

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 691.3:625.142.42

В. В. КОВАЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. ЗАЯЦЬ^{2*}, П. О. ПШІНЬКО^{3*}, С. В. КОВАЛЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, ел. пошта kovalekovv@upr.dnup.edu.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 zyl41@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 mostproekt@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4187-5340

⁴ПП «Логія», вул. Червона, 19-А, Дніпропетровськ, Україна, 49000, тел. + 38 (050) 34 00 716, ел. пошта logiya@ukr.net

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В БЕТОНАХ ПІДРЕЙКОВИХ ОСНОВ

Мета. Робота передбачає виявлення залежності структурних та механічних властивостей бетону від складу застосованих добавок-модифікаторів, характеру змін структурних та механічних властивостей в залежності від строку твердіння бетону контрольних і модифікованих зразків. **Методика.** Застосовані мікроструктурний, фрактографічний, мікрорентгеноспектральний аналізи та фізико-механічні випробування дозволили виявити необхідні залежності. **Результати.** Мікроструктура цементного каменю при рівних умовах підбору бетонних сумішей залежить від складу застосованих сировинних матеріалів та технології виробництва. В роботі досліджуються структурні перебудови під час тужавіння бетонів на жорстких сумішах та вплив складових частин комплексної добавки-модифікатора ПЛКП (виробництва ПП «Логія», м. Дніпропетровськ) на морфологію, дисперсність та хімічний склад цементного каменю. Визначається також механічні характеристики бетону для підрейкових основ. Дослідження структурних та фізико-механічних характеристик контрольних зразків та модифікованих бетонів на різних стадіях тужавіння показали, що застосування гіперпластифікаторів ПЛКП українського виробництва сприяє формуванню наноструктурованого бетону. Додавання у склад добавки на основі суперпластифікаторів прискорювачів твердіння сприяє зменшенню діаметру пучків ниткоподібних кристалів, що збільшує структурну однорідність, стабільність та підвищує комплекс механічних характеристик бетону. Застосування нових полікарбоксилатних добавок ПЛКП у виробництві бетонних сумішей для підрейкових основ дозволяє виключити пропарювання з технології виробництва підрейкових основ. Відсутність сольової складової у добавці сприяє підвищенню довговічності бетону. **Наукова новизна.** В роботі виявлено, що модифікація бетону комплексною добавкою ПЛКП сприяє формуванню найбільш однорідної структури цементного каменю, яка складається з компактних кристалів, оточених ниткоподібними кристалами, які щільно переплетені в поровому просторі. Така структура сприяє максимальним характеристикам міцності бетону при стисненні. При цьому пропарювання за традиційною технологією сприяє збільшенню розмірів первинних етрингітних кристалів, що мають схильність до реструктуризації у процесі експлуатації залізобетонних виробів при температурах близько 20° С. **Практична значимість.** Регулювання технологічних параметрів виробництва підрейкових основ, а саме – зниження температури пропарювання, або вилучення цієї операції із технологічного циклу виготовлення залізобетонних шпал, при використанні добавки ПЛКП дозволяє підвищити структурну однорідність і стабільність, збільшити щільність бетону та в результаті позитивно впливати на його довговічність.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Ключові слова: бетон; мікроструктура цементного каменю; ниткоподібні кристали; строки тужавіння; пропарювання; пластифікатор бетонної суміші; прискорювач тужавіння; підрейкові основи

Вступ

Сучасний стан залізобетонних підрейкових основ в Україні потребує не тільки регулярного оновлення для попередження обмежень у швидкісному режимі потягів, але і має необхідність в реконструкції для впровадження швидкісного руху подібно залізничним транспортним мережам розвинутих країн світу. Для впровадження швидкісного руху наша держава має всі переваги: великий науковий та промисловий потенціали, багаті родовища якісного граніту, річкового та кварцового піску, велику кількість цементних заводів, має сировинну базу для виробництва якісних вітчизняних модифікаторів цементного каменю в бетонах та розвинуту металургійну промисловість. Але застаріла технологія виробництва, відсутність належного контролю за відповідністю показників якості сировинних матеріалів створює іноді проблеми з довговічністю виготовлених в Україні залізобетонних підрейкових основ. Так, за статистичними даними, більше ніж 50 відсотків аварій та сходів вантажних вагонів на перегонах мережі залізниць України пов'язано із станом колійного господарства.

Залізобетонні шпали та безбаластне мостове полотно є найбільш відповідальними за безпечну експлуатацію залізничних колій і безпечний рух поїздів. В умовах їх експлуатації поєднуються значні динамічні навантаження з агресивним впливом оточуючого середовища. Тому, наряду з виключенням причин утворення макроконцентраторів напруження в бетоні підрейкових основ, необхідно збільшувати структурну однорідність як цементного каменю, так і композиційного матеріалу – бетону в цілому, що знижує вірогідність виникнення тріщин, а також попереджує структурні перебудови цементного каменю в процесі експлуатації [2–3, 5, 10, 18–20].

Мета

Дослідження структуроутворення в бетонах з використанням вітчизняних комплексних добавок ПЛКП для виробництва залізобетонних підрейкових основ та виявлення впливу без-

пропарювальної технології на формування цементного каменю та його схильності до рекристалізації в процесі експлуатації.

Об'єктом дослідження були бетони на основі жорстких сумішей на різних стадіях тужавіння, які модифіковані вітчизняною добавкою ПЛКП виробництва ПП «Логія», м. Дніпропетровськ.

Методика

В роботі застосовано макро- та мікроскопічні, фрактографічні та мікрорентгеноспектральні методи дослідження структури цементного каменю та фізико-механічні випробування бетону на різних стадіях тужавіння.

Дослідження в області розробки безпропарювальної технології виробництва бетону для залізничних шпал виконували багато вчених, у тому числі вченими харківської наукової школи [4, 13–14, 16–17]. Основним завданням було підвищення довговічності та надійності бетонних конструкцій шляхом введення 1 % від маси цементу хлориду кальцію та добавки С-3 [4, 13–14, 16]. Застосування хлоридів в добавці дозволяє прискорити процеси твердіння, але при цьому неможливо виключати процеси реструктуризації цементного каменю в процесі експлуатації виробів, які швидко, протягом 1–5 років, руйнують бетон [18].

Іншим альтернативним шляхом є застосування нової технології, яка забезпечує високі фізико-механічні характеристики бетону та водночас попереджує руйнівні процеси як на поверхні, так із середини бетону. Подібні характеристики можна досягнути підвищенням структурної однорідності та дисперсності кристалів цементного каменю за рахунок їх модифікації, зменшуючи капілярну і збільшуючи гелеву пористість. При цьому потрібно виключати можливість введення в бетон сировинних матеріалів, що мають здатність вступати в процесі експлуатації виробів у відносно швидкоплинній хімічній реакції, які створюють нові фазові складові з питомими об'ємними характеристиками такими, що відрізняються від рекристалізованих фаз. Крім того, важливо здійснювати суворий контроль за дотриманням вимог державних

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

стандартів, у тому числі за якістю фракційного розсіву крупних заповнювачів та виключенням із сировинних матеріалів щебеню з кристалами слюди або кальциту, які перевищують розмір граней щебеню, для забезпечення адгезії до цементного каменю [2–3, 5, 18]. Для дрібних заповнювачів, які застосовуються для виробництва шпал в Україні, крім вмісту реакціоспроможного компоненту, необхідно суворо контролювати вміст вапняку та глиноземних грудок, які є концентраторами напруги під час експлуатації підрейкових основ [5].

Таким чином, при виключенні всіх можливих випадків формування структурних макро-неоднорідностей, необхідно забезпечення мікроструктурної однорідності цементного каменю, як найслабшої ланки в композитному складі бетону. Зазначена мета досягається багатьма методами: диспергуванням та модифікацією цементного каменю, зменшенням долі цементу в бетонній суміші, зменшенням застосованої води затворювання за рахунок пластифікуючих добавок. У свою чергу, зменшення долі цементу здійснюється за рахунок або збільшення долі крупних або дрібних заповнювачів, або заміщенням долі піску гранітним відсівом, або застосуванням мінеральних добавок. Подібні прийоми підвищення фізико-механічних властивостей бетону по одному або в комплексі застосовувалися багатьма авторами та сприяли збільшенню довголіття та експлуатаційних якостей бетону [2–5, 12–13, 15–16]. Але необхідні високі фізико-механічні характеристики і довговічність бетону досі актуальні для важко навантажених залізобетонних виробів – підрейкових основ, які працюють в агресивному середовищі при знакоперемінних циклічних навантаженнях та температурах.

Для впровадження нових технологічних розробок в галузі виробництва бетону підрейкових основ необхідно ретельно дослідити можливі ризики впливу добавок на корозійну стійкість арматури і бетону, вивчити вплив значного зниження температури робочої зони пропарювальних установок на структурні та фізико-механічні характеристики бетону.

Отже, в процесі виконання роботи були поставлені такі завдання:

– виявлення впливу хімічних добавок і зміни масових співвідношень сировинних компонентів на структурні і фізико-механічні характеристики бетону;

– виявлення впливу значного зниження температури робочої зони пропарювальних установок на структурні і фізико-механічні характеристики бетону.

З літературних даних з'ясовано, що електроліти на базі сульфатних та роданистих комплексів з додаванням нітратів – складові сольового комплексу хімічної добавки ПЛКП, що прискорюють твердіння, мають або найбільш високу розчинність у воді, як у випадку нітратних складових (рис. 1, а), або значно обмежені температурою розчину, як у випадку сульфатних складових (рис. 1, б).

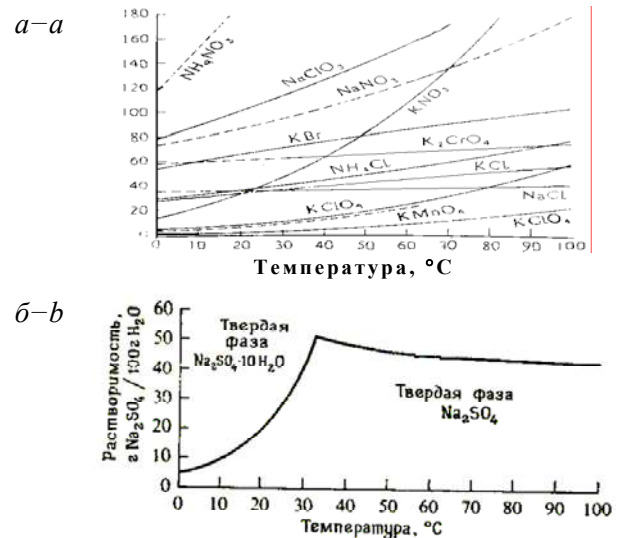


Рис. 1. Розчинність в воді компонентів комплексної добавки ПЛКП, що прискорюють процес тузавіння бетону [15]

Fig. 1. Solubility in water of PLKP complex additives components that accelerate the process of concrete hardening [15]

Якщо однокомпонентні добавки, що містять нітрати, заборонені чинними раніше стандартами до застосування у виробництві попередньо напружених конструкцій залізобетонних основ, то у комплексі з пластифікаторами різного роду, які є інгібіторами корозії металу арматури, при значному зменшенні їх концентрації в складі багатокомпонентної хімічної добавки в бетонному розчині, їх застосування

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

теоретично та технологічно виправдано. Розчинність нитратів в діапазоні температур від 0 до 100 °С досить велика, що сприяє стабільності властивостей будь-якої комплексної добавки, у склад якої вони введені. Та, навпаки, з огляду на залежність розчинності сульфатів у воді залежно від температури (див. рис. 1, б), можна зауважити, що оптимальною температурою дії добавки з сульфатами є температура 33–50 °С.

Але цього не можна сказати про добавки, що містять хлор. Тому що хлор є каталізатором процесів реструктуризації цементного каменю, та при найменших його концентраціях він сприяє передстроковому руйнуванню бетону, який працює в умовах зміни сезонних температур при підвищеній вологості повітря або під атмосферними опадами [18], та його застосування заборонено згідно з ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [8]. Хлорвмістне середовище застосовується для прискорених методів оцінки морозостійкості бетонів [6] та для антибактеріального захисту бетонних споруд [12].

Одним з найважливіших сировинних матеріалів виробництва шпал є цемент. Від відповідності його характеристик нормам стандарту ДСТУ Б.В 2.7-46:2010 [7] залежать структуроутворення під час взаємодії з комплексною добавкою цементного каменю, фізико-механічні характеристики та довговічність залізобетонних виробів. При підвищеній лужності цементу (відносний коефіцієнт лужності $(\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O})$ більший за 0,6 % [7, 8, 18]) в процесі гідратації та під час експлуатації підрейкових основ відбувається реакція хімічної взаємодії луг цементу з кислотами заповнювачами, які за стандартами не повинні містити більше ніж 50 ммоль/л діоксиду кремнію розчинного в лугах [8, 9].

За державним стандартом [8] в портландцементі співвідношення за масою кальцій оксиду до силіцій діоксиду повинно становити не менше ніж 2,0, а масова частка магній оксиду не повинна перевищувати 5 %, вміст сірки у перерахунку на SO_3 не повинен перевищувати 3,5 %, але бути більше ніж 1 % (мас.), глин 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 [8].

Якість цементу Амвросіївського заводу ПЦ І-500 для виробництва залізобетонних шпал перевіряли за фракційним, хімічним складом та активністю. За сертифікатом якості цемент відповідає вказаному стандарту. Перевірка активності цементу виявила відповідність марці портландцементу М400. Оцінка фракційного складу показала, що об'ємний відсоток часток, що більше 80 мкм складає до 6 % (рис. 2), що не перевищує 15 % визначених стандартом [8]. За результатами мікрорентгеноспектрального аналізу, в переважній більшості спектрів вміст алюмінатної фази у перерахунок на окисли Al_2O_3 дорівнює 8,96 % (рис. 3–4).

Вміст алюмінатної фази складає 5–10 % для більшості нормальних цементних клінкерів. Фаза представлена трикальцієвим алюмінатом $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, істотно зміненим за складом, а іноді і за структурою, за рахунок сторонніх іонів, особливо Si^{4+} , Fe^{3+} , Na^+ і K^+ [1], але згідно з ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [7], вміст цієї фази в цементах, які застосовуються у виробництві залізобетонних шпал, не повинен перевищувати 8 %. В нашому випадку кількість вказаної алюмінатної фази складає в середньому 8,96 % (мас.). Алюмінатна фаза швидко реагує з водою і може викликати небажане швидке схоплювання, якщо не доданий контролюючий схоплювання агент [11]. Крім того, ця фаза є швидкокорозійною в лугах і кислотах та за структурними характеристиками гідроксидів є структурно нестабільною. В процесі експлуатації крупні кристали еtringітної фази, яка містить алюміній та сірку, розпадаються на дрібні. В процесі перебудови гідрат-іони переміщуються з утворенням нової фази з новими параметрами кристалічної решітки та втратою структурних зв'язків всередині бетону. З урахуванням наявності хлор-іонів у більшості досліджуваних часток цементу (причому у двох з дев'яти конгломератних часток концентрація хлору перевищує допустимі норми за державним стандартом [8] в 1,9–2,7 разів), реакції реструктуризації фазових складових цементного каменю при 20 °С в процесі експлуатації виробів проходять з прискоренням після насичення водою бетону при коливанні температури близько 0 °С. При цьому хлор виступає як каталізатор реструктуризаційних процесів [18]. В процесі тужавіння бетону (прискореного

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

впродовж 8 діб або подальшого тужавіння) змінюється водневий показник гелевої частини міжкристалічного розчину, який містить розчинний гідроксид кальцію, при цьому змінюється здатність хлорвмістної фази, що реагує з сульфат-іонами, зберігати власну стабільність і призводить до її розкладу. Середня кількість хлору не перевищує допустимі значення стандарту та складає 0,08 % (мас.).

Вміст магнію в цементі відповідає нормам державного стандарту. Приведена лужність цементу перевищує 0,6 % та складає 0,84 %, що не попереджає виникнення лужнокремнієвокислої реакції в процесі експлуатації залізобетонних виробів [18]. При аналізі приведеної лужності не використовували результати аналізу спектру 4 на рис. 4, тому що вони різко відмінні від спектрів інших часток цементу і є аморфною скловидною фазою з великим містом окислів кремнію, алюмінію та натрію, яка значно відрізняється за морфологічними ознаками від інших часток (наявністю округлих форм).

Вміст сірки лише в одному з конгломератів клінкерних часток перевищує норматив стандарту на 1 масовий відсоток, при тому середній вміст сірки за розрахунком на SO_3 складає 1,9 % (мас.).

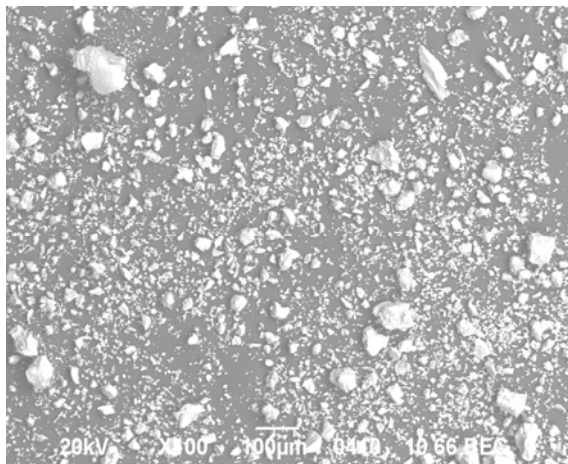
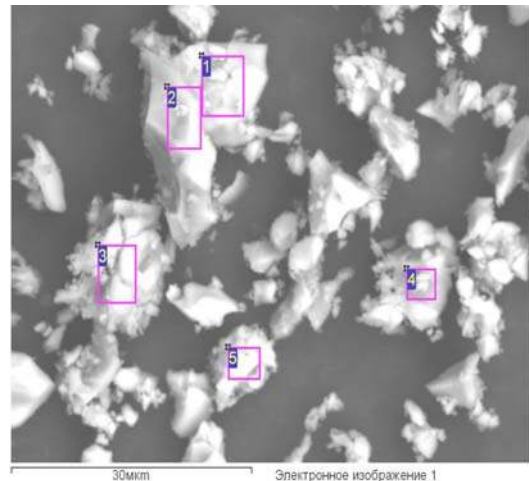


Рис. 2. Вигляд цементу Амвросіївського заводу, $\times 100$

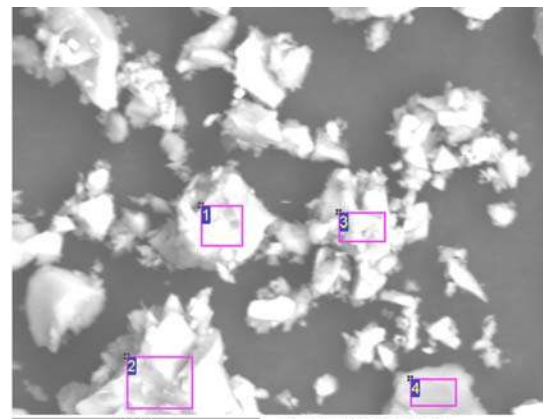
Fig. 2. View of Amvrosiivskiy cement plant, $\times 100$



Спектр % мас	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
1	35,15	0,02	0,24	1,12	10,67	1,06	0,19	0,44	48,67	0,32	2,12
2	47,23	0,28	0,41	0,44	10,75	0,25	0	0,13	39,97	0,03	0,59
3	48,98	0,27	0,18	0,93	1,21	0,92	0,27	0,18	46,06	0	1,07
4	52,22	0,11	0,28	0,76	8,29	1,79	0,01	0,25	35,32	0	0,98
5	40,65	0,34	1,06	10,53	2,52	0,33	0,08	0,4	30,03	0,46	13,59

Рис. 3. Мікроструктура та хімічний склад часток цементу ПЦ І-500, % (мас.).

Fig. 3. The microstructure and chemical composition of cement particles PTS I-500% (wt.).



Спектр % мас	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
1	31,18	0,13	1,01	8,77	3,19	0,67	0,09	0,46	37,24	0,52	16,76
2	42,8	0,3	0,2	7,75	6,36	0,5	0	0,18	36,95	0,22	4,79
3	48,67	0,02	0,28	0,79	9,48	1,12	0	0,36	38,07	0,16	1,05
4	49,6	6,84	0,06	11,52	27,43	0,22	0,08	0,11	3,76	0,11	0,28

Рис. 4. Мікроструктура та хімічний склад часток цементу ПЦ І-500, % (мас.).

Fig. 4. The microstructure and chemical composition of cement particles PTS I-500% (wt.).

З рис. 3–4 видно, що в одному з дев'яти конгломератів цементних часток кількість сірки у перерахунок на SO_3 перевищує норми стандарту [8] на 27,7 %.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Підсумовуючи усі вище перераховані недоліки хімічного складу цементу, при його гідратації можна очікувати утворення переважно крупних кристалів еtringітної фази, яка легко розчиняється у кислотах та лугах, крім того схильна до реструктуризаційних процесів при знакоперемінних температурах та підвищеній вологості, яка має невелику міцність і щільність та на порядок меншу довговічність в залізобетонних виробках підрейкових основ, ніж в аналогічних виробках із звичайного портландцементу. Такий цемент застосовується для швидкісного будівництва збірних залізобетонних конструкцій, які застосовуються для внутрішнього оздоблювання приміщень.

Морфологія і хімічний склад Здолбунівського цементу наведено на рис. 5 та табл. 1. Оцінка фракційного складу показала, що об'ємний відсоток часток, що більше 80 мкм, практично відсутній (рис. 5), що не перевищує 15 % визначених стандартом [8].

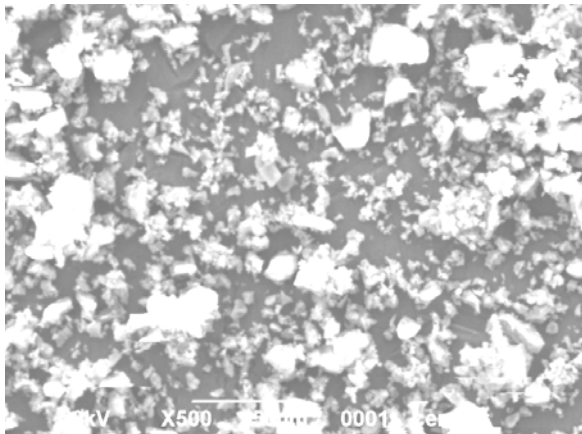


Рис. 5. Мікроструктура цементних часток цементу ПЦ I-500Н виробництва ПрАТ «Волинь-Цемент», ×500

Fig. 5. Microstructure of cement particles of cement PTS I-500N, production of JSC «Volyn-Cement», × 500

З рис. 5 видно, що частки цементу мають високу дисперсність (спостерігається лише один конгломерат у полі зору). Цемент має такий фракційний склад: фракція розмірами біля 30 мкм складає 10 %; 15 мкм – 10 %; 7 мкм – 30 %, та від 0-3 мкм – 50 %. Дрібний розмір фракцій цементу збільшує його реакційну спроможність та пришвидшує процес структуроутворення в бетонах.

Таблиця 1

Хімічний склад послідовно сканованих мікрообластей запресованого цементу ПЦ I-500Н виробництва ПрАТ «Волинь-Цемент»

Table 1

Chemical composition of sequentially scanned microareas of pressed cement PTS I-500N and production of PJSC «Volyn-Cement»

Елемент	Масовий %			
O K	40,97	34,95	41,24	34,76
Na K	0,40	0,44	0,40	0,43
Mg K	0,35	0,44	0,40	0,38
Al K	1,72	1,99	1,81	1,90
Si K	6,63	7,48	6,77	7,31
S K	1,90	2,17	1,96	2,11
K K	0,82	0,86	0,78	0,90
Ca K	44,44	48,44	43,74	49,13
Ti K	0,23	0,29	0,25	0,25
Fe K	2,54	2,94	2,65	2,82
Всього	100,0	100,0	100,0	100,0

Виконані в роботі дослідження показали відповідність цементу більшості показників нормованих діючими стандартами України.

Співвідношення оксидів кальцію та кремнію, наявність хлор-іонів, концентрація алюмінатів у перерахунку на оксид алюмінію (3,5%(мас)), а також фракційний склад цементу відповідають вимогам діючих стандартів.

Середній коефіцієнт приведеної лужності цементу ПЦ I-500Н становить 1,24 %, що більше ніж удвічі перевищує нормативний показник, визначений ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [8]. Вірогідність виникнення лужно-кремнієвокислої реакції в процесі експлуатації залізобетонних виробів з досліджуемого цементу підвищеної лужності посилюється тому, що більшість родовищ річкового піску, застосованого у будівельному виробництві та виробництві спеціальних залізобетонних виробів в Україні, мають більше ніж 50 ммоль/л діоксиду кремнію розчинного в лугах.

Вміст оксиду сірки в цементі складає 5,07 % масових, що перевищує максимальний нормативний показник у 1,45 разу. Сірка входить

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

у склад великих еtringітних кристалів, які на основі щільної матриці рівноосних цементних кристалів знижують структурну однорідність та сприяють утворенню додаткової мікропористості, яка полегшує всмоктування вологи бетоном з атмосферного повітря.

Дослідження виконувалися також на цементі ПЦ І-500Н виробництва ПАТ «Хайдельбергцемент Україна», м. Дніпродзержинськ. Морфологію часток та хімічний склад цементу наведено на рис. 6–7.

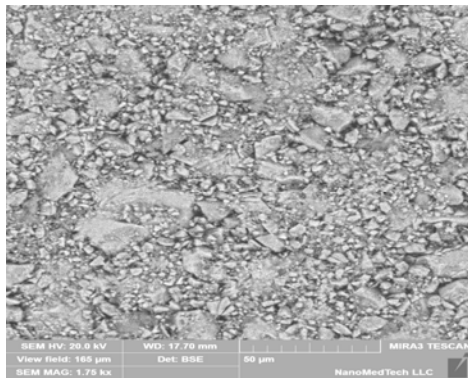
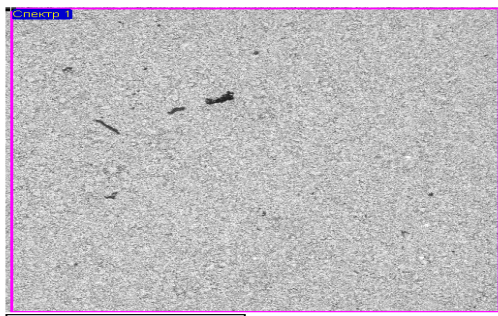


Рис. 6. Морфологія часток цементу ПЦ І-500 виробництва ПАТ «Хайдельбергцемент Україна», Дніпродзержинськ, $\times 1750$

Fig. 6. Cement PTS I-500N particles morphology in production of PJSC «Heidelbergcement Ukraine», Dniprodzerzhynsk, $\times 1750$



Спектр, мас.%,	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
Спектр 1	70.80	0.37	1.06	1.47	5.08	1.25	0.35	18.99	0.64

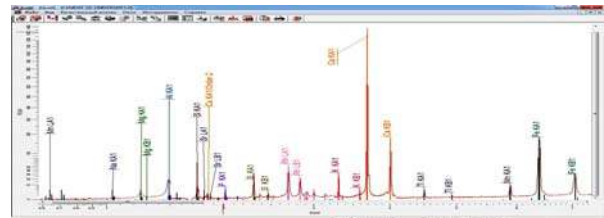
Рис. 7. Хімічний склад часток цементу ПЦ І-500 виробництва ПАТ «Хайдельбергцемент Україна», м. Дніпродзержинськ, % (мас.)

Fig. 7. The chemical composition of cement particles PTS I-500N, production of PJSC «Heidelbergcement Ukraine», Dniprodzerzhynsk, % (wt.)

Як видно з рис. 6–7, крупні фракції цементного порошку подані частками розміром близько 25 мкм, об'ємна частка яких сягає 10 %, ча-

стки розміром близько 10 мкм присутні в порошок в об'ємі 25 %. Хімічний аналіз зразку цементу показав, що приведений коефіцієнт лужності складає 0,57 %, що задовольняє вимогам попередження швидкоплинної лужнокремнієвокислої реакції в бетоні, що експлуатується.

Якісний та безстандартний кількісний аналіз цементу виконували за допомогою дифрактометру D2PHASER. Зразки без додаткової обробки поміщали в заглиблення кювети з органічного скла. Рентгенограма знімалася з обертанням 20 об/хв з кроком 0,02 в інтервалі кутів 8-650 2θ з витримкою 1 с. Моделювання рентгенограми виконували за допомогою програми безстандартного кількісного аналізу TOPAS.



C3S 23.95%; C3S 31.61%; C2S_beta 16.60%; C3A_cubic 2.68%; C3A_orthorhombic 1.28%; C4AF 13.52%; Portlandite 1.34%; Periclase 0.25%; Quartz 0.21%; Arcanite 0.72%; Aphthitalite 1.25%; Bassanite 2.23 %; Calcite 4.36 %.

Рис. 8. Якісний та кількісний аналізи цементу ПАТ «Хайдельбергцемент Україна» за допомогою дифрактометру D2PHASER

Fig. 8. Qualitative and quantitative analysis of cement from PJSC «Heidelbergcement Ukraine» with a diffractometer D2PHASER

Як видно з рис. 8, якісний хімічний склад цементу є міцними мінералами C2S beta 16.60%; C3S (23.95% мас.) та C3S (31.61 % мас.), але формування хімії та морфології цементного каменю залежить від модифікуючого впливу хімічних добавок, які змінюють співвідношення в напрямку збільшення частки фаз з максимальною міцністю.

Структурування бездобавочних бетонів на ранніх стадіях тужавіння досліджували способом дегідратації зразків бетону зруйнованих на 3, 7, та 28 добу з аналізом структурних характеристик в комплексі з механічними властивостями. Формування структури цементного каменю зразка бетону без застосування добавок

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

на різних етапах тужавіння показало, що підвищений вміст алюмінатної фази в цементі провокує утворення великих кристалів еtringіту та зниження міцності бетону на 28 добу. Морфологія та хімічний склад фаз, що переважно утворюються в зразку, говорять про низьку щільність бетону, формування переважно водонепроникної капілярної пористості та мікропористості.

Вищесказане у комплексі з підвищеною приведеною лужністю цементу призведе в процесі експлуатації до передчасної руйнації бетону в агресивному середовищі із знакоперемінними навантаженнями та температурами навколишнього середовища.

Розглянемо структурні та механічні характеристики бетонів залежно від застосованих комплексних модифікаторів на основі суперпластифікаторів та електроліту.

Структурні характеристики бездобавочного бетону на початкових стадіях тужавіння переважно є блочними кристалами портландиту з невеликою кількістю цементного гелю, які формуються із значною кількістю капілярних пор (рис. 9).

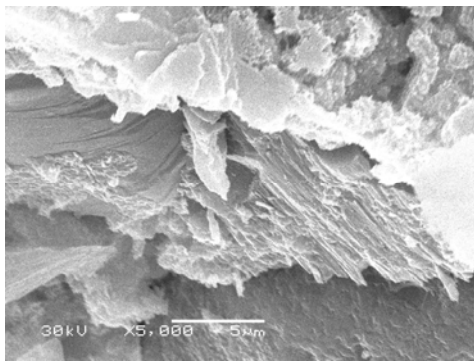


Рис. 9. Морфологія цементного каменю бездобавочного бетону на основі портландцементу марки ПЦ I 500Н (28 доба тужавіння), $\times 5000$

Fig. 9. The morphology of the cement stone without additional concrete based on Portland cement PTS I 500N (the 28th day of hardening), $\times 5000$

Додавання до бетонної суміші добавки на основі полінафталінсульфонатів значно збільшує в структурі частку пластинчастих кристалів. В об'ємному співвідношенні ця частка сягає 60–70 %, залишок наполовину формується з блочних кристалів портландиту та цементного гелю (рис. 10). Таке співвідношення структурних складових сприяє підвищенню кріхкості

бетону в напрямку площин утворених кристалів і, крім того, необхідно відмітити, що плоскі гідрокристаліти не мають максимальних характеристик міцності.

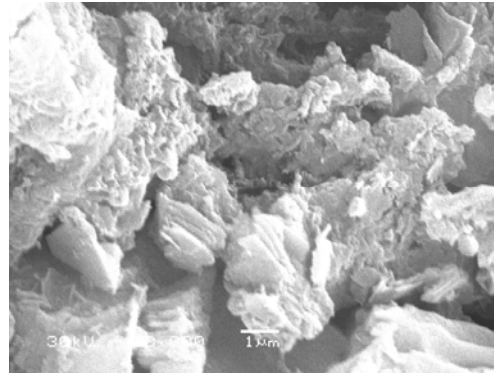


Рис. 10. Морфологія цементного каменю на основі портландцементу марки ПЦ I 500Н модифікованого полінафталінсульфонатною добавкою (28 доба тужавіння), $\times 10000$

Fig. 10. Morphology of cement stone of concrete based on Portland cement PTSC 500N of modified polynaphthalenesulfonate addition (the 28th day of hardening), $\times 10000$

Формування бетонної суміші з розріджувачами бетону на основі солей роданіду та тіосульфату натрію, пластифікатора на основі фрагментів полікар-боксилатних ланцюжків у сукупності з полінафталінсульфонатом дозволяє отримувати механічні характеристики порівнянні з такими, що утворилися в бетонах модифікованих полікарбоксилатом, але подібні комплекси не в змозі достатньо знизити водоцементне співвідношення. За рахунок цього структура сформована на основі вищезгаданого комплексу хоча і складається переважно з голкоподібних цементних кристалів діаметрами близько 50–100 нм, але має у складі плескати кристали зі зниженою міцністю, по площі яких можуть утворюватися руйнівні тріщини (рис. 11).

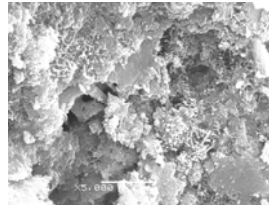
Морфологія структурних складових бетону підрейкових основ на цементі виробництва ПРАТ «Хайдельбергцемент Україна» та полікарбоксилатної добавки ПЛКП наведена на рис. 12.

Як видно з рис. 12, середній діаметр пучків ниткоподібних кристалів цементного каменю, сформованих на першу добу тужавіння в бетоні шпал на основі цементу ПЦ-500 Н виробництва

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

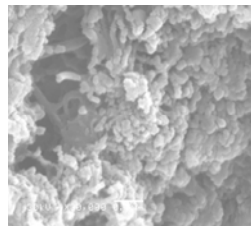
ПАТ «Хайдельбергцемент Україна», знаходиться у межах від 15 до 60 нм, причому переважна частка кристалів (до 90 % об'єм) має діаметр 45 нм.

a–a



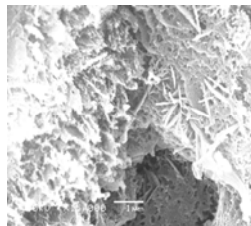
× 5000

б–b



× 30000

с–с



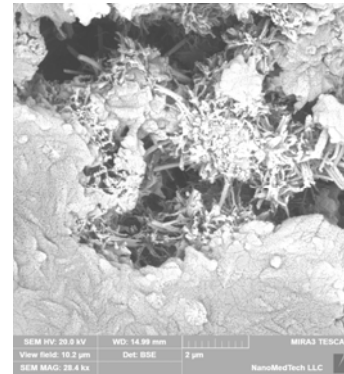
× 15000

Рис. 11. Морфологія структурних складових цементного каменю бетону модифікованого комплексом солей роданіду та тіосульфату натрію, пластифікатором на основі фрагментів полікарбоксилатних ланцюжків у сукупності з полінафталісульфонатом на 28 добу тужавіння:
a, б – склад добавки із збільшеною часткою суперпластифікаторів; *в* – склад добавки із збільшеною часткою солей

Fig. 11. Morphology of structural components of concrete cement stone modified with rhodanite nitrate and sodium thiocyanate complex, a plasticizer based on fragments of polycarboxylate chains together with polynaphthalenesulfonates after the 28th day of hardening:

a, b – the composition of additives with increased part of superplasticizers; *c* – the composition of additives with increased part of nitrate

a–a



б–b

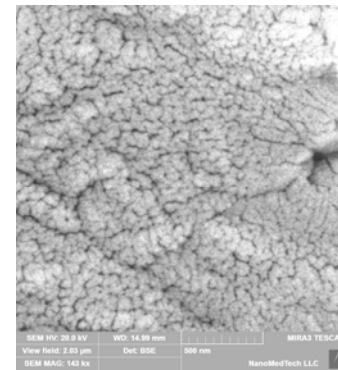


Рис. 12. Морфологія структурних складових цементного каменю бетону модифікованого комплексною добавкою на основі полікарбоксилатів ПЛКП -1 на 1 добу тужавіння:

a – формування кристалів цементного каменю з надлишком води з утворенням кольматованого порового простору, ×28400; *б* – пучки ниткоподібних кристалів в перерізі, ×143000

Fig. 12. Morphology structural components of concrete cement stone modified with complex additive based on polycarboxylates PLKP -1 for the 1st day of hardening:

a – crystals formation of cement stone with water excess with colmated pore space, × 28400; *б* – beams of fibrous crystals in section, × 143000

Хімічний склад цементного каменю бетону з добавкою ПЛКП-1 на першу добу тужавіння має задовільні характеристики за всіма показниками, а особливо за приведеною лужністю цементного каменю, яка складає 0,53 % (мас) (рис. 13).

При цьому в цементному камені відсутній хлор, що сприятиме підвищенню довговічності цементного каменю підрейкових основ.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

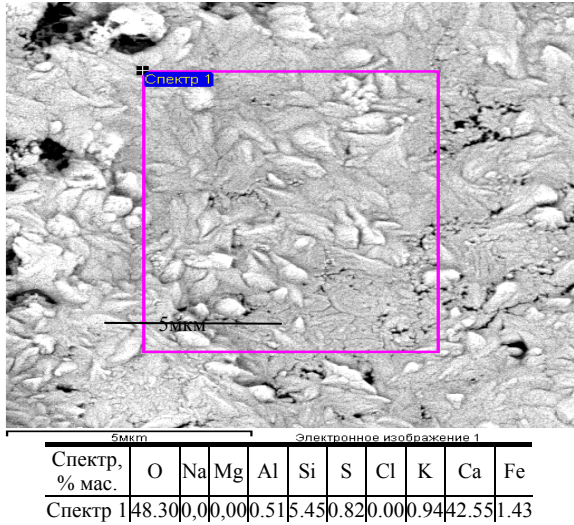


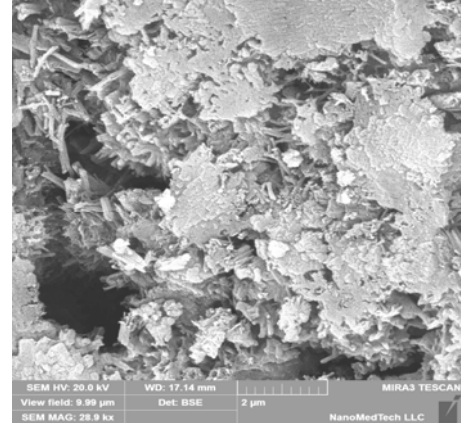
Рис. 13. Хімічний склад цементного каменю бетону з добавкою ПЛКП -1 на першу добу тужавіння

Fig. 13. The chemical composition of concrete cement stone with the addition PLKP – after the 1st day of hardening

Під час формування структури бетону з добавкою ПЛКП-1 на першу добу тужавіння при температурі 20 °С міцність на стиснення дорівнює 41,5 МПа (рис. 14, *a*), а на 28 добу тужавіння утворюється щільний бетон з ниткоподібних нанокристалів, які формують пучки загальними діаметрами до 118,44 нм (рис. 14, *б*). Нанокристали та їх пучки утворюють щільні сплетені масиви з гелевою пористістю. Така структура сприяє значному збільшенню не тільки характеристик міцності, морозостійкості, водонепроникності, а й краще працює при деформації на вигін. Деформація на вигін може виникати не тільки під час штатних режимів експлуатації, а й під час підбивання шпал на магістральних коліях.

Завдяки високій щільності бетону, яка дозволяє отримувати міцність на стискання на 28 добу 76 МПа, кольматовані пори концентрують навкруги себе усі елементи з невеликими діаметрами іонів, що протидіє вилугуванню бетону. Підвищена концентрація магнію поблизу невеликих кольматованих пор сприяє збільшенню локальних характеристик міцності структурних складових цементного каменю (рис. 15).

a–a



б–б

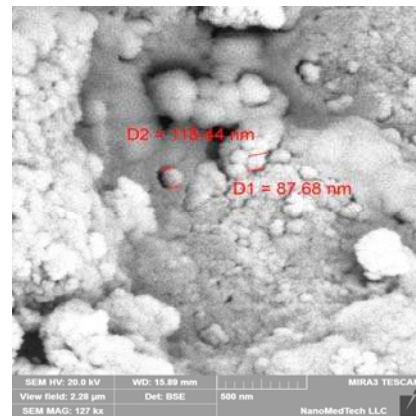


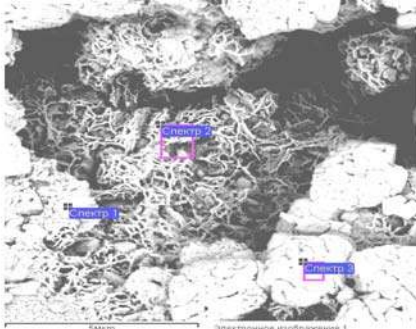
Рис. 14. Морфологія кристалів цементного каменю, модифікованого добавкою ПЛКП-1 на першу (*a*, $\times 28900$) та 28 (*б*, $\times 127000$) добу тужавіння

Fig. 14. Crystals morphology of cement stone, modified with the addition PLKP-1 after the first (*a*, $\times 28900$) and the 28th (*б*, $\times 127000$) days of hardening

Діаметри ниткоподібних кристалів, що кольматують пори, дорівнюють 52,0–63,5 нм (рис. 16).

Особливості структурних характеристик модифікованого цементного каменю підтверджуються механічними характеристиками. Так, наприклад, додавання до контрольного бездобавочного зразка бетону комплексу солей на основі роданіду натрію, тіосульфатів та сульфатів натрію сприяє витонченню голкоподібних кристалів, що підвищують міцність на стиск у ранні строки тужавіння на першу добу в 1,7 разу, на сьому добу – в 1,2 разу, а на 28 добу практично відсутня різниця міцності контрольного та зразка з добавкою сольового комплексу.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО



Спектр, %мас	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Спектр 1	52.39	1.66	1.47	2.93	16.61	0.00	0.00	2.48	20.47	2.00
Спектр 2	53.01	0.72	1.02	2.10	18.67	0.00	0.00	1.92	19.92	2.66
Ст.3	57.82	1.67	0.00	0.76	3.83	0.00	0.00	0.78	33.76	1.38

Рис. 15. Хімічний склад кристалів цементного каменю поблизу кольматованих пор в зразку бетону, модифікованого добавкою ПЛКП-1 на 28 добу тужавіння

Fig. 15. Chemical composition of crystals in cement stone near colmated pores in the concrete sample, modified with additive PLKP-1 after the 28th day of hardening

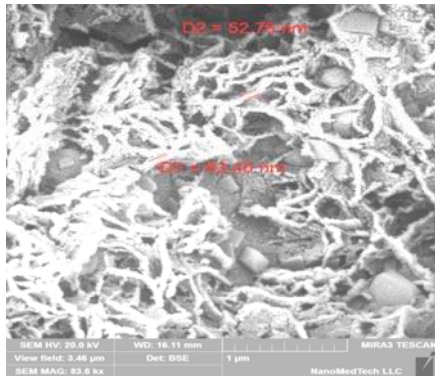


Рис. 16. Морфологія кристалів цементного каменю поблизу кольматованих пор в зразку бетону, модифікованого добавкою ПЛКП-1 на 28 добу тужавіння

Fig. 16. Crystals morphology of cement stone near colmated pores in the concrete sample, modified with PLKP-1 additive after the 28th day of hardening.

Додавання в бетонну суміш комплексів суперпластифікаторів та солей в бетонну суміш з вмістом Амвросіївського цементу 380 кг/м^3 бетону дозволило отримати міцність на 2 добу – 43,7 МПа, 3 добу – 53,7 МПа, на 7 добу – 61,3 МПа та 28 добу – 71,5 МПа.

При застосуванні в бетонній суміші для виготовлення шпал Здолбунівського цементу з комплексом гіперпластифікаторів виробництва ПП «Логія», м. Дніпропетровськ, дозволяє

отримати на першу добу тужавіння міцність на стиск 39 МПа, на 7 добу – 64,6 МПа та на 28 добу – 73,3 МПа. При цьому пропарювання за традиційними режимами при 60°C дозволяє отримати міцність на стиск 56,7 МПа.

Цемент Дніпродзержинського виробництва при концентрації 350 кг/м^3 бетону в бетонній суміші з модифікатором ПЛКП-1 Дніпропетровського виробника дозволяє отримати міцність на першу добу тужавіння 41,6 МПа, на третю добу – 61,9 МПа, сьому – 69,1 МПа та 28 добу – 76 МПа. Такі характеристики якості бетону задовольняють вимогам для підрейкових основ для швидкісного руху. Технологія виробництва дозволяє економити 150 кг цементу на м^3 бетону, економити газ та електричну енергію, які за традиційною технологією використовувалися у виробництві підрейкових основ. Крім того, завдяки новій технології виробництва підвищується структурна однорідність і стабільність, а також дисперсність цементного каменю, що попереджає структурні перетворення під час експлуатації підрейкових основ і їх передчасне руйнування.

Наукова новизна та практична значимість

Дослідження в цій роботі полягає в аналізі можливості застосування цементів різних виробників для виробництва підрейкових основ, аналізі впливу добавок на основі різних складових та обґрунтуванні необхідності застосування найбільш оптимальних в'язучих та добавок-модифікаторів для отримання найбільш високих фізико-механічних характеристик на 28 добу тужавіння та попередження структурних перетворень в процесі експлуатації залізобетонних виробів. Застосування нової технології виробництва бетону підрейкових основ дозволяє економити 150 кг цементу на м^3 бетону, економити газ та електричну енергію, що нині використовуються для пропарювання залізобетонних виробів.

Полягає у вперше отриманих результатах досліджень про вплив вітчизняних гіперпластифікаторів на структуроутворення та фізико-механічні характеристики бетонів на основі жорстких сумішей. Виявлення морфологічних особливостей цементного каменю на основі цементів різних вітчизняних виробників модифікованого вітчизняними комплексними добав-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ками на основі різних хімічних комплексів дозволяє пояснити їх механізм впливу на експлуатаційні характеристики бетону.

Висновки

Підсумовуючи отримані результати досліджень можна зробити висновки:

1. Використання полікарбоксилатної добавки виробництва ПП «Логія», м. Дніпропетровськ, яка не містить сольового комплексу, дозволяє при нормальних умовах твердіння (20° С) отримувати розопалубочну міцність шпального бетону на першу добу тужавіння та більше 70 МПа на 28 добу твердіння з цементу близько 350 кг/м³ бетону. Добавка не знижує довговічність підрейкових основ.

2. Формування наноструктурованого цементного каменю під час модифікування бетонної суміші добавкою ПЛКП сприяє збільшенню міцності на вигін, водонепроникності та морозостійкості бетону підрейкових основ.

3. Доцільність використання цементу ПЩ І-500Н виробництва ПАТ «Хайдельбергцемент Україна», м. Дніпродзержинськ в поєднанні з добавкою ПЛКП для виробництва залізобетонних шпал зумовлена її позитивним впливом на довговічність бетону за умов дотримання приведеної лужності цементу менше ніж 0,6 % (мас).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бутт, Ю. М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев. – Москва : Высш. шк., 1980. – 237 с.
- 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 можливості виробництва залізобетонних шпал за безпропарювальною технологією / А. А. Пługін, А. М. Пługін, О. В. Романенко [та ін.] // Удосконалення конструкції заліз. колії та системи ведення колійного господарства : зб. наук. пр. / Укр. держ. акад. заліз. трансп. – Харків, 2008. – Вип. 91. – С. 211–224.
- 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.2.7-49-96 (ГОСТ 10060.2-95). Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. – Київ : Укрархбудінформ, 1996. – 9 с.
- ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови / Держ. ком. з буд-ва, архіт. та житл. політики України. – Київ : Вид-во стандартів, 2010. – 20 с.
- ДСТУ Б В.2.6-145:2010 (ГОСТ 31384:2008, NEQ). Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги. – Київ : Укрархбудінформ, 2010. – 56 с.
- ДСТУ Б В.2.7-75-98. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови / Держ. ком. з буд-ва, архіт. та житл. політики України. – Київ : Вид-во стандартів, 1999. – 14 с.
- Коваленко, В. В. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал на Знам'янській дистанції колії ПЧ 10 Одеської залізниці / В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, П. О. Пшінько // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 149–163. doi: 10.15802/stp2015/57100.
- Кузнецова, Т. В. Алюминатные и сульфатные цементы / Т. В. Кузнецова. – Москва : Стройиздат, 1986. – 208 с.
- Пат. 18368 Україна, МПК С 04 В 22/08 (2006.01). Будівельна суміш / Пшінько О. М., Коваленко С. В., Шейніч Л. О., Заяць Ю. Л., Коваленко В. В., Щербіна С. П., Решетняк Т. П.; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. – № u200603788; заявл. 06.04.2006; опубл. 15.11.2006, Бюл. №1/2006. – 2 с.
- Пат. 99426 Україна, МПК G 01 N № 33/38 (206.01), С 04 В 28/00. Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон / Пługін А. А., Пługін А. М., Романенко О. В. [та ін.] ; заявник та патентовласник Укр. держ. акад. заліз. трансп. – № а 2011 14838; заявл. 14.12.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15. – 20 с.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

14. Пат. 71208 А Україна, МПК 7 С 04 В 28/12. Суперпластифікована цементно-водна суспензія СПЦВС для цементної гірських порід і будівельних конструкцій / Пругін А. М., Пругін А. М., Калінін О. А. [та ін.] ; заявник та патентовласник Укр. держ. акад. заліз. трансп. – № 20031210920 ; заявл. 02.12.2003 ; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11. – 6 с.
15. Полинг, Л. Химия / Л. Полинг, П. Полинг. – Москва : Мир, 1978. – 686 с.
16. Романенко, О. В. Фізико-хімічні дослідження цементного каменю з добавками суперпластифікатора та прискорювача твердіння / О. В. Романенко // Зб. наук. пр. / Укр. держ. акад. заліз. трансп. – Харків, 2012. – Вип. 130. – С. 40–49.
17. Сорочка довголіття / Магістраль. – 2013. – 13 січ. – С. 7.
18. Штарк, Й. Долговечность бетона / Й. Штарк, В. Бернд. – Киев : Оранта, 2004. – 301 с.
19. Recent durability studies on concrete structure / S. W. Tang, Y. Yao, C. Andrade, Z. J. Li // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 78, pt. A. – P. 143–154. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
20. Scrivener, K. L. Advances in understanding hydration of Portland cement / K. L. Scrivener, P. Juilland, P. J. M. Monteiro // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 78, pt. A. – P. 38–56. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.025.

В. В. КОВАЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. ЗАЯЦ^{2*}, П. А. ПШИНЬКО^{3*}, С. В. КОВАЛЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, эл. почта kovalekovv@upr.diiit.edu.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 mostproekt@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4187-5340

⁴ЧП «Логия», ул. Красная, 19-А, Днепропетровск, Украина, 49000, тел. + 38 (050) 34 00 716, эл. почта logiya@ukr.net

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В БЕТОНАХ ПОДРЕЛЬСОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Цель. Работа предполагает выявление зависимости структурных и механических свойств бетона от состава применяемых добавок-модификаторов, характера изменений структурных и механических свойств в зависимости от срока твердения бетона контрольных и модифицированных образцов. **Методика.** Примененные микроструктурные, фрактографические, микрорентгеноспектральные анализы и физико-механические испытания позволили выявить необходимые зависимости. **Результаты.** Микроструктура цементного камня при равных условиях подбора бетонных смесей зависит от состава применяемых сырьевых материалов и технологии производства. В работе исследуются структурные перестройки во время схватывания бетонов на жестких смесях и влияние составных частей комплексной добавки-модификатора ПЛКП (производства ООО «Логия», г. Днепропетровск) на морфологию, дисперсность и химический состав цементного камня, а также механические характеристики бетона для подрельсовых оснований. Исследование структурных и физико-механических характеристик контрольных образцов и модифицированных бетонов на различных стадиях твердения показали, что применение гиперпластификатора ПЛКП украинского производства способствует формированию наноструктурированного бетона. Добавление в состав добавки на основе суперпластификаторов ускорителей твердения способствует уменьшению диаметра пучков нитевидных кристаллов, увеличивает структурную однородность, стабильность и повышает комплекс механических характеристик бетона. Применение новых поликарбонат-боксилатных добавок ПЛКП в производстве бетонных смесей для подрельсовых оснований позволяет исключить пропаривание из технологии производства подрельсовых оснований. Отсутствие солевой составляющей в добавке способствует повышению долговечности бетона. **Научная новизна.** В работе выявлено, что модификация бетона комплексной добавкой ПЛКП способствует формированию наиболее однородной структуры цементного камня, которая состоит из компактных кристаллов, окруженных нитевидными кристаллами, которые плотно переплетены в поровом пространстве. Такая

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

структура способствует максимальной характеристике прочности бетона при сжатии. Причем пропаривание по традиционной технологии способствует увеличению размеров первичных этрингитных кристаллов, имеющих склонность к реструктуризации в процессе эксплуатации железобетонных изделий при температуре около 20° С. **Практическая значимость.** Регулирование технологических параметров производства подрельсовых оснований, а именно – снижение температуры пропаривания или изъятия этой операции с технологического цикла изготовления железобетонных шпал, при использовании добавки ПЛКП позволяет повысить структурную однородность и стабильность, увеличить плотность бетона и в результате положительно влиять на его долговечность.

Ключевые слова: бетон; микроструктура цементного камня; нитевидные кристаллы; сроки схватывания; пропаривание; пластификатор бетонной смеси; ускоритель схватывания; подрельсовые основания

V. V. KOVALENKO^{1*}, YU. L. ZAYATS^{2*}, P. O. PSHINKO^{3*}, S. V. KOVALENKO⁴

^{1*}Dep. «Life Safety», 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 kovalekovv@up.dit.edu.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

⁴PE «Lohiia», Chervona St., 19-A, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49000, tel. + 38 (050) 34 00 716, e-mail logiya@ukr.net

STRUCTURE FORMATION IN FOUNDATION SLAB CONCRETE

Purpose. The work involves identifying the dependence of structural and mechanical properties of the concrete on the composition of used modifier additives, the nature of changes of structural and mechanical properties depending on the period of concrete hardening of test and modified samples. **Methodology.** The applied microstructural, fractographic, microprobe analyses and physico-mechanical tests revealed the required dependencies. **Findings.** The microstructure of the cement stone under equal conditions of concrete mix selection depends on the composition of used raw materials and production technology. This paper investigates the structural changes in the setting time of hard mixture concrete and effect of component parts of the complex modifier additive PLKP (produced by «Logia», Dnepropetrovsk) on morphology, dispersion and chemical composition of the cement stone, as well as the mechanical characteristics of concrete for the foundation slab. The study of the structural and physical-mechanical characteristics of the test samples and modified concrete at various hardening stages showed that the use Ukrainian hyperplasticizer PLKP contributes to the formation of nano-structured concrete. The addition of hardening accelerators to the super-plasticizer additive reduces the diameter of crystal whiskers, increases the structural homogeneity and stability and improves the complex of the concrete mechanical characteristics. Application of new PLKP polycarboxylate additives in the production of concrete mixtures for the foundation slab allows eliminating the steaming from the foundation slab production technology. The absence of salt component in the additive improves the concrete durability. **Originality.** The paper showed that modification of the concrete with complex additive PLKP facilitates the formation of the most homogeneous structure of cement stone, which consists of compact crystals surrounded by fibrous crystals that are tightly intertwined in the pore space. This structure contributes to the maximum characteristics of the concrete compressive strength. Herewith the steaming by traditional technology helps to increase the size of the primary ettringite crystals having a tendency to restructure during the operation of concrete products at temperatures of around 200°C. **Practical value.** Adjustment of foundation slab production parameters, namely – steaming temperature reduction or elimination of this operation from the concrete sleeper production cycle, using PLKP additives, can improve the structural homogeneity and stability, increase the density of the concrete and result in positive effect on its durability.

Keywords: concrete; cement stone microstructure; fibrous crystals; setting time; steaming; concrete plasticizer; setting accelerator; foundation slab

REFERENCES

1. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. *Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov* [Chemical technology of cementing agent]. Moscow, Vyssaya shkola Publ., 1980. 237 p.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

2. Rybkin V.V., Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O., Kovalenko S.V., Yakovliev V.O. Deiaki aspekty tekhnolohichnykh pryiomiv vyrobnytstva ta kontroliu ekspluatatsiinoho resursu zalizobetonnykh shpal v Ukraini ta sviti [Some aspects of technological methods of production and control for operational lifetime of concrete sleepers in Ukraine and abroad]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2012, no. 3/4, pp. 76-81.
3. Rybkin V.V., Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O., Kovalenko S.V., Yakovliev V.O. Doslidzhennia ekspluatatsiinoi stiiokosti zalizobetonnykh shpal ta osnovni tekhnolohichni pryioomy yii pokrashchennia [Research the operational stability of the concrete sleepers and main constructions techniques of its improvement]. *Budivnytstvo Ukrainy – Construction of Ukraine*, 2011, no. 4, pp. 19-23.
4. Pluhin A.A., Pluhin A.M., Romanenko O.V., Yakovliev V.O., Borziak O.S., Pluhin O.A., Dudin O.A. Doslidzhennia mozhyvosti vyrobnytstva zalizobetonnykh shpal za bezpropariuvalnoiu tekhnolohiieiu [Study the possibility for production of concrete sleepers with non-steam technology]. *Zbirnyk naukovykh prats «Udoskonalennia konstruksii zaliznychnoi kolii ta systemy vedennia koliihnoho hospodarstva»* [Proc. «Improvement of the railway track construction and track facility policy»]. Kharkiv, 2008, issue 91, pp. 211-224.
5. Rybkin V.V., Kovalenko V.V., Zayats Yu.L., Pshinko P.O., Lisniak 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.
6. DSTU B V.2.7-49-96 (HOST 10060.2-95). *Budivelni materialy. Betony. Pryskoreni metody vyznachennia morozostiiokosti pry bahatorazovomu zamorozhuvanni ta vidtavanni* [State Standard of Ukraine B V.2.7-49-96 (State Standard 10060.2-95). Building materials. Concrete. Accelerated methods for determination frost resistance after repeated freezing and thawing]. Kyiv, Ukrarkhbudininform Publ., 1996. 9 p.
7. DSTU B V.2.7-46:2010. *Budivelni materialy. Tsementy zahalnobudivelnoho pryznachennia. Tekhnichni umovy* [State Standard of Ukraine B V.2.7-46:2010. Building materials. Cements for general purposes. Specifications]. Kyiv, Vydavnytstvo standartiv Publ., 2010. 20 p.
8. DSTU B V.2.6-145:2010 (HOST 31384:2008, NEQ). *Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruksii vid korozii. Zahalni tekhnichni vymohy* [State Standard of Ukraine B V.2.6-145:2010 (State Standard 31384:2008, NEQ). Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. General specifications]. Kyiv, Ukrarkhbudininform Publ., 2010. 56 p.
9. DSTU B V.2.7-75-98. *Shchebin i hravii shchilni pryrodni dlia budivelnnykh materialiv, vyrobiv, konstruksii i robit. Tekhnichni umovy* [State Standard of Ukraine B V.2.7-75-98. Crushed stone and gravel for dense natural building materials, products, structures and operations. Specifications]. Kyiv, Vydavnytstvo standartiv, 1999. 14 p.
10. Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O. Doslidzhennia prychnyn peredchasnoho ruinuvannia zalizobetonnykh shpal na Znamianskii dystantsii kolii PCh 10 Odeskoi zaliznytsi [The causes study of the premature destruction of the concrete slippers on the Znamenka track of the IS 10 of the Odessa railway]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 6 (60), pp. 149-163. doi: 10.15802/stp2015/57100.
11. Kuznetsova T.V. *Alyuminatnyye i sulfatnyye tsementy* [Aluminate and sulphate cements]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 208 p.
12. Pshinko O.M., Kovalenko S.V., Sheinich L.O., Zaiats Yu.L., Kovalenko V.V., Shcherbina S.P., Reshetniak T.P. *Budivelna sumish* [Structural mixes]. Patent Ukraine, no. u200603788, 2006.
13. Pluhin A.A., Pluhin A.M., Romanenko O.V. *Osoblyvshvydkotverdnuchyi bezpropariuvalnyi beton* [Especially rapidly solidified concrete without the steam curing]. Patent Ukraine, no. 33/38 (206.01), C 04 B 28/00, 2012.
14. Pluhin A.M., Pluhin A.M., Kalinin O.A. *Superplastyfikovana tsementno-vodna suspenziia SPTsVS dlia tsementatsii hirskykh porid i budivelnnykh konstruksii* [Superplasticizer cement-water slurry SPTSVS for cementation of rocks and building structures]. Patent Ukraine, no. 20031210920, 2004.
15. Poling L., Poling P. *Khimiya* [Chemistry]. Moscow, Mir Publ., 1978. 686 p.
16. Romanenko O.V. Fyzyko-khimichni doslidzhennia tsementnoho kameniu z dobavkamy superplastyfikatora ta pryskoriuvacha tverdinnia [Physics and chemical studies of a cement stone with superplasticizer's additives and hardening accelerator]. *Zbitnyk naukovykh prats* [Proceedings]. Kharkiv, 2012, issue 130, pp. 40-49.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

17. Sorochka dovhollittia [Longevity Shirt]. *Mahistral – Highway*, 2013, 13 March, 7 p.
18. Shtark Y., Bernd V. *Dolgovechnost betona* [Durability of Concrete]. Kiev, Oranta Publ., 2004. 301 p.
19. Tang S.W., Yao Y., Andrade C., Li Z.J. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research*, 2015, vol. 78, part A, pp. 143-154. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
20. Scrivener K.L., Juilland P., Monteiro P.J.M. Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 2015, vol. 78, part A, pp. 38-56. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.025.

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

Надішла до редколегії: 04.01.2016

Прийнята до друку: 17.04.2016