонних шпал та основні технологічні прийоми її покращення [Текст] / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, та інші. // *Будівництво України*. – 2011. Вип. 4. – С. 19-23.
6. ДСТУ Б.А 1.1-55-94. Природні піски для виробництва будівельних матеріалів. Терміни та визначення [Текст]. – Надано чинності 1995-01-01. – Київ : 1994. – 22 с.
7. 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) [Текст]. Надано чинності 2011-11-12. – Київ : 2010. – 77 с.
8. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови [Текст]. – Надано чинності 1996-01-01. Київ : 1995. – 10 с.
9. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загально-будівельного призначення. Технічні умови [Текст]. Надано чинності 2011-09-01. – Київ, 2010. – 14 с.
10. 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 [Текст]. – Надано чинності 1999-01-01. – Київ, 1998. – 13 с.
11. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови [Текст]. Надано чинності 1999-01-01. – Київ, 1998. – 14 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-171:2008. Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови [Текст]. – Надано чинності 2010-01-04. – Київ, 2008. – 62 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови [Текст]. – Надано чинності 2010-01-04. – Київ, 2008. – 109 с.
14. ДСТУ Б В.2.7-210:2010. Будівельні матеріали. Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови [Текст]. – Надано чинності 2011-08-01. – Київ, 2010. – 20 с.
15. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками [Текст]. – Надано чинності 2010-09-01. – Київ, 2009. – 43 с.
16. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Бетони. Правила контролю міцності [Текст]. – Надано чинності 2010-09-01. – Київ, 2009. – 23 с.
17. ДСТУ Б В.2.7-273:2011. Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови (ГОСТ 23732-79, MOD) [Текст]. – Надано чинності 2012-01-12. Київ, 2011. – 4 с.
18. 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 [Текст]. – Надано чинності 2009-01-01. – Київ, 2008. – 0 с.
19. ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008. Настанова щодо застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах [Текст]. – Надано чинності 2010-04-01. – Київ, 2008. – 31 с.
20. ДСТУ ISO 3696:2003. Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння; (ISO 3696:1987, IDT) [Текст]. – Надано чинності 2004-07-01. – Київ, 2003. – 8 с.
21. ДСТУ Б EN12620:2013. Заповнювачі для бетону (EN12620:2002+A1:2008, IDT) [Текст]. – Надано чинності 2014-10-01. – Київ, 2013. – 61 с.
22. EN 1504 Матеріали і системи для ремонту і захисту бетонних конструкцій [Текст]. Женева, 2009. – 105 с.
23. Кузнецова, Т. В. Алюминатные и сульфатные цементы [Текст] / Т. В. Кузнецова. – Москва : Стройиздат. – 1986. – 208 с.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

24. Полинг, Л. Химия [Текст] / Л. Полинг, П. Полинг; перевод М. В. Сахарова, ред. М. Л. Карапетьянц. – Москва. – 1978. – 354 с.
25. Проведення досліджень по встановленню причин руйнування залізобетонних шпал та розробка рекомендацій по підвищенню міцності бетону [Текст] : звіт (заключний) госпдоговір № ЦУПП-04/0035/10-53.2007.10.10 від 31.05.2010 // ДНУЗТ, Дніпро : 2010 - 190 с.
26. Хімічна та морфологічна оцінка якості цементу для виробництва залізобетонних шпал та хімічне дослідження води для бетонів і розчинів [Текст] / В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, П. А. Пшінько та інш. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика – 2012. Вип. 2. – С. 13-18.
27. Штарк, И. Долговечность бетона [Текст] / И. Штарк, Б. Вихт. – Киев : Оранта. – 2004. – 295 с.

В. В. КОВАЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. ЗАЯЦ², С. В. КОВАЛЕНКО³

^{1*}Кафедра «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, эл. почта kovalenkovv@upr.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

²Кафедра «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 3731581, эл. почта zyl41@ukr.net

³ЧП «Логия», ул. Красная, 19-А, Днепр, Украина, 49000, тел. +38 (050) 3400176, эл. почта logiya2015@ukr.net

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель. Предупреждение преждевременного разрушения мостовых конструкций. **Методика.** Использованы: макроструктурный, фрактографический, аналитический анализы, методы физико-механических испытаний образцов бетона. **Результаты.** В этой работе предметом исследований являлось не только структурное состояние и свойства бетона мостовых конструкций, а и химические свойства сырьевых материалов. Произведенные исследования преждевременно разрушенных балок мостовых плитного типа показали: 1) несоответствие сырьевых материалов требованиям соответствующих стандартов; 2) наличие в химическом составе воды затворения большого количества карбонатных и гидрокарбонатных комплексов с натрием; 3) несоответствие требованиям современных технологий методов и технологического регламента производства бетона в условиях предприятия ПАО «Укрзалізниця». Инновационные технологии производства железобетона позволят предотвратить преждевременное разрушение мостовых конструкций. **Научная новизна.** В работе использован комплексный аналитический и технический подход к определению причин, которые могли повлиять на преждевременное разрушение балок мостовых плитного типа. Оценено максимальное количество факторов, которые могли негативно повлиять на их преждевременное разрушение. Показано, что совокупность факторов, которые негативно повлияли на структурные характеристики бетона балок мостовых плитного типа была значительно усугублена наличием эффективных катализаторов разрушительных процессов. Внедрение к требованиям современных Украинских стандартов испытаний структуры недавно изготовленных бетонов мостовых конструкций позволит на ранних стадиях выявлять опасные факторы и прогнозировать срок службы мостовых конструкций. Практическая значимость. Исследования физико-механических свойств образцов бетона, изготовленного по новой технологии, подтвердили их высокий уровень. Сложность контроля химического состава сырьевых материалов значительно упрощается путём исследования микроструктурных параметров цементного камня. Доказана необходимость внедрения инновационной технологии производства бетона и железобетона мостовых конструкций.

Ключевые слова: бетон; балки мостовые плитного типа; сырьевые материалы; преждевременное разрушение; технология производства; механические характеристики.

V. V. KOVALENKO^{1*}, Y. L. ZAYATS², S. V. KOVALENKO³

^{1*} Department «Life Safety» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 489 07 72, e-mail kovalenkovv@upr.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

© В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, С. В. Коваленко, 2018

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

² Department «Life Safety» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 3731581, e-mail zyl41@ukr.net

³ PE "Logiya", Chervona St., 19-A, Dnepr, Ukraine, 49000 tel. +38 (050) 3400176, e-mail logiya2015@ukr.net

COMPREHENSIVE APPROACH TO SOLVING PROBLEMS OF DURABILITY OF FERRO-CONCRETE BRIDGE DESIGNS

Purpose. Prevention of premature failure of bridge structures. **Methodology.** Used: macrostructural, fractographic, analytical analyses, methods of physical and mechanical testing of concrete samples. **Findings.** In this work, the subject of research was not only the structural state and properties of concrete in bridge structures, but also the chemical properties of raw materials. Produced were the studies of prematurely destroyed slab-type bridge beams that showed: 1) inconsistency of raw materials with the requirements of the relevant standards; 2) the presence in the chemical composition of water of a large number of carbonate and hydrocarbonate complexes with sodium; 3) discrepancy with the requirements of modern technologies of methods and technological regulations of concrete production in conditions of the enterprise of PJSC "Ukrzaliznytsya". Innovative technologies for the production of reinforced concrete will prevent premature destruction of bridge structures. **Originality.** The work used a comprehensive analytical and technical approach to determining the causes that could affect the premature destruction of the bridge beams of plate type. The maximum number of factors that could adversely affect their premature failure was estimated. It is shown that the set of factors that adversely affected the structural characteristics of the concrete of the slab-type beams were significantly exacerbated by the presence of effective catalysts for destructive processes. The introduction to the requirements of modern Ukrainian standards of testing the structure of newly made concrete bridges will allow early detection of hazardous factors and predict the life of bridge structures. **Practical value.** Studies of the physical and mechanical properties of concrete samples manufactured using the new technology have confirmed their high level. The complexity of controlling the chemical composition of raw materials is greatly simplified by examining the microstructural parameters of the cement stone. The necessity of introduction of innovative technology of concrete and reinforced concrete production of bridge structures is proved.

Keywords: concrete; slab-type beams; raw materials; premature destruction; production technology; mechanical characteristics

REFERENCES

1. Butt Yu. M., Sychev M. M., Timashev V. V. Himicheskaya tehnologiya vyazhushhih materialov [Chemical Technology of Binding Materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 237 p.
2. Rybkin V. V., Kovalenko V. V., Zayacz Yu. L. ta insh. Deyaki aspekty tehnologichnih prijomiv virobnyctva ta kontrolyu ekspluatacijnoho resursu zalizobetonnyh shpal v Ukrayini ta sviti [The aspects of technological acceptance by the viri-nity and the control of the use of the concrete sleepers in Ukraine in the world]. *Zaliz-nichnyj transport Ukrayiny*, no 3/4, Kyjiv, 2012, pp. 76-81.
3. Kovalenko V., Kovalenko S., Vovk A., Zayacz Yu. Doslidzhennya struktury i vlastyvostryj mineralnyh dobavok dlya betoniv ta budivelnyh rozchyniv [Investigation of the structure and properties of mineral additives for concrete and building materials]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 28-32.
4. Rybkin V. V., Kovalenko V. V., Zayacz Yu. L., ta insh. Doslidzhennya fiziko-himichnih vlastyvostryj dribnyh zapovnyuvachiv dlyavyrobnyctva zalizobetonnyh shpal [Investigation of physical and chemical properties of drill-type fillers for the production of iron-and-steel sleepers]. *Visnik DNUZT*, 2012, issue 40, pp. 140-145.
5. Rybkin V. V., Kovalenko V. V., Zayacz Yu. L. ta insh. Doslidzhennya ekspluatacijnoji stijkosti zalizobetonnyh shpal ta osnovni tehnologichni pryjomi yih pok-rashhennia [Investigation of operational stability of iron-concrete sleepers and basic technological methods of its improvement.]. *Budivnyctvo Ukrayiny*, 2011, issue 4, pp.19-23.
6. DSTU B.A 1.1-55-94. Pryrodni piski dlya vyrobnyctva budivelnyh materialiv. Terminy ta vyznachennya [Natural sands for building materials production. Terms and definitions]. Kyjiv, 1994, 22 p.
7. DSTU B V.2.6-145:2010. Konstrukciyi budynkiv i sporud. Zahyst betonnyh i zalizobetonnyh konstrukcij vid koroziji. Zagalni tehnichni vymogy (GOST31384-2008, NEQ) [Structures of buildings and structures. Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. General technical requirements]. Kyjiv, 2010, 77 p.
8. DSTU B V.2.7-32-95. Budivelni materialy. Pisok shhilnyj pryrodnyj dlya budivelnyh materialiv, vyrobiv, kon-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- strukcij i robit. Tehnichni umovy* [Building materials. Dense natural sand for building materials, products, structures and works. Specifications]. Kyjiv, 1995, 10 p.
9. DSTU B V.2.7-46:2010. *Budivelni materialy. Cementy zagalno-budivelnogo pryznachennya. Tehnichni umovy* [Building materials. Cements of general construction purpose. Specifications]. Kyjiv, 2010, 14 p.
 10. DSTU B V.2.7-71 -98 (GOST 8269.0-97). *Budivelni materialy. Shhebin i gravij iz shhilnyh girskyh porid i vidhodiv promyslovogo vyrobnyctva dlya budivelnyh robit. Metody fizyko-mehaničnyh vyprobuvan* [Building materials. Rubble and gravel from dense rocks and waste industrial production for construction work. Methods of physical and mechanical tests]. Kyjiv, 1998, 13 p.
 11. DSTU B V.2.7-75-98. *Budivelni materialy. Shhebin i gravij shhilni pryrodni dlya budivelnyh materialiv, vyrobiv, konstrukcij ta robit. Tehnichni umovy* [Building materials. Crushed and gravel dense natural for building materials, products, structures and works. Specifications]. Kyjiv, 1998, 14 p.
 12. DSTU B V.2.7-171:2008. *Budivelni materialy. Dobavky dlya betoniv i budivelnyh rozchyniv. Zagalni tehnicni umovy* [Building materials. Additives for concrete and mortars. General specifications]. Kyjiv, 2008, 62 p.
 13. DSTU B V.2.7-176:2008. *Sumishi betonni ta beton. Zagalni tehnicni umovy* [Concrete mixes and concrete. General specifications]. Kyjiv, 2008, 109 p.
 14. DSTU B V.2.7-210:2010. *Budivelni materialy. Pisok iz vidsiviv droblennya vyverzheny girskyh porid dlya budivelnyh robit. Tehnichni umovy* [Building materials. Sand from the dumping of crushing of eruptive rocks for construction work. Specifications]. Kyjiv, 2010, 20 p.
 15. DSTU B V.2.7-214:2009. *Betony. Metody vyznachennya micznosti za kontrolnymy` zrazkamy* [Concrete Methods of determining the strength of control samples]. Kyjiv, 2009, 43 p.
 16. DSTU B V.2.7-224:2009. *Betony. Pravyla kontrolyu micznosti* [Concrete Rules of strength control]. Kyjiv, 2009, 23 p.
 17. DSTU B V.2.7-273:2011. *Voda dlya betoniv i rozchyniv. Tehnichni umovy (GOST 23732-79, MOD)* [Water for Concrete and Solutions. Specifications]. Kyjiv, 2011, 4 p.
 18. DSTU-N B A.1.1-83:2008. *Systema standarty zacyi ta normuvannya u budivnyctvi. Nastanova. Kerivnyj dokument V shhodo vyznachennya kontrolyu vyrobnyctva na pidpryyemstvi v tehnicnyh umovah na budivelni vyroby* [System of standardization and standardization in construction. Attitude. Guideline B on the definition of factory production control in the technical specifications for construction products]. Kyjiv, 2008, 10 p.
 19. DSTU-N B V.2.7-175:2008. *Nastanova shhodo zastosuvannya himichny`h dobavok u betonah i budivelnyh rozchynah* [Guidance on the application of chemical additives in concrete and mortar]. Kyjiv, 2008, 31 p.
 20. DSTU ISO 3696:2003. *Voda dlya zastosuvannya v laboratoriyah. Vymogy ta metody perevirannya; (ISO 3696:1987, IDT)* [Water for use in laboratories. Requirements and verification methods]. Kyjiv, 2003, 8 p.
 21. DSTU B EN12620:2013. *Zapovnyuvachi dlya betonu* [Fillers for concrete] (EN12620:2002+A1:2008, IDT). Kyjiv, 2013, 61 p.
 22. EN 1504 *Materialy i systemy dlya remontu i zahystu betonnyh konstrukcij* [Materials and systems for repair and protection of concrete structures]. Geneva, 2009, 105 p.
 23. Kuzneczova T. V. *Aljuminatnye i sul'fatnye cementy* [Aluminate and sulfate cements]. Moscow, Strojizdat Publ., 1986, 208 p.
 24. Polyng L., Poling P. Himiya [Chemistry]. Per. M. V. Saharova, red. M. L. Karapet'janc. Moscow, 1978, 354 p.
 25. *Provedennya doslidzen po vstanovlennju prychn rujuvannya zalizobetonnyh shpal ta rozrobka rekomendacij po pidvyshhennju micznosti betonu* [Carrying out researches on the establishment of the prime of the destruction of reinforced sleepers and the development of recommendations for improving the strength of concrete]. Zvit NDR (zakluchnyj), gospdogovir N CzUPP-04/0035/10-53.2007.10.10 vid 31.05.2010 g. DNUZT, 2011, 190 p.
 26. Kovalenko V. V., Zayacz Yu. L., Pshinko P. A. ta insh. *Himichna ta morfologichna ocinka yakosti cementu dlya vyrobnyctva zalizobetonnyh shpal ta himichne doslidzhennya vody dlya betoniv i rozchyniv* [Chemical and morphological evaluation of cement quality for the production of reinforced sleepers and chemical water analysis for concrete and mortar] *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 2, pp. 13-18.
 27. Shtark Y., Viht B. *Dolgovechnost betona* [The durability of concrete]. Kyjiv, Oranta Publ., 2004, 295 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. А. Плугін, д.т.н., проф. Й.Й. Лучко

Надійшла до редколегії 01.10.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.