

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 691.3:625.142.42

В. В. КОВАЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. ЗАЯЦЬ^{2*}, П. О. ПШІНЬКО^{3*}

^{1*}Каф. «Управління проектами, будівлі та будівельні матеріали», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, ел. пошта valusha.kov@yandex.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

^{2*}Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 81, ел. пошта zy141@mail.ru, ORCID 0000-0002-9213-1790

^{3*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (095) 742 04 34, ел. пошта mostoproekt@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4187-5340

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПЕРЕДЧАСНОГО РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ НА ЗНАМ'ЯНСЬКІЙ ДИСТАНЦІЇ КОЛІЇ ПЧ 10 ОДЕСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ

Мета. Наукова робота має за мету дослідження факторів, які призвели до передчасного руйнування бетону залізничних шпал. **Методика.** В роботі застосована експрес-методика визначення морфології та хімічного складу структурних складових бетону, що запатентована Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту. Методика дає можливість оперативно контролювати морфологію та хімічний склад кристалів цементного каменю, як найбільш слабкої ланки в структурі композитного матеріалу–бетону. А також прогнозувати, у відповідності з рекомендаціями німецьких вчених, ймовірність структурних перетворень цементного каменю в твердому стані, що визначає довговічність цього композитного матеріалу. **Результати.** Масові руйнування залізобетонних шпал на залізницях України частішають із кожним роком. Причому, якщо такі руйнування в 2010 році виявляли після 4–5 років експлуатації, то в 2015 році – тільки після 2–3 років установки шпал на магістральних залізничних коліях. За характером руйнувань бетону шпал можна відзначити багатofакторність впливів на нього. Партії цементу та інших сировинних матеріалів перед використанням були досліджені стандартними методами в акредитованій лабораторії ПАТ «Укр-геолбудм» (Київ) і отримали позитивні оцінки для використання у виробництві залізобетонних шпал. Однак, значна помилка в експериментальних даних за стандартними методиками не дозволила виявити критичні характеристики матеріалів, які згубно впливають на довговічність бетону підрейкових основ. За результатами досліджень було встановлено, що причинами масового передчасного руйнування шпал є: 1) неоднорідність макроструктури бетону, як наслідку застосування щебеню фракції 5–25 мм; 2) вплив агресивного середовища на бетонну поверхню шпал; 3) наявність у структурі середньої частини шпал крупних етрингітних кристалів, схильних до реструктуризації, та присутність продуктів лужнокремнієвокислої реакції навколо аморфних або тих, що містять аморфний кремнезем, пісочних часток; 4) перевищення нормативного коефіцієнту приведеної лужності щільної та пористої складових цементного каменю відповідно у 3,6 та у 3,2 рази; 5) насиченість поверхні пісочних часток атомами хлору, які додатково пришвидшують та ініціюють лужнокремнієвокислу реакцію. **Наукова новизна.** Дослідниками вперше була застосована запатентована авторська експрес-методика дослідження морфології та хімічного складу структурних складових бетону. **Практична значимість.** Застосування пропонованої методики дослідження сировинних матеріалів та

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

структури бетону в виробничому циклі підприємств дасть змогу запобігти передчасному руйнуванню бетону внаслідок дії внутрішніх факторів.

Ключові слова: залізобетонні шпали; бетон; щебінь; пісок; цемент; лужнокремнієвокисла реакція; мікроструктура; цементний камінь

Вступ

Масові руйнування залізобетонних шпал на залізницях України частішають з кожним роком. Причому, якщо такі руйнування в 2010 році виявляли після 4–5 років експлуатації, то в 2015 році тільки після 2–3 років установки шпал на магістральних залізничних коліях. За характером руйнувань бетону шпал можна зробити висновок про багатофакторності впливів на нього. Довговічність бетону і структура цементного каменю є об'єктом дослідження багатьох закордонних та вітчизняних авторів, а саме: S. W. Tang, Y. Yao, C. Andrade, Z. J. Li, Scrivener K. L., Пшінько О. М., Плуґін А. А., Саницький М. А. та ін. [1–3, 8–13, 15–24].

Залізобетонні шпали, як основні елементи верхньої будови колії, витримують значні динамічні навантаження в корозійно-активному середовищі у комплексі з впливом потоку вихрового електричного струму та температурними коливаннями близько 0°C у міжсезонний період. Такі складні умови експлуатації вимагають суворої технологічної дисципліни під час виготовлення та використання шпал.

Партії цементу та інших сировинних матеріалів перед використанням їх заводами були досліджені стандартними методами в акредитованій лабораторії ПАТ «Укргеолбудм», м. Київ і отримали позитивні оцінки для використання у виробництві залізобетонних шпал. Однак, значна помилка в експериментальних даних за стандартними методиками не дозволила виявити критичні характеристики матеріалів, які згубно впливають на довговічність бетону підрейкових основ.

Об'єктом дослідження в цій роботі були зразки передчасно зруйнованих залізобетонних шпал виробництва одного з українських заводів у кількості 34 шт., що не відслужили трирічний термін і більшість з яких розсипалися на частки розміром з фракції дрібного заповнювача бетону з оголенням кородованої арматури.

На ділянці 314 км ПК8-324 км ПК1 перегону Чорноліська–Трепівка Знам'янській дистанції колії виконана модернізація колії в довго-

тривалі «вікна» в період від 26.03 до 04.04.2012 року з укладанням рейко-шпальної решітки на залізобетонних шпалах типу Ш1-3 зі скріпленням типу КБ. Дана ділянка колії експлуатується з довгими плітями довжиною в перегін, які закріплені при температурі + 32 °С, уgonу колії немає, плече баластної призми достатнє. З квітня 2012 року (дата встановлення шпал на магістральну дільницю) по квітень 2015 року ці кілометри оцінювали на «відмінно».

Аналіз пошкоджених та зруйнованих шпал на даній ділянці у кількості близько 1896 одиниць показав, що шпали були вкриті сіткою мілких тріщин, через які інтенсивно всмоктуються атмосферні осадки та підґрунтові води. Такі шпали проблематично перенесуть міжсезонні коливання температур з підвищеною вологістю повітря та ґрунту та зруйнуються протягом 1–2 років. Необхідно відмітити, що повного руйнування протягом трьох років зазнали лише 1,8 % загальної кількості пошкоджених шпал.

Проблемою для безпечної експлуатації залізобетонних шпал є наявність вільних кислот у стічних водах промислових підприємств, які попадають у ґрунтові води та атмосферні осадки під час атмосферних викидів сірчаних газів, хлору та хлористого водню. Для вітчизняних залізниць характерно використання пасажирського вагонного парку з туалетами, під час користування якими продукти випорожнень викидають та виливають разом з дезінфікуючими та миючими засобами з вмістом хлору безпосередньо на колію. Органічні кислоти, як і неорганічні, швидко руйнують цементний камінь. Велика агресивність є у оцтової, молочної та винної кислот. Жирні насичені і ненасичені кислоти (олеїнова, стеаринова, пальмітинова та інші) руйнують цементний камінь, оскільки при взаємодії з гідрооксидом кальцію вони обмилюються. Крім того, шкідливі і масла, що містять кислоти жирного ряду: льняне, бавовняне, а також рибіячий жир. Нафта та нафтові продукти (керосин, бензин, мазут, нафтові масла) не несуть небезпеки, якщо вони не містять наф-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тових кислот та з'єднань сірки. Однак, необхідно враховувати, що нафтопродукти легко проникають крізь бетон. Продукти розгону кам'яновугільного дьогтю, що містять фенол, можуть агресивно впливати на бетон.

Виявлені і класифіковані дефекти, які значно знижували термін експлуатації залізничних шпал і в низці випадків призводили до виникнення аварійних ситуацій на залізницях, наведені у відповідних класифікаторах. До таких дефектів можна віднести як дефекти, що виникли внаслідок силових та динамічних навантажень на шпалу, так і ті, що виникли через невідповідні фізико-механічні характеристики матеріалів, що використовувалися при виготовленні залізобетонних шпал (недостатні морозостійкість і довговічність бетону внаслідок використання складових матеріалів, непридатних для шпального бетону, неправильного підбору складу бетонної суміші та поганого ущільнення її під час виготовлення шпал) відповідно до класифікації, що наведена у Технічних вказівках з використання старопридатних матеріалів верхньої будови колії на залізницях України (ЦП-0150) [14].

Мета

Метою роботи було дослідження факторів, що призвели до передчасного руйнування бетону залізничних шпал.

Методика

Візуальні дослідження макроструктури та характеру руйнувань та забруднення шпального бетону виконували за допомогою камери мобільного Android 4.4.2 Lenovo S898t+.

Тріщини залізобетонних шпал фіксували на камеру безпосередньо на місці їх попередньої (якщо шпали були зняті з магістральної колії) та поточної експлуатації. Макроструктурні характеристики шпального бетону (однорідність розподілу щебеню) досліджували під час виділення окремих зруйнованих частин шпал.

Для виконання електронно-мікроскопічних, мікрорентгеноспектральних та фрактографічних досліджень зразки матеріалів напилювали електрострумопровідним шаром золота товщиною 3–5 нм на установці іонного напилювання JFC–1100 JEOL Fine Coat ion sputter (Японія).

Дослідження виконували за допомогою растрового аналітичного сканівного електронного мікроскопа (Analytical Scanning Electron Microscope) JSM 6060LA, JEOL, Японія з енергодисперсійним спектрометром EDS detector Ex-54175 Jmu Jeol (OXFORD Instruments) та персональним комп'ютером в режимі прискорюючої напруги – 10-30 кВ, сили електричного струму – 3×10^{-10} А, збільшенні $\times 100 \dots \times 30000$ при контрасті у вторинних (SEI) та відображених (BEI) електронах.

Виклад основного матеріалу. Попередні дослідження характерних зломів та областей руйнування шпал та хімічного складу сировинних матеріалів для виробництва бетону зроблені в рамках договору № ЦУПП-04/0035/10-53.2007.10.10 від 31.05.2010 р. «Проведення досліджень по встановленню причин руйнування залізобетонних шпал та розробка рекомендацій по підвищенню міцності бетону» Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту за участю співробітників ПП «Логія», м. Дніпропетровськ [11] показали необхідність ретельного контролю за якістю піску, щебеню та цементу. Реакційна спроможність означених складових впливає на структуру, що утворюється в процесі довготривалої лужно-кислотнокремнієвої реакції, яка протікає в бетонах шпал протягом 2–5 років та більше. В ході реакції виділяється нова структурна складова, що має свій об'єм та з середини руйнує бетон. Крім того, при експлуатації шпал в природних умовах України, при накопиченні циклічних температурних та механічних навантажень, при зміні сезонів року, при підвищеній вологості нестабільні структурні складові бетону рекристалізуються зі збільшенням об'єму більше ніж у 2 рази. Виявленню нестабільних та новоутворених в твердому стані структурних складових присвячено цю роботу.

Перевірка міцності шпального бетону на стиск на 28 добу показала міцність у 88,45 МПа. Усі укладені шпали на ПЧ-10 відповідали вимогам технічних умов за глибиною укладання арматури та іншим технічним характеристикам [4–6]. Отже, очевидно, що вихідні характеристики продукції заводу-виробника задовольняють вимогам нормативних документів та значно їх перевищують. Тому причини

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

передчасного руйнування необхідно шукати в твердо-фазових структурних перетвореннях, які відбуваються під час температурних циклічних змін в інтервалі $-5...+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ при підвищеній вологості, або у зовнішніх забрудненнях шпал в період їх експлуатації [5, 7, 17]. На жаль, досі заводи не можуть контролювати структурний стан шпального бетону для запобігання рекристалізаційних процесів в шпалах, що експлуатуються, хоча необхідність таких досліджень підтверджено вимогами Європейських стандартів, наприклад стандартом EN 1504 [7]. Такі дослідження могли запобігти не тільки випуску недовговічного бетону, а і гарантувати об'єктивні характеристики поставленого та експлуатованого бетону при експертних дослідженнях передчасних руйнувань, які, можливо, виникли за рахунок зовнішніх факторів.

Характер масових руйнувань залізобетонних шпал наведено на рис. 1.



Рис. 1. Характер масових руйнувань шпал на ПЧ10 «Знам'янка» Одеської залізниці

Fig. 1. Mass destruction nature of sleepers on IF 10 «Znamianka» on Odessa railway

З рис. 1 видно, що сизо-фіолетово-голубі плями на поверхні бетону вказують на проходження структурних перебудов усередині бетону. Подібні плями є ознакою перебудов цементного каменю етрингіт-таумасит, що відбуваються із зміною об'єму структурних складових [17]. Причиною таких перебудов є не тільки мікроструктурний стан цементних кристалів, а і, вірогідно, зовнішні та внутрішні фактори, які прискорили такі перетворення.

Іншою причиною швидкого руйнування залізобетонних шпал є макроструктурна неоднорідність бетону шпал. На рис. 2 наведено характер руйнування з формуванням тріщин уздовж всієї шпали з багатьма тріщинами, які паралельні армуючим вставкам. Тріщини безперешкодно, тобто не огинаючи щебеневі включення, ідуть по цементному розчину, який нижчий за міцністю, ніж сусідня частина бетонної шпали. Але попереднє напруження бетону шпали розраховується не на цементний розчин між струнами арматури, а на міцнісні характеристики бетону. Причому, як ми з'ясували раніше, його характеристики досить високі $R_{ct} = 88,45\text{ МПа}$.



Рис. 2. Формування повздовжніх тріщин в розчинній частині макронеоднорідності бетону між арматурними прутами, які збіднені щебеневим заповнювачем

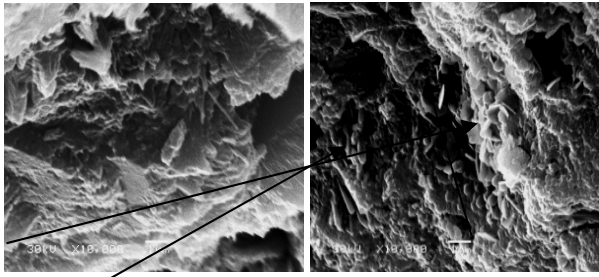
Fig. 2. The formation of longitudinal cracks in macronutrient soluble part of the concrete between reinforcing bars that were depleted by the crushed stone filler aggregate

Підвищення однорідності макроструктури бетону можливо досягти при застосуванні щебеню фракції 5–20 мм, вільного від пилоподібних часток та фракції вище ніж 20 мм. Таких характеристик щебеню можливо досягти при застосуванні просіваючих поверхонь нового покоління виробництва ПП «Логія». Вказані поверхні також дозволяють економити витрати до 50 % електричної енергії на просівання одиниці маси щебеню.

Фрактографічні дослідження зломів бетону у середині шпал наведено на рис. 3, свідчать

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

про щільну макроструктуру бетону з діаметрами мікропор від 1 до 1,5 мкм. В структурі присутні кристали лінзоподібної, голкоподібної морфології та плескаті кристали портландиту. Наявність гідрогранатних часток вказує на надлишок вологи в цементному камені. Цей надлишок сформовано за рахунок використання великої кількості цементу (500 кг) на куб бетону та відсутності пластифікаторів, які знижують водопотребу бетонної суміші.



Гідрогранат ($C_3A_{1-x}F_xS_zH_{6-2z}$), де $0 \leq x \leq 1, 0 \leq z \leq 3$ фаза A_{F1} етрингіт ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)

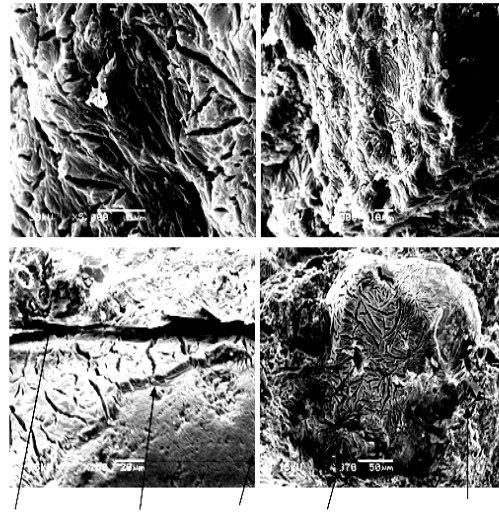
Рис. 3. Структура цементного каменю середньої частини передчасно зруйнованих залізобетонних шпал

Fig. 3. Cement stone structure of the middle part of prematurely destroyed concrete sleepers

В середній частині шпал, які експлуатувалися не повних три роки, знайдено продукт лужнокремнієвокислої реакції (рис. 4). При відсутності прямого контакту з навколишнім середовищем та обмеженим доступом води швидкість реакції становила 5–10 мкм у 3 роки, тобто 1,67–3,34 мкм в рік.

Хімічний склад цементного каменю різної морфології та продукту лужнокремнієвокислої реакції наведено на рис. 5–7.

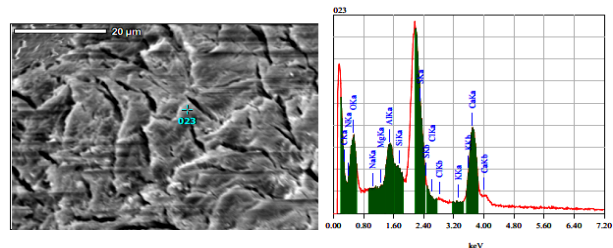
З рис. 4 видно, що продукт лужнокремнієвокислої реакції за приведеним коефіцієнтом лужності перевищує нормативний поріг 0,6 % (мас.) [5] у 3,5 рази та становить 2,12 % (мас.). У шарі розтрісканого цементного каменю – продукті лужнокремнієвокислої реакції – наявні атоми хлору у кількості 0,65 % (мас), що більше ніж у 6 разів перевищує максимально допустиму кількість хлору в 0,1 % (мас) [5].



Цементний камінь Продукт лужнокремнієвокислої реакції Пісок Продукт лужнокремнієвокислої реакції Оголена поверхня піщаної частки

Рис. 4. Структура продукту лужнокремнієвокислої реакції, утвореного в твердому стані в середній частині передчасно зруйнованих залізобетонних шпал

Fig. 4. Product structure of alkali silicic acid reactions formed in the solid state in the middle part of prematurely destroyed concrete sleepers



Хім ел., К α	Мас. %	Похибка, % відн.	Ат. %	З'єднання	Мас. %
O	32,9		72,46		
Mg	1,85	4,28	4,55	MgO	3,06
Al	6,77	4,9	7,51	Al ₂ O ₃	12,8
Si	4,3	6,03	9,17	SiO ₂	9,2
K	3,14	5,03	2,4	K ₂ O	3,78
Ca	50,4	7,63	75,28	CaO	70,51
Cl	0,65	1,09	3,01	Cl	0,65
Всього	100,00				

Рис. 5. Хімічний склад продукту лужнокремнієвокислої реакції, утвореного в твердому стані в середній частині передчасно зруйнованих залізобетонних шпал

Fig. 5. The chemical composition of the product alkali silicic acid reactions formed in the solid state in the middle part of prematurely destroyed concrete sleepers

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Наявність хлору лише в продукті лужнокремнієвокислої реакції на межі пісочних часток та масиву цементного каменю доводить, що атоми хлору в обмеженій кількості дифундували на поверхню пісочних часток та надалі прискорили реструктуризаційні процеси безпосередньо між кремнієвою кислотою аморфних пісочних часток та лужним цементним каменем.

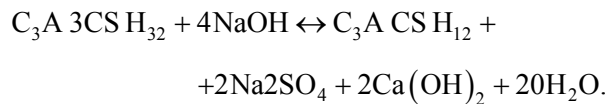
Вірогідно, у зимовий час відвантаження дрібних заповнювачів для попередження грудкування пісочних мас (змерзання піску у ємностях вагонів) та безпроблемного вивантаження з вагона залізничники додали малу кількість повареної солі. Ця сіль, вірогідно, і стала каталізатором зазначеної реакції.

З рис. 6 та 7 видно, що приведений коефіцієнт лужності щільної складової цементного каменю – портландиту (2,19 % (мас.)) незначною частиною вище ніж у пористих складових (1,92 % (мас.)), але відповідно у 3,6 та у 3,2 разу перевищує нормативний показник приведеної лужності.

Підвищена лужність цементу діє як каталізатор реструктуризаційних процесів для великих етрингітних кристалів цементного каменю. Процеси рекристалізації починаються вже на стадії термовологої обробки, де при досягненні температури 50–60 °С за підвищеної концентрації лужних металів етрингіт (трисульфат) рекристалізується у моносульфат:

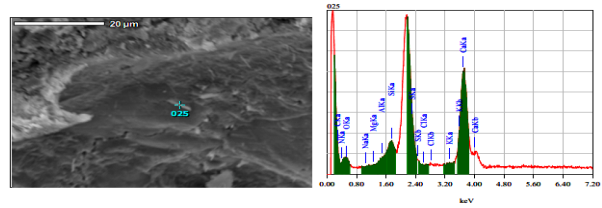


Ця реакція зворотна залежно від температурних умов:



При цьому утворення етрингіту з моносульфату пов'язане з специфічним збільшенням об'єму до 2,3 разу.

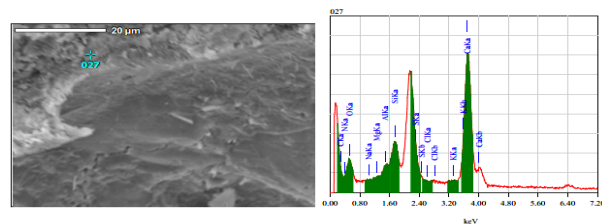
Зазначені процеси менш небезпечні та менш вірогідні в дрібнопористій частині цементного каменю, збагаченого магнієм, та відповідно значно небезпечніші та, на жаль, прогнозовано здійснюються під час рекристалізації великих етрингітних кристалів.



Хім ел., К α	Мас. %	Похибка, % відн.	Ат. %	З'єднання	Мас. %
O	32,9		72,46		
Mg	1,85	4,28	4,55	MgO	3,06
Al	6,77	4,9	7,51	Al ₂ O ₃	12,8
Si	4,3	6,03	9,17	SiO ₂	9,2
K	3,14	5,03	2,4	K ₂ O	3,78
Ca	50,4	7,63	75,28	CaO	70,51
Всього	100,00				

Рис. 6. Хімічний склад щільного портландиту в середній частині передчасно зруйнованих залізобетонних шпал

Fig. 6. The chemical composition of dense portlandite in the middle part of prematurely destroyed concrete sleepers



Хім ел., К α	Мас. %	Похибка, % відн.	Ат. %	З'єднання	Мас. %
O	31,07				
Na	0,21	1,91	0,26	Na ₂ O	0,28
Mg	0,54	1,88	1,29	MgO	0,9
Al	1,35	2,1	1,44	Al ₂ O ₃	2,54
Si	4,38	2,46	8,98	SiO ₂	9,37
K	2,43	2,06	1,79	K ₂ O	2,93
Ca	60,02	3,2	86,25	CaO	83,98
Всього	100,00				

Рис. 7. Хімічний склад дрібнодисперсної пористої AFt- та етрингітної фази в середній частині передчасно зруйнованих залізобетонних шпал

Fig. 7. The chemical composition of the fine porous AFt phase in the middle part of prematurely destroyed concrete sleepers

Застарілий ЕДС-спектрометр та детектор хімічних елементів застосованого приладу не дозволив проаналізувати вміст азоту та

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

в деяких випадках сірки в структурних складових цементного каменю, але зрозуміло, що її кількість у великих еtringітних кристалах повинна бути максимальною. А підвищений вміст азоту сприяє утворенню в бетоні з портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ розчинної кальцієвої селітри $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, яка вилугує вапно з втратою густини-міцності цементного каменю.

Найбільш характерні структури поверхонь руйнування залізобетонних шпал наведено на рис. 8. З рисунку видно, що на ділянках щільного портландиту відбувається рекристалізація цементного каменю з утворенням великих еtringітних кристалів, та на поверхні пісочних часток утворені продукти лужнокремнієвокислої реакції. Також наявні ділянки цементного каменю з розчинними солями кальцію, що утворюють гелеподібні структури.

На рис. 9–11 наведено хімічний склад різних морфологічних типів цементного каменю на зруйнованій поверхні залізобетонних шпал.

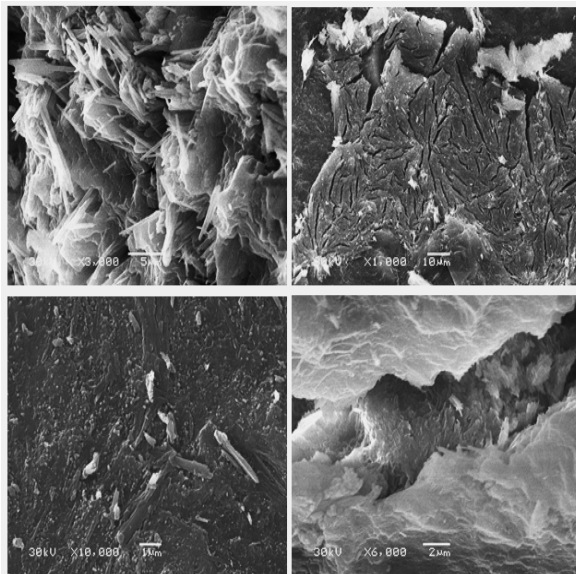
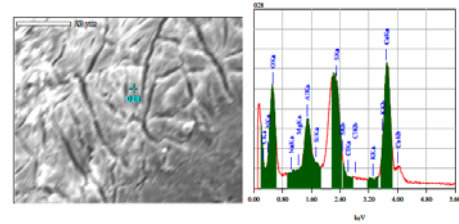


Рис. 8. Морфологія структурних складових цементного каменю в верхній частині передчасно зруйнованих залізобетонних шпал

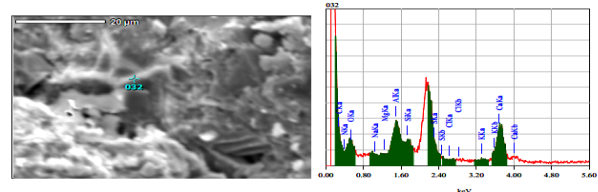
Fig. 8. Morphology of structural components of cement stone in the upper part of prematurely destroyed concrete sleepers



Хім ел., Кα	Мас. %	Похибка, % відн.	Ат. %	З'єднання	Мас. %
O	35,72				
Mg	0,91	1,58	2,29	MgO	1,51
Al	5,08	1,79	5,76	Al ₂ O ₃	9,61
Si	1,49	2,16	3,24	SiO ₂	3,18
S	6,19	2,25	11,81	SO ₃	15,46
Cl	1,09	1,12	1,88	Cl	1,09
K	0,69	1,87	0,54	K ₂ O	0,83
Ca	48,83	2,79	74,49	CaO	68,32
Всього	100,00				

Рис. 9. Хімічний склад продукту лужнокремнієвокислої реакції в верхній частині передчасно зруйнованих залізобетонних шпал

Fig. 9. The chemical composition of the product alkali silicic acid reactions in the upper part of prematurely destroyed concrete sleepers

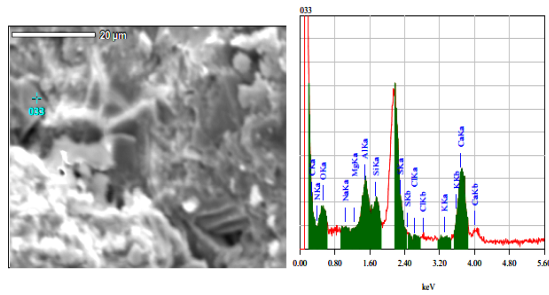


Хім ел., Кα	Мас. %	Похибка, % відн.	Ат. %	З'єднання	Мас. %
O	34,05				
Mg	0,89	11,38	2,24	MgO	1,48
Al	8,32	12,91	9,39	Al ₂ O ₃	15,73
Si	5,43	16,17	11,76	SiO ₂	11,61
Cl	0,58	8,12	1,00	Cl	0,58
K	1,93	13,51	1,3	K ₂ O	2,33
Ca	48,79	20,38	74,10	CaO	68,27
Всього	100,00				

Рис. 10. Хімічний склад цементного каменю в верхній частині передчасно зруйнованих залізобетонних шпал

Fig. 10. Chemical composition of cement stone in the upper part of prematurely destroyed concrete sleepers

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО



Хім ел., К α	Мас. %	Похибка, % відн.	Ат. %	З'єднання	Мас. %
O	35,12				
Na	0,43	8,51	0,57	Na ₂ O	0,58
Mg	0,76	8,48	1,90	MgO	1,26
Al	8,95	9,62	10,12	Al ₂ O ₃	16,92
Si	7,16	12,14	15,55	SiO ₂	15,31
Cl	1,07	6,15	1,84	Cl	1,07
K	1,06	10,26	0,83	K ₂ O	1,28
Ca	45,44	15,31	69,18	CaO	63,68
Всього	100,00				

Рис. 11. Хімічний склад цементного каменю в верхній частині передчасно зруйнованих залізобетонних шпал

Fig. 11. Chemical composition of cement stone in the upper part of prematurely destroyed concrete sleepers

Як видно з рис. 9–11, в області руйнувань цементного каменю на поверхні шпал спостерігаються локальні об'єми з підвищеним вмістом оксиду сірки SO₃ – 15,46 % (мас.), що перевищує максимальний допустимий рівень 3,5 % (мас.) у 4,4 разу. Приведений коефіцієнт лужності цементного каменю перевищує нормативний показник у 0,6 % (мас.) у 2,17 разу та сягає 2,33 % (мас.). Вміст алюмінатів стабільно перевищує нормативний показник у 8 % (мас.) в 1,2÷2,1 разу та максимально сягає 16,92 % (мас.). Вміст хлору стабільно перевищує нормативний показник у 0,1 % (мас.) у 5,8...11 разів та максимально сягає 1,09 % (мас.). Саме таке поєднання хімічних елементів сприяє прискореному формуванню вторинних еtringітних кристалів та таумаситу в бетоні в процесі експлуатації залізобетонних шпал. Застосування аморфного кремнезему як дрібного заповнювача у комплексі з насиченням цементу підвищеної лужності хлором в концентрації, яка перевищує 1 % (мас.), максимально пришвидшує лужнокремнієвокислу реакцію, яка розді-

ляє цементний камінь від дрібних заповнювачів. При цьому в структурі зберігаються міцні структурні складові плескати кристалів цементного каменю з відношенням CaO/SiO₂ – 4,1 та для голкоподібних кристалів – 5,8.

За протоколами періодичних випробувань портланд цементу в акредитованій лабораторії ПАТ «Укргеолбудм», м. Київ згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-46:2010 виявлено підвищений рівень приведеної лужності цементу ПЦІ-500 виробництва як ВАТ «Івано-Франківськ-цемент», так і ПАТ «Волинь-цемент». Реакційна здатність піску та щебеню за результатами випробувань тієї ж лабораторії відповідає вимогам діючих стандартів.

Дослідження впливу агресивних зовнішніх факторів на бетон в процесі експлуатації шпал. Традиційно зовнішні фактори впливу на руйнування бетону залізничних шпал відіграють не останню роль у корозійних процесах. Шпали у процесі експлуатації насичуються різноманітними реагентами, здатними значно прискорити як будь-які реакції, так і повністю розчинити цементний камінь. На рис. 12 та 13 наведено стан залізничних шпал на дільниці, де вони експлуатувалися. З рисунків видно, що шпали забруднені вуглемісними речовинами та у місцях крапельного забруднення прискорено проходять процеси руйнації цементного каменю.



Рис. 12. Формування корозійних каверн в забрудненому бетоні шпал

Fig. 12. The formation of corrosion cavities in filthy concrete sleepers

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

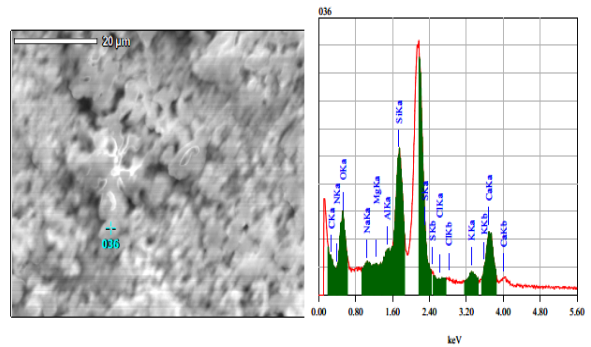
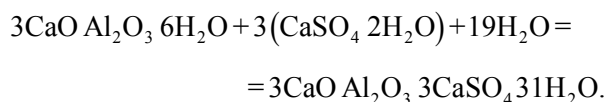


Рис. 13. Кінцевий стан бетону впродовж періоду менше ніж 3 роки експлуатації

Fig. 13. The final state of the concrete during the period less than 3 years of operation

З аналізу хімічного складу продуктів корозії бетону (рис. 14) видно, що основною речовиною, що сприяє руйнації бетону, є вуглеводні з'єднання (вірогідно, з вмістом фенолу) та розчини солей соляної кислоти (NaCl). Зазначені речовини сприяють розчиненню $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або безпосередньо сприяють корозії бетону з утворенням водорозчинного CaCl_2 .

З рисунків 14, 15 видно, що кальцій в структурі забрудненого бетону вимитий з цементного каменю, співвідношення його оксиду з оксидом кремнію майже дорівнює одиниці. Крім того, необхідно зауважити, що слабкий детектор приладу не зміг ідентифікувати сірку в продуктах корозії забрудненого вуглеводнями бетону, але навіть невелика її кількість в мінералізованій воді спричиняє різні види корозії, коли аніон SO_4^{2-} взаємодіє з катіоном Ca^{2+} , утворюючи в присутності води $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Кристалічний двоводний гіпс, слабо розчинений у воді, але внаслідок зростання кристалів, в порах створюється механічне напруження і тріщини. Якщо у воді мало аніонів SO_4^{2-} , то можна очікувати іншу реакцію:



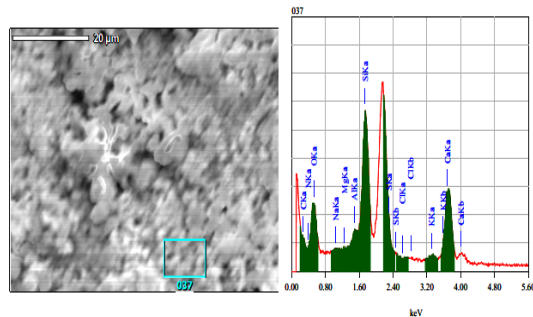
Хімічний елемент, Kα	Мас. %	Похибка, % відн.	Ат. %
C	11,18	1,05	19,48
O	36,5	2,98	47,73
Na	1,52	1,59	1,38
Mg	1,02	1,32	0,88
Al	3,16	1,32	2,45
Si	16,49	1,42	12,28
Cl	0,33	1,68	0,19
K	4,25	2,37	2,27
Ca	25,56	2,98	13,34
Всього	100,00		

Рис. 14. Хімічний склад структурних складових зруйнованого цементного каменю під дією хімічних речовин на верхній забрудненій частині шпал

Fig. 14. Chemical composition of structural components of destroyed cement stone under chemical substances action on the top of the contaminated part of sleepers

Нова кристалічна речовина називається етрингітом і відрізняється в 3 рази більшим об'ємом, ніж кристали вихідного гідроалюмінату кальцію $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, що призводить до ще більш інтенсивного зростання напруження усередині цементного каменю і мікротріщиноутворення та розсіпання монолітного блоку на окремі цементні кристали (рис. 16). При цьому необхідно відмітити, що сірка виявлена в продуктах корозії на поверхні розтрісканого бетону шпал. Крім того, зрозуміло, що вуглеводні речовини типу фенол не ідентифікуються мікрорентгеноспектральним аналізатором, але на його присутність вказують окремі кристали цементного каменю, в яких розчинені границі та вимиті у вигляді «кальцієвого молочка».

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО



Хім ел., К α	Мас. %	Похибка, % відн.	Ат. %	З'єднання	Мас. %
C	10,23	0,81	36,4	C	10,23
O	36,02				
Na	0,53	1,65	0,5	Na ₂ O	0,72
Mg	0,44	1,67	0,77	MgO	0,72
Al	3,62	1,9	2,87	Al ₂ O ₃	6,84
Si	17,65	2,32	26,85	SiO ₂	37,76
K	1,85	2,17	1,01	K ₂ O	2,23
Ca	29,65	3,17	31,61	CaO	41,49
Всього	100,00				

Рис. 15. Хімічний склад структурних складових зруйнованого цементного каменю під дією хімічних речовин на верхній забрудненій частині шпал

Fig. 15. Chemical composition of structural components of destroyed cement stone under chemical substances action on the top of the contaminated part of sleepers

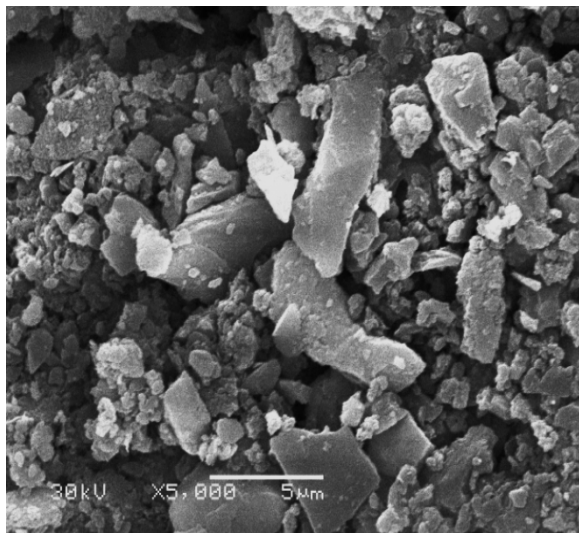


Рис. 16. Структура забрудненого цементного каменю залізобетонних шпал

Fig. 16. The structure of the contaminated cement reinforced concrete sleepers

Таким чином, однією з причин передчасного руйнування залізобетонних шпал є їх забруднення вуглеводнями з вмістом активних фенолів, а також відходами з вмістом мінеральних солей на основі хлоридів натрію та магнію з малим вмістом сірки. Це викликає розтріскування цементного каменю та вимивання кальцію по границях цементних кристалітів шляхом утворення з ним водорозчинних солей.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна та значимість роботи полягає в застосуванні запатентованої авторської експрес-методики дослідження морфології та хімічного складу структурних складових бетону у виробничому циклі підприємств, що дасть змогу запобігти передчасному руйнуванню бетону внаслідок дії внутрішніх факторів.

Результати та висновки

Аналіз причин руйнування залізобетонних шпал на Знам'янській дистанції колії на 320 км ПК 1-4 непарної колії перегону Чорноліська-Трепівка у кількості 1 896 шт., які прогнозовано не відпрацюють 5 % експлуатаційного ресурсу, показав, що вихідна міцність заводського бетону відповідає вимогам діючих ДСТУ.

Макроструктурний аналіз руйнування залізобетонних шпал показав наявність наскрізних тріщин вздовж арматурних струн, які проходять виключно по цементному розчину, міцність якого є значно нижчою, ніж у бетонній складовій шпали та такою, що не витримує навантажень попередньо напруженої арматури.

У структурі та хімічному складі середньої частини цементного каменю бетону шпал, де є мінімальний вплив оточуючого середовища, виявлено як наявність великих еtringітних кристалів, схильних до реструктуризації, так і присутність продуктів лужнокремнієвокислої реакції навколо аморфних або тих, що містять аморфний кремнезем, пісочні частки. Приведений коефіцієнт лужності щільної складової цементного каменю – портландиту (2,19 % (мас.)) незначною частиною вище, ніж у пористих складових (1,92 % (мас.)), але відповідно у 3,6 та у 3,2 разу перевищує нормативний показник. Поверхня пісочних часток насичена

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

атомами хлору, які додатково пришвидшують та ініціюють лужнокремнієвокислу реакцію. Таким чином, реструктуризаційні процеси всередині шпал є наслідком як відсутності вхідного контролю сировинних матеріалів піску та цементу, так і підвищеної температури термо-вологої обробки (70° С), яка сприяє зростанню великих етрингітних кристалів, що спричиняє розтріскування цементного каменю.

На ділянці руйнувань цементного каменю на поверхні шпал спостерігаються локальні об'єми з підвищеним вмістом оксиду сірки SO₃ –15,46 % (мас.), що перевищує максимальний допустимий рівень 3,5 % (мас.) у 4,4 разу. Приведений коефіцієнт лужності цементного каменю перевищує нормативний показник у 2,17 разу та сягає 2,33 % (мас.). Вміст алюмініатів стабільно перевищує нормативний показник у 8 % (мас), максимально їх концентрація підвищується у 2,1 разу до 16,92 % (мас.). Вміст хлору стабільно перевищує нормативний показник у 5,8÷11разів та сягає 1,09 % (мас.). Саме таке поєднання хімічних елементів сприяє прискореному формуванню вторинних етрингітних кристалів та таумаситу в бетоні в процесі експлуатації залізобетонних шпал [17]. Застосування аморфного кремнезему як дрібного заповнювача у комплексі з насиченням цементу підвищеної лужності хлором в концентрації, яка перевищує 1 % (мас.), максимально пришвидшує лужнокремнієвокислу реакцію, яка відділяє цементний камінь від дрібних заповнювачів.

Однією з причин передчасного руйнування залізобетонних шпал є їх забруднення в процесі експлуатації вуглеводнями з вмістом активних фенолів, а також відходами з вмістом мінеральних солей на основі хлоридів натрію та магнію з малим вмістом сірки. Це викликає розтріскування цементного каменю та вимивання кальцію по границях цементних кристалітів шляхом утворення з ним водорозчинних солей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Деякі аспекти технологічних прийомів виробництва та контролю експлуатаційного ресурсу залізобетонних шпал в Україні та світі / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць [та ін.] // Заліз. трансп. України. – 2012. – № 3/4. – С. 76–81.
- Дослідження експлуатаційної стійкості залізобетонних шпал та основні технологічні прийоми її покращення / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць [та ін.] // Буд-во України. – 2011. – № 4. – С. 19–23.
- Дослідження фізико-хімічних властивостей дрібних заповнювачів для виробництва залізобетонних шпал / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць [та ін.] // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 140–145.
- ДСТУ Б В.2.7–46–2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. – Київ : Укрархбудінформ, 2011. – 14 с.
- ДСТУ Б В.2.6–145:2010 (ГОСТ 31384:2008, NEQ). Конструкції будинків та споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги. – Київ : Укрархбудінформ, 2010. – 52 с.
- ДСТУ Б В.2.6–57–2008. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 мм. Технічні умови. – Київ : НДІБК, 2009. – 28 с.
- Європейський стандарт EN 1504. Матеріали і системи для ремонту і захисту бетонних конструкцій [Електронний ресурс]. – 2009. – Режим доступу: http://emaco26.ru/d/180619/d/evropeyskiy_standart_en_1504.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено: 26.10.2015.
- Железобетонные шпалы для рельсового пути / А. Ф. Золотарский, Б. А. Евдокимов, Н. М. Исаев [и др.]. – Москва : Транспорт, 1980. – 270 с.
- Мощанский, Н. А. Представление о природе минеральных вяжущих на основе периодического закона Менделеева и учения о метастабильных состояниях : В. кн. Тр. совещания по химии цемента / Н. А. Мощанский ; под ред. П. П. Будникова. – Москва : Госстройиздат, 1956. – 518 с.
- Пат. 99426 Україна. МПК G 01 N №33/38 (206.01), C 04 B 28/00. Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон / Плугін А. А., Плугін А. М., Романенко О. В. [та ін.] (Україна) ; заявник та патентовласник Укр. держ. акад. заліз. трансп. – № а 2011 14838. ; заявл. 14.12.2011 ; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15. – 20 с.
- Проведення досліджень по встановленню причин руйнування залізобетонних шпал та розробка рекомендацій по підвищенню міцності бетону : Звіт за договором № ЦУПП-04/0035/10–53.2007.10.10 від 31.05.2010 р. з Дніпропетр.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- нац. ун-том залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2011. – 168 с.
12. Пунагин, В. Н. Бетон в условиях повышенных температур : монография / В. Н. Пунагин, А. Н. Пшинько, Н. Н. Руденко. – Днепропетровск : Арт-Пресс, 1999. – 292 с.
 13. Саницкий, М. А. Некоторые вопросы кристаллохимии цементных минералов / М. А. Саницкий. – Киев : УМК ВОЮ, 1990. – 60 с.
 14. Технічні вказівки з використання старопридатних матеріалів верхньої будови колії на залізницях України : ЦП-0150 : затв. наказом Укрзалізниці від 24.03.2006 р. №112-Ц. – Київ : НКТЬ ЦП УЗ, 2006. – 56 с.
 15. Умань, Н. И. Твердение цементных минералов при пониженных температурах / Н. И. Умань, Л. Б. Сватовская, В. П. Овчинникова // Цемент и его применение. – 1998. – № 5–6. – С. 26–28.
 16. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Л. Г. Шпынова, В. И. Чих, М. А. Саницкий [и др.]. – Львов : Вища шк., 1981. – 160 с.
 17. Штарк, И. Долговечность бетона / И. Штарк, Б. Вихт. – Киев : Оранта, 2004. – 295 с.
 18. Changes in portlandite morphology with solvent composition: Atomistic simulations and experiment / S. Galmarini, A. Aimable, N. Ruffray, P. Bowen // Cement and Concrete Research. – 2011. – Vol. 41. – Iss. 12. – P. 1330–1338. doi:10.1016/j.cemconres.2011.04.009.
 19. Hooto, R. D. Current developments and future needs in standards for cementitious materials / R. D. Hooto // Cement and Concrete Research : Keynote papers from 14th Intern. Congress on the Chemistry of Cement (13.10.–16.10.2015). – 2015. – Vol. 78, p. A. – P. 165–177. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.022.
 20. Klein, D. H. Homogeneous nucleation of calcium hydroxide / D. H. Klein, M. D. Smith // Talanta. – 1968. – Vol. 15. – Iss. 2. – P. 229–231. doi:10.1016/0039-9140(68)80227-9.
 21. Ramachandran, V. S. Mechanism of Hydration of Calcium Oxide / V. S. Ramachandran, P. J. Sedra, R. F. Feldman // Nature. – 1964. – Vol. 201. – Iss. 4916. – P. 288–289. doi:10.1038/201288a0.
 22. Recent durability studies on concrete structure / S. W. Tang, Y. Yao, C. Andrade, Z. J. Li // Cement and Concrete Research : Keynote papers from 14th Intern. Congress on the Chemistry of Cement (13.10.–16.10.2015). – 2015. – Vol. 78, p. A. – P. 143–154. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
 23. Scrivener, K. L. Advances in understanding hydration of Portland cement / K. L. Scrivener, P. Juilland, P. J. M. Monteiro // Cement and Concrete Research : Keynote papers from 14th Intern. Congress on the Chemistry of Cement (13.10.–16.10.2015). – 2015. – Vol. 78, p. A. – P. 38–56. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.025.
 24. Trend to the Production of Calcium Hydroxide and Precipitated Calcium Carbonate with Defined Properties / H. Lohmus, A. Rani, U. Kallavus, R. Reiska // The Canadian J. of Chemical Engineering. – 2002. – Vol. 80. – Iss. 5. – P. 911–919. doi: 10.1002/cjce.5450800514.

В. В. КОВАЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. ЗАЯЦ^{2*}, П. А. ПШИНЬКО^{3*}

^{1*}Каф. «Управление проектами, здания и строительные материалы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (050) 48 90 772, эл. почта valusha.kov@yandex.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

^{2*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 81, эл. почта zyl41@mail.ru, ORCID 0000-0002-9213-1790

^{3*}Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. + 38 (095) 742 04 34, эл. почта mostoproekt@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4187-5340

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ НА ЗНАМЕНСКОЙ ДИСТАНЦИИ ПУТИ ПЧ 10 ОДЕССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Цель. Научная работа своей целью имеет исследование факторов, приведших к преждевременному разрушению бетона железнодорожных шпал. **Методика.** В работе использована экспресс-методика определения морфологии и химического состава структурных составляющих бетона, запатентованная Днепропетровским национальным университетом железнодорожного транспорта. Методика дает возможность оперативно

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

контролировать морфологию и химический состав кристаллов цементного камня, как наиболее слабого звена в структуре композитного материала–бетона. А также прогнозировать, в соответствии с рекомендациями немецких ученых, вероятность структурных преобразований цементного камня в твердом состоянии, определяющих долговечность этого композитного материала. **Результаты.** Массовые разрушения железобетонных шпал на железных дорогах Украины учащаются с каждым годом. Причем, если такие разрушения в 2010 году происходили после 4–5 лет эксплуатации, то в 2015 году – лишь после 2–3 лет установки шпал на магистральных железнодорожных путях. По характеру разрушений бетона шпал можно отметить многофакторность воздействий на него. Партии цемента и других сырьевых материалов перед использованием были исследованы стандартными методами в аккредитованной лаборатории ПАО «Укргеолбудм» (Киев) и получили положительные оценки для использования в производстве железобетонных шпал. Однако значительная ошибка в экспериментальных данных по стандартным методикам не позволила выявить критические характеристики материалов, которые пагубно влияют на долговечность бетона под рельсовых оснований. По результатам исследований было установлено, что причинами массового преждевременного разрушения шпал являются: 1) неоднородность макроструктуры бетона, как следствие применения щебня фракции 5–25 мм; 2) влияние агрессивной среды на бетонную поверхность шпал; 3) наличие в структуре средней части шпал крупных этрингитных кристаллов, склонных к реструктуризации и присутствие продуктов щелочнокремниевой реакции вокруг аморфных или содержащих аморфный кремнезем, песочных частиц; 4) превышение нормативного коэффициента приведенной щелочности плотной и пористой составляющих цементного камня соответственно в 3,6 и в 3,2 раза; 5) насыщенность поверхности песочных частиц атомами хлора, которые дополнительно ускоряют и инициируют щелочнокремниевую реакцию. **Научная новизна.** Исследователями впервые была применена запатентованная авторская экспресс-методика исследования морфологии и химического состава структурных составляющих бетона. **Практическая значимость.** Применение предлагаемой методики исследования сырьевых материалов и структуры бетона в производственном цикле предприятий позволит предотвратить преждевременное разрушение бетона вследствие действия внутренних факторов.

Ключевые слова: железобетонные шпалы; щебень; песок; цемент; щелочнокремниевая реакция; микроструктура; цементный камень

V. V. KOVALENKO^{1*}, Y. L. ZAYATS^{2*}, P. O. PSHINKO^{3*}

^{1*}Dep. «Management of Projects, Construction and Construction Materials», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 489 07 72, e-mail valusha.kov@yandex.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

^{2*}Dep. «Life Safety», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 81, e-mail zyl41@mail.ru, ORCID 0000-0002-9213-1790

^{3*}Dep. «Construction Manufacture and Geodesy», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. + 38 (095) 742 04 34, e-mail mostoproekt@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4187-5340

THE CAUSES STUDY OF THE PREMATURE DESTRUCTION OF THE CONCRETE SLEEPERS ON THE ZNAMENKA TRACK OF THE IF10 OF THE ODESSA RAILWAY

Purpose. The aim of the paper is to study the factors that led to the premature destruction of concrete sleepers. **Methodology.** The express-method of determining the morphology and chemical composition of structural components in concrete, patented by Dnipropetrovsk National University of Railway Transport was used in the paper. Methodology makes it possible to control the morphology and chemical composition of cement crystals as the weakest link in the structure of composite material – concrete, and to predict, in accordance with the recommendations of the German Scientists, the possibility of structural transformation of cement in the solid state, which determines the durability of the composite material. **Findings.** The mass destruction of concrete sleepers on railways of Ukraine is becoming more frequent every year. Moreover, if such destruction in 2010 appears after 4-5 years of operation, in 2015 it is only after 2-3 years of installing the sleepers on the main railways. The nature of the destruction of concrete sleepers can be noted as many factors influence it. The batches of cement and other raw materials

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

have been investigated before using with the standard methods in accredited laboratories of PAC «Ukrgeolbudm» (Kyiv) and received a positive evaluation for use in the production of concrete sleepers. However, a significant error in experimental data by standard methods not allowed revealing the critical properties of materials that adversely effect on the durability of rail base concrete. According to the research it was determined that the causes of mass destruction of sleepers are: 1) the inhomogeneity of the macrostructure of the concrete, as a consequence of the use of crushed rock of fraction 5-25 mm; 2) the impact of aggressive environment on the surface of the concrete sleepers; 3) the presence of a secondary structure of sleepers of large ettringite crystals prone to restructuring and the presence of alkaline silicic acid reaction products around the amorphous or those containing amorphous silica sand particles; 4) the exceeding of regulatory factor of the reduced alkalinity of dense and porous components of cement stone is respectively to 3.6 and 3.2 times; 5) saturation of the surface of sand particles of chlorine atoms, which are further accelerate and initiate the alkaline silicic acid reaction. **Originality.** The scientists firstly applied the author's proprietary express-method of studying the morphology and chemical composition of the structural components of concrete. **Practical value.** The application of the proposed research methodology and structure of raw materials in the concrete production cycle of enterprises will help to prevent the premature deterioration of concrete as a result of internal factors.

Keywords: reinforced-concrete slippers; crushed ballast; sand; cement; alkaline silicic acid reaction; microstructure; cement brick

REFERENCES

1. Rybkin V.V., Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O., Kovalenko S.V., Yakovliev V.O. Deiaki aspekty tekhnolohichnykh pryomiv vyrobnytstva ta kontroliu ekspluatatsiinoho resursu zalizobetonnykh shpal v Ukraini ta sviti [Some aspects of technological methods of production and control the service life of concrete sleepers in Ukraine and the world]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2012, no. 3/4, pp. 76-81.
2. Rybkin V.V., Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O., Kovalenko S.V., Yakovliev V.O. Doslidzhennia ekspluatatsiinoi stiikosti zalizobetonnykh shpal ta osnovni tekhnolohichni pryomy yii pokrashchennia [A study of the operational stability of concrete sleepers and basic technological methods of its improvement]. *Budivnytstvo Ukrainy – Construction of Ukraine*, 2011, no 4, pp. 19-23.
3. Rybkin V.V., Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O., Lysniak V.P., Yaryshkina L.O., Vasylieva S.V. Doslidzhennia fizyko-khimichnykh vlastyvostei dribnykh zapovniuvachiv dlia vyrobnytstva zalizobetonnykh shpal [Research of physical and chemical properties of small fillers for production of ferro-concrete sleepers]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 140-145.
4. DSTU B V.2.7–46–2010. *Budivelni materialy. Tsementy zahalnobudivelnoho pryznachennia. Tekhnichni umovy* [State Standart B V. 2.7-46-2010. Building materials. Cements for General construction purposes. Specifications]. Kyiv, Ukrarkhbudinform Publ., 2011. 14 p.
5. DSTU B V.2.6–145:2010 (HOST 31384:2008, NEQ). *Konstruktzii budynkiv ta sporud. Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruktzii vid korozii. Zahalni tekhnichni vymohy* [State Standart B V. 2.6-145:2010 (GOST 31384:2008, NEQ). Design of buildings and structures. Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. General technical requirements]. Kyiv, Ukrarkhbudinform Publ., 2010. 52 p.
6. DSTU B V.2.6–57–2008. *Shpaly zalizobetonni poperedno napruzheni dlia zaliznyts kolii 1520 mm. Tekhnichni umovy* [State Standart B V. 2.6-57-2008. The prestressed reinforced concrete sleepers for railway track 1520 mm. Technical specifications]. Kyiv, NDIBK Publ., 2009. 28 p.
7. *Yevropeyskyi standart EN 1504. Materialy i systemy dlia remontu i zakhystu betonnykh konstruktzii* [European standard EN 1504. Materials and systems for repair and protection of concrete structures], 2009. Available at: http://emaco26.ru/d/180619/d/evropeyskiy_standart_en_1504.pdf (Accessed 20 November 2015).
8. Zolotarskiy A.F., Yevdokimov B.A., Isayev N.M. *Zhelezobetonnye shpaly dlya relsovogo puti* [Concrete sleepers for railway track]. Moscow, Transport Publ., 1980. 270 p.
9. Moshchanskiy N.A., Budnikova P.P. *Predstavleniye o prirode mineralnykh vyazhushchikh na osnove periodicheskogo zakona Mendeleeva i ucheniya o metastabilnykh sostoyaniyakh: V knige Trudy soveshchaniya po khimii tsementa* [The idea of the nature of mineral binders on the basis of the periodic law of Mendeleev and the teachings of metastable states: Book Proc. of the meeting on the chemistry of cement]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1956. 518 p.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

10. Pluhin A.A., Pluhin A.M., Romanenko O.V. *Osoblyvshvydkotverdnychyi bezpropariuvalniyi beton* [Especially rapidly solidified concrete without the steam curing], no. a 2011 14838. 2011.
11. *Provedennia doslidzhen po vstanovlenniu prychnyn ruinuвання zalizobetonnykh shpal ta rozrobka rekomendatsii po pidvyshchenniu mitsnosti betonu* [The research conducting on establishment of the reasons of concrete sleepers destruction and the development of recommendations to improve the strength of concrete]. Dnipropetrovsk, 2011. 168 p.
12. Punagin V.N., Pshinko A.N., Rudenko N.N. *Beton v usloviyakh povyshennykh temperatur* [The concrete under the elevated temperatures]. Dnipropetrovsk, Art-Press Publ., 1999. 292 p.
13. Sanitskiy M.A. *Nekotoryye voprosy kristalokhimiі tsementnykh mineralov* [Some problems of the crystal chemistry of cement minerals]. Kyiv, UMK VOYu Publ., 1990. 60 p.
14. *Tekhnichni vkazivky z vykorystannia staroprydatnykh materialiv verkhnoi budovy kolii na zaliznytsiakh Ukrainy: TsP-0150* [Technical guidance on the use of used materials of the permanent way on Railways of Ukraine: TsP-0150]. Kyiv, NKTB TSP UZ Publ., 2006. 56 p.
15. Uman N.I., Svatovskaya L.B., Ovchinnikova V.P. Tverdeniye tsementnykh mineralov pri ponizhennykh temperaturakh [The hardening of cement minerals at low temperatures]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Application*, 1998, no. 5-6, pp. 26-28.
16. Shpynova L.G., Chikh V.I., Sanitskiy M.A. *Fiziko-khimicheskiye osnovy formirovaniya struktury tsementnogo kamnya* [Physico-chemical principles of cement stone structure formation]. Lviv, Vyscha shkola Publ., 1981. 160 p.
17. Shtark I., Vikht B. *Dolgovechnost betona* [Durability of concrete]. Kyiv, Oranta Publ., 2004. 295 p.
18. Galmarini S., Aimable A., Ruffray N., Bowen P. Changes in portlandite morphology with sol-vent composition: Atomistic simulations and ex-periment. *Cement and Concrete Research*, 2011, vol. 41, issue 12, pp. 1330-1338. doi:10.1016/j.cemconres.2011.04.009.
19. Hooto R.D. Current developments and future needs in standards for cementitious materials. *Cement and Concrete Research: Keynote papers from 14th Intern. Congress on the Chemistry of Cement (13.10.–16.10.2015)*, 2015, vol. 78, part A, pp. 165-177. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.022.
20. Klein D.H., Smith M.D. Homogeneous nucleation of calcium hydroxide. *Talanta*, 1968, vol. 15, issue 2, pp. 229-231. doi:10.1016/0039-9140(68)80227-9.
21. Ramachandran V.S., Sereda P.J., Feldman R.F. Mechanism of Hydration of Calcium Oxide. *Nature*, 1964, vol. 201, issue 4916, pp. 288-289. doi:10.1038/201288a0.
22. Tang S.W., Yao Y., Andade C., Li Z.J. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research: Keynote papers from 14th Intern. Congress on the Chemistry of Cement (13.10.–16.10.2015)*, 2015, vol. 78, part A, pp. 143-154. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
23. Scrivener K.L., Juilland P., Monterio P.J.M. Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research: Keynote papers from 14th Intern. Congress on the Chemistry of Cement (13.10.–16.10.2015)*, 2015, vol. 78, part A, pp. 38-56. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.025.
24. Lohmus H., Rani A., Kallavus U., Reiska R. Trend to the Production of Calcium Hydroxide and Precipitated Calcium Carbonate with Defined Properties. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2002, vol. 80, issue 5, pp. 911-919. doi: 10.1002/cjce.5450800514.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. М. Нетесою (Україна); д.т.н., проф. М. В. Савицьким (Україна)

Надійшла до редакції: 8.10.2015

Прийнята до друку: 30.11.2015