

doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-155-167

УДК 691.32

Плугін А.А.¹, Калюжна О.В.¹, Бабій А.І.², Плугін О.А.¹, Овчинников О.О.¹¹ Український державний університет залізничного транспорту
(майдан Фейєрбаха 7, Харків, 61050, Україна; e-mail: aaplugin@gmail.com, kaliuzhna.el@gmail.com,
pluhin_bmg@kart.edu.ua, ovchinnicov_77@ukr.net; orcid.org/0000-0002-6941-2076,
orcid.org/0000-0002-5371-7502, orcid.org/0000-0002-4627-1039, orcid.org/0000-0002-1194-4387)² ПрАТ «Гніванський завод спеціалізованого бетону»
(вул. Промислова 15, м. Гнівань, 23310, Україна; baby72anatoliy@gmail.com)

ПІДВИЩЕННЯ РАННЬОЇ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ ЗА ДОПОМОГОЮ ДОБАВОК СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРІВ

Досліджено вплив добавок суперпластифікаторів-полікарбоксилатів на ранню міцність бетону залізобетонних шпал. Встановлено, що застосування суперпластифікаторів-полікарбоксилатів дозволяє підвищити ранню міцність бетону після тепловологісної обробки, проте кожну добавку необхідно перевіряти на сумісність із застосованим цементом. Електронно-мікроскопічними дослідженнями суттєвої зміни структури продуктів гідратації внаслідок застосування суперпластифікаторів-полікарбоксилатів не виявлено. Розроблено схему розвитку процесу тужавлення і початкової стадії твердіння цементу без добавок або з добавками суперпластифікаторів-полікарбоксилатів, на основі якої пояснено їх прискорюючий ефект, що полягає у зменшенні витрати води, зменшенні первинної товщини прошарків між частинками цементу, мінеральних добавок, заповнювачів, скороченні часу на їх заповнення продуктами гідратації. В результаті потенціодинамічних та мікроскопічних досліджень встановлено, що добавка суперпластифікатора-полікарбоксилата не спричиняє корозійного впливу на сталеву арматуру. Встановлено, що для отримання передаточної міцності 32 МПа за 24 години необхідно забезпечити малопрогрівний режим твердіння за температур ізотермічної витримки 40–50°C, а через 2 доби вона досягається за природного твердіння. Рекомендовано по мірі змін вартості енергоносіїв та добавок здійснювати моніторинг економічної ефективності скорочення режимів ТВО за рахунок їх застосування. Запропоновано формулу економічної ефективності використання добавок для зниження енергоемності виробництва залізобетонних шпал.

Ключові слова: залізобетонна шпала, бетон, рання міцність, хімічні та мінеральні добавки.

Вступ. На залізницях України загального користування, розгорнута довжина колій яких складає 27062,3 км, експлуатується 44304,8 тис. залізобетонних шпал (23902,0 км). Шпали виробляють армованими попередньо напруженим високоміцним дротом Ø3 мм із бетону класу С32/40. Витрати цементу до 2010-х рр. перевищували 400 кг на м³. Шпали формують вібраційним способом у силових формах, на які перед заповненням бетонною сумішшю натягують арматурний пакет. В основному застосовують 10-місні форми (2 ряди по 5 шпал у довжину). Через наявність елементів негайного розпалублення - діафрагм-перегородок між торцями суміжних шпал, пустотоутворювачів отворів для закладних болтів шпали формують із жорстких бетонних сумішей, тому використання для них пластифікуючих добавок ніколи не було актуальним, а ДСТУ Б В.2.6-57:2008 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 мм. Технічні умови» та його попередники - відповідні ГОСТи навіть не дозволяли застосовувати хімічні добавки.

Для забезпечення обертання форм шпали піддають тепловологісній обробці (ТВО) - пропарюванню. До 1990-2000-х років її температура досягала 80 і навіть 90°C, що забезпечувало досягнення передаточної міцності 32 МПа через 8-10 годин. У 2000-х рр. у зв'язку з різким здороженням енергоносіїв собівартість шпал також різко збільшилась і з 2010-х рр. температура пропарювання була знижена до 40-50°C завдяки збільшенню активності цементів та припиненню 2-х змінної роботи. У новому ДСТУ Б В.2.6-209:2016 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови» застосування хімічних добавок вже дозволяється і з 2010-х рр. починається застосування добавок, переважно суперпластифікаторів, що дозволило знизити витрати цементу менше 400 кг на м³. Проте відмова від ТВО досі не досягнута і через подальше здороження енергоносіїв зниження її температури і тривалості залишається актуальною. Отже, підвищення

ранньої міцності бетону залізобетонних шпал за допомогою добавок суперпластифікаторів є актуальним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження - обґрунтування підвищення ранньої міцності бетону попередньо напружених залізобетонних шпал з природним твердінням бетону за рахунок застосування добавок суперпластифікаторів.

Завдання досліджень: аналітичний огляд літературних даних про можливості підвищення ранньої міцності бетону за рахунок хімічних добавок; експериментальні дослідження з визначення впливу добавок на ранню міцність бетону; електронно-мікроскопічні дослідження впливу добавок на структуру цементного каменю; потенціодинамічні та мікроскопічні дослідження впливу добавок на корозію сталевих арматур.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Дослідження, спрямовані на прискорення твердіння залізобетонних шпал, проводились в УкрДУЗТ під керівництвом О.П. Мchedлова-Петросяна з 1960-х рр. [1]. Пропонувались різні способи прискорення, у т.ч. хімічними добавками аж до таких, як хлорид амонію, амінооцтова кислота, оксалат амонію [2].

Ці роботи узгоджувались з розвитком вітчизняної та світової науки в галузі бетонознавства [3, 4, 5] та ін. В.Б.Ратіновим тоді була розроблена продуктивна класифікація добавок в бетони [3] на чотири класи: 1 і 2 – солі-електроліти, що є в основному прискорювачами тужавлення та твердіння (додатково поділені на 5 груп), 3 – мінеральні добавки – кристалічні затравки, дисперсні частинки яких є підкладками для кристалізації продуктів гідратації (також здатні прискорювати твердіння), 4 – поверхнево-активні речовини (ПАР), що є пластифікуючими та водоредукуючими добавками.

У 1980-х рр. дуже актуальною стала проблема недостатньої тріщиностійкості шпал, які масово не витримували стандартного випробування на тріщиностійкість або зазнавали утворення подовжніх тріщин на кінцевих ділянках від попереднього напруження арматурного дроту [6]. Аналогічна проблема виникла і під час виробництва залізобетонних плит безбаластного мостового полотна [7]. А.М. Пługнім зі співр. було з'ясовано, що тріщиностійкість шпал залежить від характеру структури бетону, формалізованого через показники коефіцієнтів розсунення зерен щебеню цементно-піщаним розчином α та зерен піску цементним тістом (каменем) μ [8]. Ці коефіцієнти характеризують ступінь заповнення простору між зернами щебеню та піску цементно-піщаним розчином та цементним каменем, відповідно:

$$\alpha = \frac{V_{цпр}}{V_{пус}} = \frac{\frac{П}{\rho_{іст}^н} + \frac{Ц}{\rho_{іст}^п} + \frac{В}{\rho^в}}{\frac{Щ}{\rho_{нас}^щ} \cdot Пус^щ}; \quad \mu = \frac{V_{цт}}{V_{пус}} = \frac{\frac{Ц}{\rho_{іст}^п} + \frac{В}{\rho^в}}{\frac{П}{\rho_{нас}^п} \cdot Пус^п}, \quad (1)$$

де $V_{цпр}$, $V_{цт}$ - об'єм цементно-піщаного розчину та цементного тіста, відповідно, у 1 м^3 бетону, м^3 ; $V_{пус}^щ$, $V_{пус}^п$ - об'єм пустот, відповідно, у щебені та піску, що міститься у 1 м^3 бетону, у вихідному (природно насипному) стані, м^3 ; $Щ$, $П$, $Ц$, $В$ - витрата, відповідно, щебеню, піску, цементу та води, на 1 м^3 бетону, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{іст}^щ$, $\rho_{іст}^п$, $\rho_{іст}^п$, $\rho^в$ - істинна густина щебеню, піску, цементу та густина води, відповідно, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{нас}^щ$, $\rho_{нас}^п$ - насипна густина щебеню та піску, відповідно, $\text{кг}/\text{м}^3$; $Пус^щ$, $Пус^п$ - пустотність щебеню та піску, відповідно.

Авторам [9] вдалось майже усунути проблему недостатньої тріщиностійкості шляхом забезпечення оптимальних значень цих коефіцієнтів $\alpha_{опт}$ і $\mu_{опт}$:

$$\alpha_{опт} = 2,1 \cdot (1 + d_n/d_{щ})^3 - 1,1; \quad \mu_{опт} = 2,1 \cdot (1 + d_n/d_{п})^3 - 1,1, \quad (2)$$

де $d_{щ}$, $d_{п}$, $d_{ц}$ - середній розмір зерен щебеню та піску і частинок цементу, відповідно, м.

У разі дотримання $\alpha_{опт}$ і $\mu_{опт}$ забезпечуються також максимальні показники водонепроникності бетону та його міцності, у т.ч. в ранні терміни твердіння.

У 2000-х рр. у зв'язку зі значним здороженням енергоресурсів, особливо, газу, надто актуальною стає проблема скорочення тепловологісної обробки шпал без шкоди для їх якості, зокрема, тріщиностійкості. В УкрДУЗТ було виконано дослідження [10], за результатами яких вдалось розробити склади бетону, що забезпечували значні зниження температури та тривалості тепловологісної обробки [11]. Підвищення ранньої міцності в цьому випадку було забезпечено сполученням оптимального складу бетону з $\alpha_{\text{опт}}$ і $\mu_{\text{опт}}$ з уведенням добавок суперпластифікатора-сульфонафтальмінформальдегіду С-3 і прискорювачів твердіння хлориду та нітрату кальцію. Було експериментально доведено, що максимальне збільшення ранньої міцності забезпечено саме сполученням хлориду та нітрату кальцію у співвідношенні близько 1:1.

Оскільки нітрат та, особливо, хлорид кальцію можуть спричинити корозійний вплив на арматуру, особливо попередньо напружену із високоміцного дроту з низьковуглецевої сталі, можливість такого впливу була ретельно перевірена А.А.Плугінім, Р.Ф.Руновою та ін. [12]. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень було доведено, що у разі помірного сумарного вмісту хлориду та нітрату кальцію не більше 1 % від маси цементу вони не спричиняють корозійного впливу на зазначену арматуру за рахунок хімічного зв'язування у гідрохлоралюмінати та гідронітроалюмінати кальцію. Проте у науковій і виробничій спільноті залишилось дуже обережне ставлення до застосування прискорювачів твердіння - електролітів через їх корозійний вплив на арматуру у разі передозування і їх застосування у розробленому УкрДУЗТ ДСТУ Б В.2.6-209:2016 не було дозволене. Тому пошук нових шляхів підвищення ранньої міцності бетону, у т.ч. добавок - прискорювачів твердіння, придатних для бетону шпал, дотепер залишається актуальним завданням. Так, у [13] саме для бетону залізобетонних підрейкових основ пропонується комплексний підхід, який полягає у ретельному підборі ефективних та сумісних між собою високоактивного цементу і добавки полікарбосилату та «малопарогрівна та/або без пропарювальна» технології. Проте передаточна міцність за «безпропарювальною» технологією за 8–10 годин не досягається. У [14] пропонується отримувати високу ранню міцність цементу та, відповідно, бетону, завдяки створеному високоактивному «мультимодальному» цементу, який крім клінкера містить мінеральні добавки трьох різних видів – доменний граншлак, пуцолану та вапняк. Висока рання міцність досягається, на нашу думку, завдяки утворенню більшої кількості електрогетерогенних контактів. Проте рання міцність визначається у віці 2 доби а досягнута величина міцності через 24 години, очевидно, не є достатньою для шпал.

Прискорювачами неелектролітами, як було визначено у [3], є мінеральні добавки – кристалічні затравки. У [15] пропонується така добавка – нанодисперсний сульфоалюмінат кальцію, який отримується шляхом інтенсивного активуючого змішування гідроксиду та алюмінату кальцію, і спільно з полікарбосилатом забезпечує високу ранню міцність. Широко плідні дослідження з прискорення твердіння портландцементу та бетону останніми роками проводяться у Львівській політехніці під керівництвом М.А.Саницького [14, 16, 17]. У [17] за рахунок застосування комплексних добавок, що складаються із полікарбосилату, нанодисперсної мінеральної добавки (кремнезему, метакаоліну), сульфату натрію (лужного активатора) вдалось отримати в умовах природного твердіння ранню міцність до 52 МПа. Проте ці бетони розроблені переважно для монолітного будівництва, їх рання міцність визначається у віці 2 доби, а фактична міцність через 24 години твердіння не визначається та, очевидно є недостатньою для шпал. Крім того, такі добавки досі є дорогими, а їх присутність на ринку нестабільною. Прикладом може бути дисперсія гідросилікатів кальцію Master X-Seed 100 (BASF), яка, незважаючи на високий прискорюючий ефект, зникла з ринку України.

На нашу думку можливості добавок – суперпластифікаторів-полікарбосилатів для підвищення ранньої міцності бетону залізобетонних шпал не є вичерпаними, тому робочу

гіпотезу досліджень можна сформулювати таким чином: максимальне підвищення ранньої міцності бетону можливе у разі застосування бетону оптимального складу з добавкою суперпластифікатора-полікарбоксилата, який не спричиняє корозійного впливу на арматуру.

Матеріали і методи експериментальних досліджень. Дослідження впливу добавок на властивості бетону здійснювали на ПрАТ «Гніванський завод спеціалізованого бетону» на заводських складах бетону класу С32/40 із стандартних матеріалів, що застосовуються для масового виробництва залізобетонних шпал [18], а також в лабораторних умовах. Для експериментальних досліджень впливу добавок на властивості бетону в лабораторних умовах застосовували: портландцемент ПЦ І-500Н ДСТУ Б В.2.7-46:2010 (ПЦ) Волинь-Цемент (ПрАТ «Дікергоф Цемент Україна»); пісок кварцовий дуже дрібний ДСТУ Б В.2.7-32-95; щебінь гранітний суміші фракцій 5–20 мм ДСТУ Б В.2.7-75-98, воду питну водопровідну ДСТУ 7525:2014; добавки – суперпластифікатори-полікарбоксилати, наведені у табл. 1

Таблиця 1 - Добавки в бетон, застосовані для експериментальних досліджень

Марка	Виробник	Позначення	Дозування, мас. % від витрати цементу
К-17	Містім	Містім	0,8
E.Fix-AB.27	АрхБуд	АрхБуд	0,7
Plastidor 2 Extra	Доронік	Plastidor	0,4
ViscoCrete-1030	Sika	ViscoCrete	
Master Glenium ACE-430	BASF	ПК	1

Склади бетону для експериментальних досліджень в лабораторних умовах призначали за методикою УкрДУЗТ [19] із забезпеченням визначених за (2) оптимальних величин коефіцієнтів розсунення зерен крупного та дрібного заповнювачів $\alpha_{opt}=1,12$, $\mu_{opt}=1,79$, відповідно. Властивості бетону визначали на зразках-кубах з розміром ребра 100 мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008, ДСТУ Б В.2.7-214:2009.

Електронно-мікроскопічні дослідження морфології цементного каменю з добавками виконували на їх відколах за допомогою скануючого електронного мікроскопу JEOL JSM-6390LV. Зйомку проводили за прискорюючої напруги 15 кВ.

Корозійний вплив бетону з добавками на сталеву арматуру досліджували потенціодинамічним та оптико-мікроскопічним методами на зразках-призмах розміром 160×40×40 мм, в яких по центральній поздовжній осі симетрії розташовано сталевий стержень діаметром 3 мм і довжиною 120 мм. Стержні, у т.ч. їх торці, перед закладенням у зразки-призми були зачищені наждачним папером та знежирені ацетоном. Зразки-призми виготовляли із цементно-піщаного розчину складу 1:1,53 з В/Ц 0,56 (розчинної частини бетону). Виготовлено дві серії по три зразки в кожній: 1 – контрольні без добавок (б/д); 2 – з добавкою 1 % Master Glenium ACE 430 (СП).

Потенціодинамічні дослідження здійснювали за схемою, наведеною на рис. 2 згідно з [20, 21] за допомогою приладів та обладнання: потенціостату з діапазоном регульованих напруги в межах не менше 5–1000 мВ та сили струму в межах не менше 1–1000 мкА; термометр з діапазоном вимірювань в межах не менше 10–30°C; електрод порівняння хлорсрібний насичений; допоміжний електрод – сталевий стержень діаметром 5–6 мм, довжиною 120–150 мм; посудина з електроізоляційного матеріалу (скла) з внутрішнім діаметром не менше 70 мм і висотою 160–200 мм; електролітичний ключ – скляну трубку діаметром 3–5 мм з краном, заповнену насиченим розчином хлористого калію.

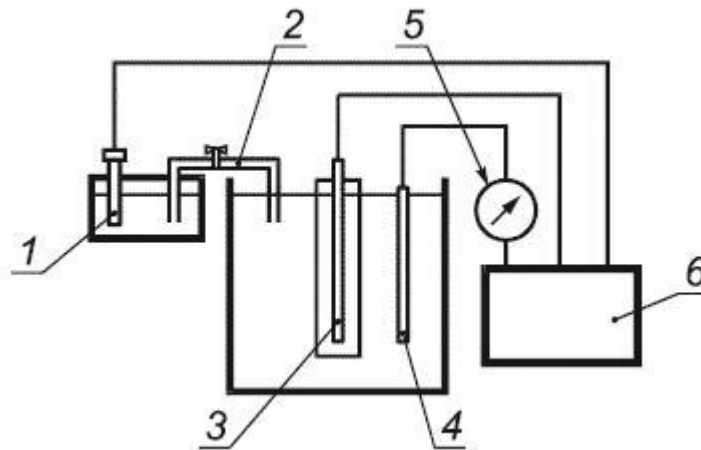


Рис. 2. Електрична схема зняття потенціодинамічних поляризаційних кривих:
 1 – електрод порівняння; 2 – електролітичний ключ; 3 – зразок; 4 – допоміжний електрод;
 5 – мікроамперметр; 6 – потенціостат

Електрохімічні вимірювання проведено після досягнення бетоном проектної міцності через 28 діб та через 6 місяців. Вимірювання здійснювали на трьох паралельних зразках. Зразки бетону з арматурою до початку вимірювання насичували питною водою шляхом кип'ятіння протягом 3 год. Перед початком випробування з одного торця зразка-балочки сколювали, оголюючи арматурний стержень на $20 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$. Вимірювання сили струму в мікроамперах виконували в зразку через 60 ± 5 хвилин після вмикання потенціостату (рис. 2), після чого знімали анодну частину поляризаційної кривої при проходженні діапазону від потенціалу, що встановився, до плюс 1000 mV протягом 60 хвилин. Густина струму i , мкА/см^2 при кожному фіксованому значенні потенціалу знаходили за формулою:

$$I = I/S, \quad (3)$$

де I – сила струму, мкА ; S – площа робочої поверхні електрода (стержня), см^2 .

Площу робочої поверхні сталюого стержня, що стикається з бетоном, S , см^2 , розраховували за формулою:

$$S = \pi D l + \pi D^2/4, \quad (2)$$

де D – діаметр сталюого стержня, см ; l – довжина сталюого стержня, що занурений у бетон, см .

Критерії оцінки захисної дії бетону до сталюої арматури прийняті відповідно до [21].

Оптико-мікроскопічні дослідження корозійного впливу добавок на сталюву арматуру здійснювали після витримування зразків протягом 1 року у перемінному рівні води за середньорічної температури 16°C та звільнення поверхні арматури від бетону. Поверхню арматури вивчали за допомогою бінокулярного мікроскопу МБС-2 за збільшення $\times 7$; $\times 12,5$; $\times 25$; $\times 50$; $\times 88$, знімки поверхні отримували за допомогою цифрової камери з роздільною здатністю 68 Мп.

Результати експериментальних досліджень та їх обговорення. Експериментальні дослідження виконані на Гніванському заводі спецалізобетону. Визначено міцність на стиск бетону з добавками – суперпластифікаторами-полікарбоксилатами різних виробників, досягнуту після тепловологісної обробки (через 24 год після формування). Зразки виготовляли із рівнорухомих сумішей, температура ізотермічної витримки складала $40\text{--}50^\circ\text{C}$. Кінетику набору міцності та величини міцності через 24 години наведено на рис. 3. Як видно із рис. 3, застосування суперпластифікаторів дозволило знизити В/Ц з $0,272$ до $0,236$ (Містім), $0,222$ (АрхБуд), $0,25$ (Plastidor) та підвищити міцність з 44 МПа до $48,1 \text{ МПа}$ (на $9,3 \%$, Містім), $54,3 \text{ МПа}$ (на $23,5 \%$, АрхБуд), $55,4 \text{ МПа}$ (на $25,9 \%$, Plastidor).

Застосування ViscoCrete підвищення міцності не забезпечило, що може свідчити про її не-сумісність із застосованим цементом.

На рис. 4 наведено отриману залежність міцності на стиск f бетону без добавок і з добавками суперпластифікаторами від водоцементного відношення В/Ц. Як видно із рис. 2, ця залежність для бетону без добавок і з суперпластифікаторами Містім і АрхБуд, апроксимується логарифмічним рівнянням з коефіцієнтом кореляції 0,64. Це вказує на те, що Містім і АрхБуд забезпечують прискорення твердіння за рахунок зниження В/Ц. Міцність бетону з суперпластифікатором Plastidor вища, ніж за цією залежністю, що вказує на те, що ця добавка забезпечує прискорення твердіння за рахунок додаткових до зниження В/Ц ефектів. Механізм цього впливу невідомий через те, що виробник добавки не розкриває її склад крім загальної вказівки на полікарбоксилатну основу.

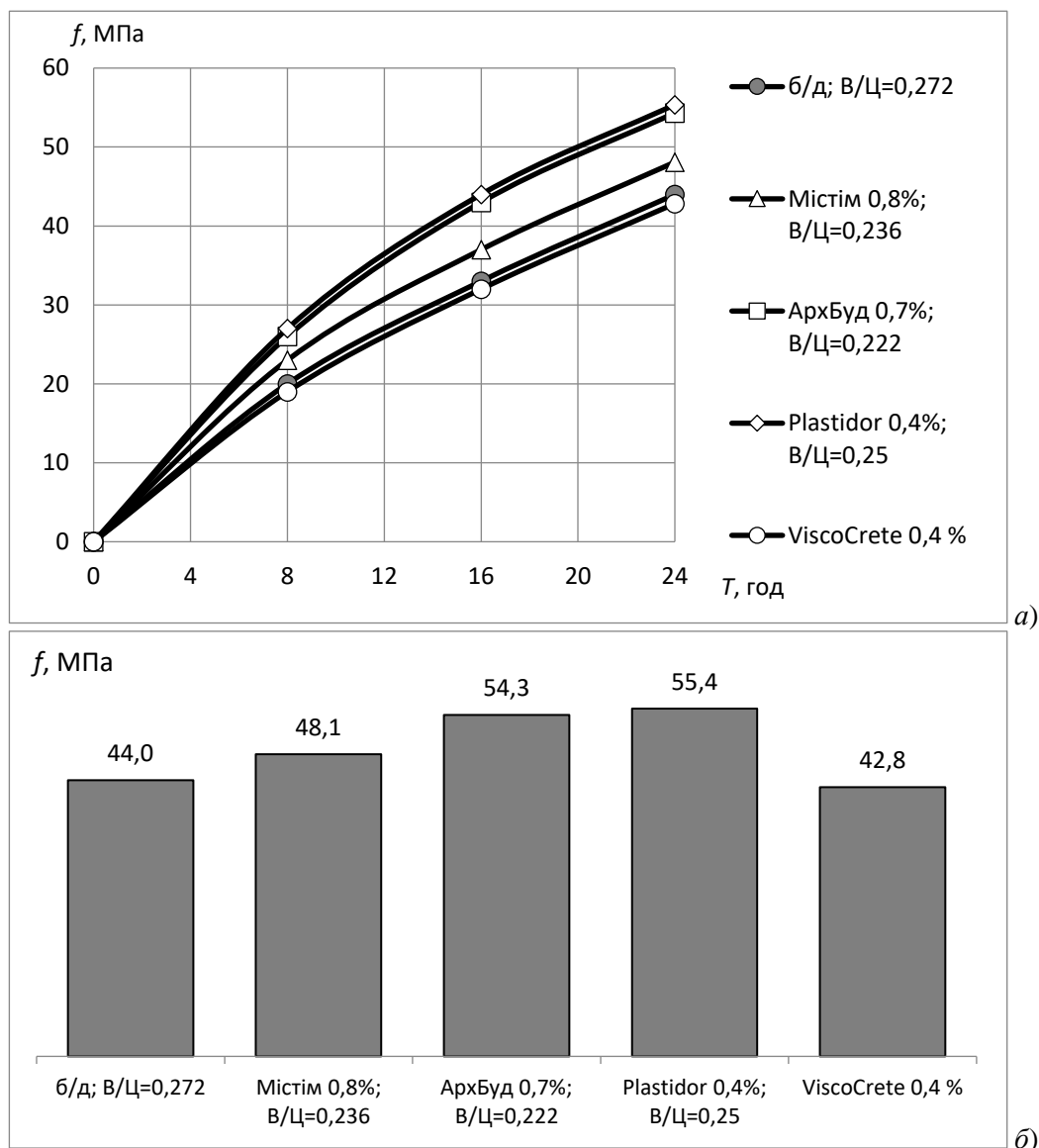


Рис. 3. Залежність міцності на стиск f від часу тривалості твердіння T бетону без добавок (б/д) і з добавками суперпластифікаторами-полікарбоксилатами після тепловологісної обробки (а) та величини міцності на стиск f_u у віці 24 годин (б)

Отже, в результаті експериментальних досліджень встановлено, що застосування добавок суперпластифікаторів-полікарбоксилатів дозволяє підвищити ранню міцність

бетону після тепловологісної обробки за 40–50°C на 9,3–25,9% в основному за рахунок зниження В/Ц. Проте кожну добавку необхідно перевіряти на сумісність із застосованим цементом.

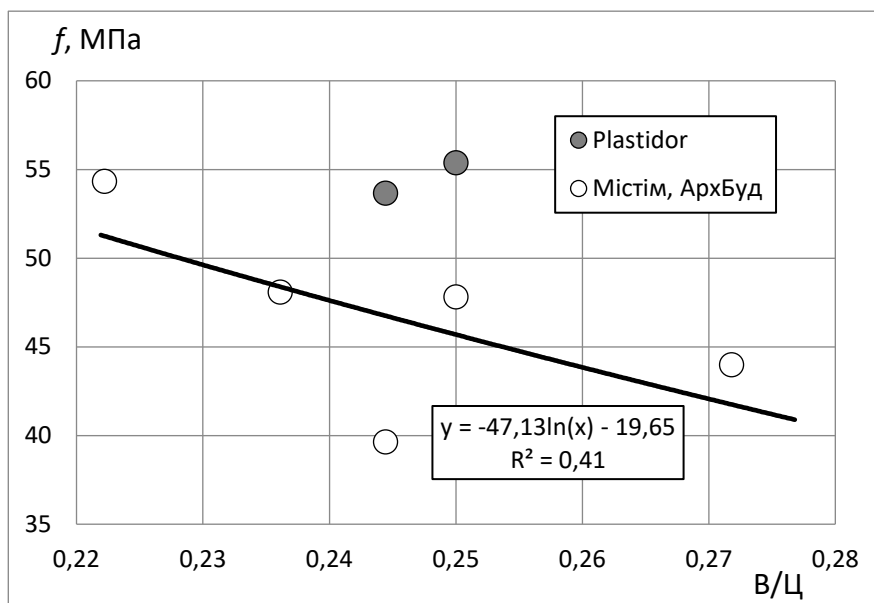


Рис. 4. Залежність міцності на стиск f бетону без добавок і з добавками суперпластифікаторами від водоцементного відношення В/Ц

Досліджено кінетику набору міцності на стиск під час природного твердіння за температури 18–20°C бетону без добавок і з добавкою суперпластифікатором-полікарбонатом Master Glenium ACE-430. Отримані кінетичні криві наведені на рис. 5, величини досягнутої міцності після тепловологісної обробки, а також після 1, 7 та 28 діб природного твердіння наведені на рис. 6 та у табл. 2.

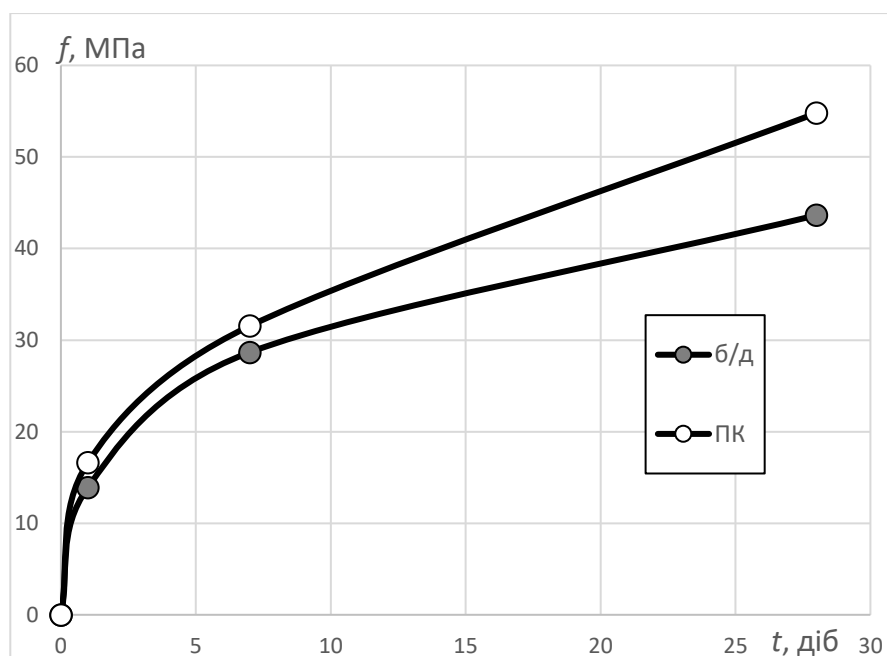


Рис. 5. Кінетика набору міцності бетону без добавок б/д і з добавкою ПК

Із рис. 5 і табл. 2 видно, що досліджена добавка не тільки не підвищила міцність після тепловологісної обробки, але й знизил її на 8,2%. Навпаки, за природного твердіння добавка обумовила підвищення міцності бетону в будь-які її терміни на 10–26%.

Таблиця 2 - Міцність на стиск бетону без добавок і з добавками після ТВО, а також 1, 7 і 28 діб природного твердіння

Добавки	Міцність на стиск f , МПа				Підвищення міцності на стиск відносно бетону без добавки, %			
	після ТВО 45°C	після природного твердіння, діб			після ТВО 45°C	після природного твердіння, діб		
		1	7	28		1	7	28
б/д	24,4	13,9	28,7	43,6				
ПК	22,4	16,6	31,5	54,8	-8,2	+19,4	+9,8	+25,7

Виконано електронно-мікроскопічні дослідження цементного каменю без добавок і з добавкою суперпластифікатора-полікарбоксилата Master Glenium ACE-430 (ПК). На рис. 6 наведено електронно-мікроскопічні знімки цементного каменю без добавок б/д (рис. 6, а) і з добавкою ПК (рис. 6, б). За будь-яких збільшень структура цементного каменю майже не розрізняється. У продуктах гідратації всіх зразків наявні як гелеподібні утворення гідросилікатів кальцію, так і кристалогідрати: гексагональні пластинки портландиту, окремі кубічні кристали алюмінатів кальцію, голчасті кристали *Aft*-фази – еtringіту довжиною до 2 мкм. Таким чином, за результатами електронно-мікроскопічних досліджень можна зробити висновок, що досліджена добавка СП майже не змінила структуру продуктів гідратації.

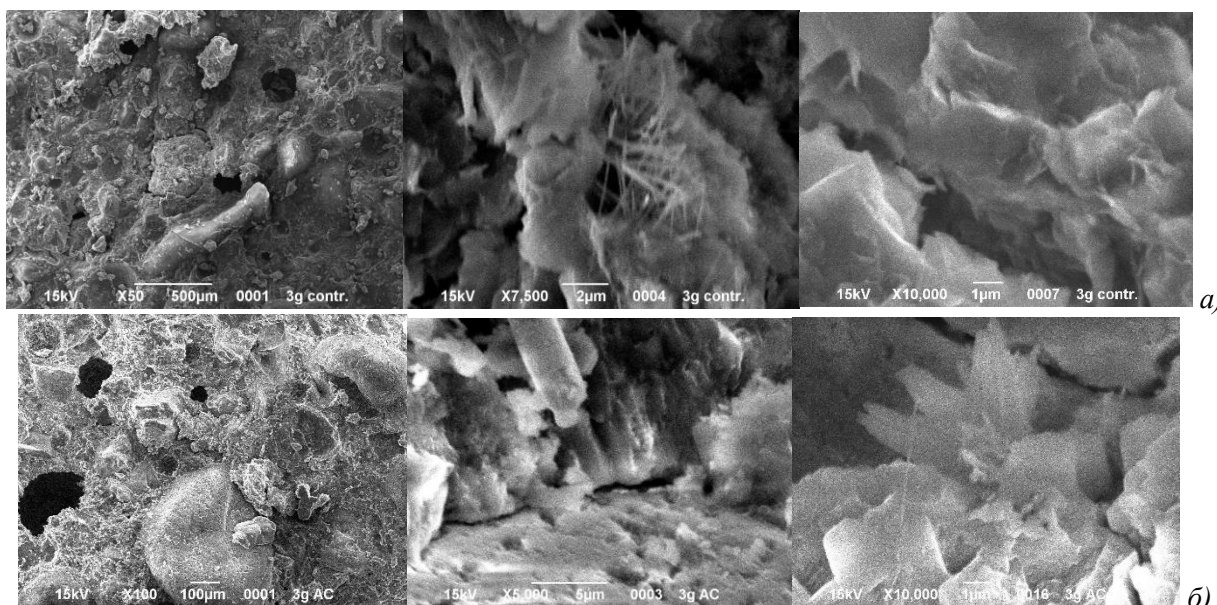


Рис. 6. Електронно-мікроскопічні знімки відколів цементного каменю без добавок б/д (а) і з добавкою ПК (б). Збільшення від $\times 50$ до $\times 10000$

Такі результати електронно-мікроскопічних досліджень дозволили запропонувати схему послідовності тужавлення і твердіння в ранні терміни цементу (рис. 7). На схемі рис. 7, а бачимо прошарок між двома частинками цементу, зокрема, фрагментів їх поверхонь C_3S і C_2S , які одразу після змішування заповнені водою або розчином ПАР (ПК) у воді. Цементне тісто при цьому перебуває у пластичному стані. На початкових стадіях гідратації C_3S (і C_3A) розчиняється та утворює пересичений розчин відносно портландиту CH та гідросилікатів кальцію C_2SH , які кристалізуються (конденсуються) поблизу поверхонь частинок цементу (мінеральних добавок, заповнювачів, рис. 7, б). Незважаючи на те, що між продуктами гідратації і поверхнею частинок утворюються електрогетерогенні контакти, прошарки між ними ще певний час залишаються незаповненими продуктами гідратації,

потім нещільно заповненими (рис. 7, б), тому пластичність втрачається, а міцність набувається повільно. Застосування суперпластифікаторів-полікарбоксилатів дозволяє знизити витрату води а, отже, зробити меншою первинну товщину прошарків, скоротивши час на їх заповнення, та прискорити твердіння.

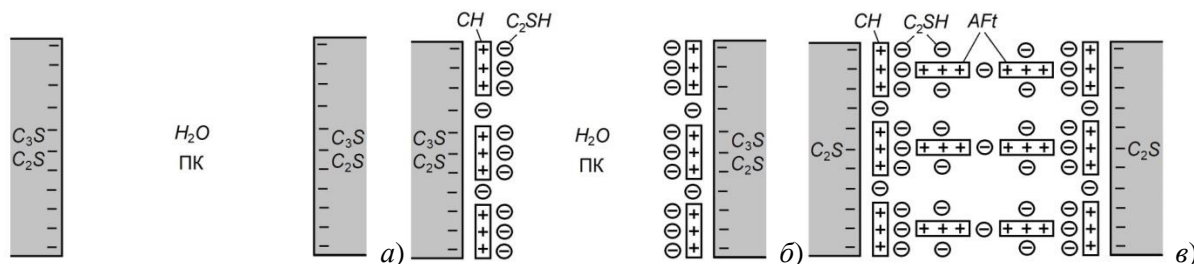


Рис. 7. Схема розвитку процесу тужавлення і початкової стадії твердіння цементу без добавок та з добавкою ПК: а – стан одразу після змішування водою; б – утворення перших продуктів гідратації поблизу поверхонь частинок цементу; в – подальше утворення продуктів гідратації в об’ємі. C₃S, C₂S – клінкерні мінерали цементу; ПК – добавка-полікарбоксилат; CH – кристалогідрати портландиту; C₂SH – гідросилікатний гель; AFt – кристалогідрати AFt-фази – еtringіту

Корозійний вплив добавок на сталеву арматуру досліджено шляхом потенціоднамічних вимірювань. Результати дослідження наведені в табл. 3, з якої видно, що за потенціалу 300 мВ (насичений каломельний електрод) густина струму як для контрольних зразків без добавок, так і для бетону з добавкою суперпластифікатора полікарбоксилата Master Glenium ACE-430 (ПК) після 28 діб та 6 місяців твердіння не перевищує 10 мкА/см², що свідчить про те, що арматурна сталь в обох випадках залишається в пасивному стані.

Таблиця 3- Густина струму стікання з арматури у бетоні з добавками

Добавки	Густина струму, мкА/см ² , за накладеного потенціалу, мВ, у віці бетону			
	300		900	
	28 діб	6 міс.	28 діб	6 міс.
б/д	5	4	53	60
ПК	4,5	2	52	39

Результати світлової мікроскопії корозійного впливу бетону без добавок і з добавкою ПК у вигляді знімків поверхні арматури наведені на рис. 8. В цілому вони підтверджують висновки потенціоднамічних вимірювань. На арматурі, що експонувалась в бетоні без добавок (рис. 8, а), слідів корозії не виявлено зовсім, в бетоні з добавкою ПК (рис. 8, б) місцями спостерігається ледь видимий лише зі значним збільшенням ×88 коричневуватий наліт продуктів корозії. Отже, встановлено, що добавка суперпластифікатора-полікарбоксилату не спричиняє корозійного впливу на арматурну сталь.

Результати експериментальних досліджень в сукупності підтвердили висунуте припущення про максимальне підвищення ранньої міцності бетону у разі застосування бетону оптимального складу з комплексною добавкою суперпластифікатора-полікарбоксилата. Проте величини передаточної міцності 32 МПа для шпал через 24 години твердіння досягти не вдалось (рис. 5). Її отримання без підвищення температури можливо через 2 доби, отже, для партій шпал, заформованих у передвихідні та передсвяткові дні. Для партій шпал, заформованих у звичайні робочі дні, розпалублення яких здійснюється через 24 години, має застосовуватись малопрогрівний режим твердіння за температур ізотермічної витримки 40–50°C.

Беручи до уваги високу вартість добавок до бетонів, по мірі змін вартості енергоносіїв та добавок необхідно оцінювати економічну ефективність скорочення режимів ТВО за рахунок застосування добавок.

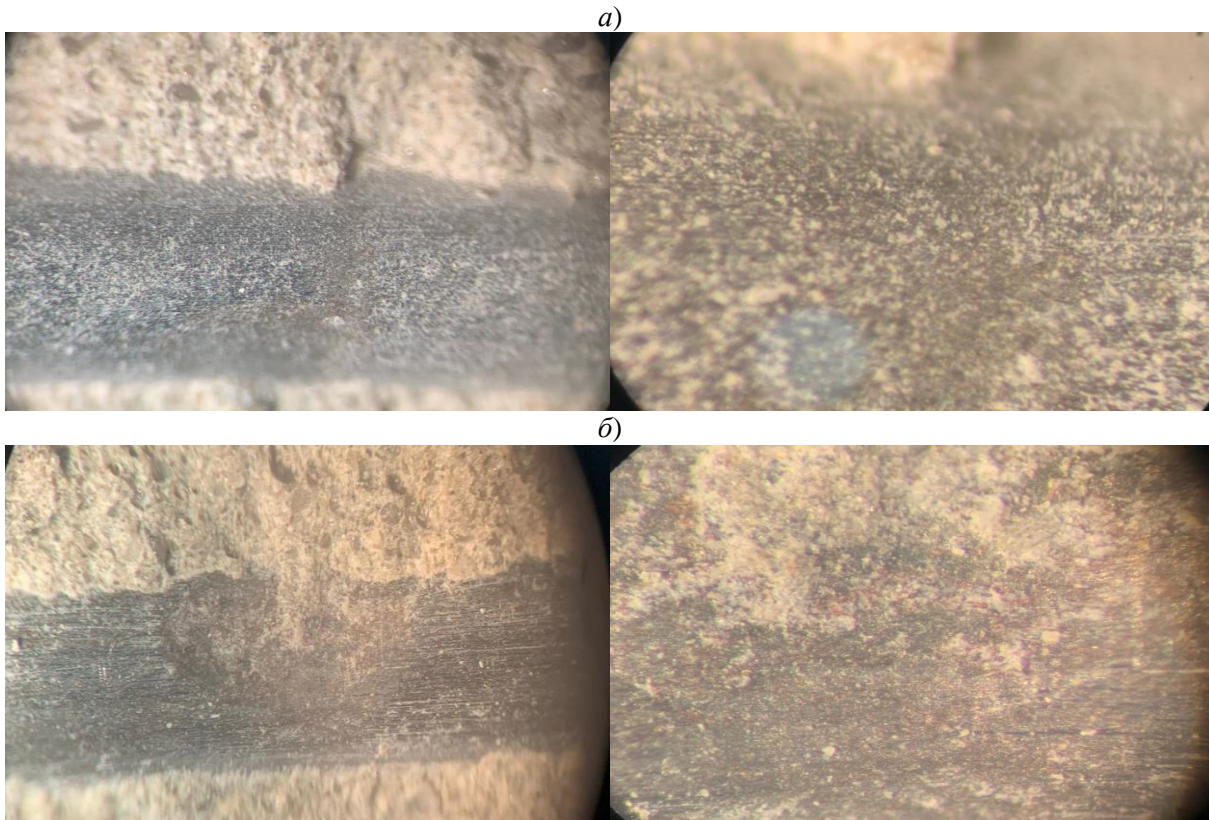


Рис. 9. Стан арматурного дроту після витримування протягом 1 року в перемінному рівні води зразків бетону без добавок б/д (а) і з добавкою ПК (б). Світлова мікроскопія, збільшення $\times 25$ (ліворуч), $\times 88$ (праворуч)

Економічну ефективність використання добавок для зниження енергоємності виробництва залізобетонних шпал у розрахунку на 1 м^3 шпал запропоновано оцінювати за формулою:

$$E = (\text{Ц}_6 - \text{Ц}) \times \text{С}_\text{ц} + (\text{С}_\text{ТВО6} - \text{С}_\text{ТВО}) - \text{Ц} \times (\text{Д}_\text{СП} \times \text{С}_\text{СП} + \text{Д}_\text{ПТ1} \times \text{С}_\text{ПТ1} + \text{Д}_\text{ПТ2} \times \text{С}_\text{ПТ2} + \text{Д}_\text{МК} \times \text{С}_\text{МК}) / 100,$$

де Ц_6 – витрата цементу на 1 м^3 бетону базового складу, кг; Ц – витрата цементу на 1 м^3 бетону пропонованого складу, кг; $\text{С}_\text{ц}$ – ціна 1 кг цементу, грн.; $\text{С}_\text{ТВО6}$ – вартість ТВО 1 м^3 шпал із бетону базового складу (залежить від температури і тривалості ізотермічної витримки); $\text{С}_\text{ТВО}$ – вартість ТВО 1 м^3 шпал із бетону пропонованого складу; $\text{Д}_\text{СП}$ – дозування добавки суперпластифікатора, % від маси цементу; $\text{С}_\text{СП}$ – ціна 1 кг добавки суперпластифікатора, грн.; $\text{Д}_\text{ПТ1}$ – дозування добавки прискорювача твердіння (1), % від маси цементу; $\text{С}_\text{ПТ1}$ – ціна 1 кг добавки прискорювача твердіння (1), грн.; $\text{Д}_\text{ПТ2}$ – дозування добавки прискорювача твердіння (2), % від маси цементу; $\text{С}_\text{ПТ2}$ – ціна 1 кг добавки прискорювача твердіння (2), грн.; $\text{Д}_\text{МК}$ – дозування мінеральної добавки (дисперсії ГСК тощо), % від маси цементу; $\text{С}_\text{МК}$ – ціна 1 кг добавки мінеральної добавки, грн.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено, що застосування суперпластифікаторів-полікарбоксилатів дозволяє підвищити ранню міцність бетону залізобетонних шпал після тепловологісної обробки за температури $40\text{--}50^\circ\text{C}$ на $9\text{--}26\%$, за природного твердіння – на $19\text{--}20\%$. Проте кожену добавку необхідно перевіряти на сумісність із застосованим цементом.

Електронно-мікроскопічними дослідженнями суттєвої зміни структури продуктів гідратації внаслідок застосування суперпластифікаторів-полікарбоксилатів не виявлено.

Розроблено схему розвитку процесу тужавлення і початкової стадії твердіння цементу без добавок або з добавками суперпластифікаторів-полікарбоксилатів, на основі якої пояснено їх прискорюючий ефект, що полягає у зниженні витрати води, зменшенні первинної товщини прошарків між частинками цементу, мінеральних добавок, заповнювачів, скороченні часу на їх заповнення продуктами гідратації.

В результаті потенціодинамічних та мікроскопічних досліджень встановлено, що добавка суперпластифікатора-полікарбоксилата не спричиняє корозійного впливу на сталеву арматуру.

За природного твердіння величини передаточної міцності 32 МПа для шпал через 24 години твердіння досягти не вдалось. Її отримання без підвищення температури можливо через 2 доби, отже, для партій шпал, заформованих у передвихідні та передсвяткові дні. Для партій шпал, заформованих у звичайні робочі дні, розпалублення яких здійснюється через 24 години, має застосовуватись малопрогрівний режим твердіння за температур ізотермічної витримки 40–50°C.

Беручи до уваги високу вартість добавок до бетонів рекомендовано по мірі змін вартості енергоносіїв та добавок здійснювати моніторинг економічної ефективності скорочення режимів ТВО за рахунок їх застосування. Запропоновано формулу економічної ефективності використання добавок для зниження енергоємності виробництва залізобетонних шпал.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Мчедлов-Петросян О.П., Ушеров-Маршак А.В., Колесниченко Л.К. Основы и методы ускорения твердения бетона. Железобетонные шпалы. Труды ХИИТа, 86 (1966) 18-30.
2. Гасан Ю.Г., Кутах А.П. Комплексные добавки – интенсификаторы твердения бетона. Интенсификация производства сборного железобетона. Межвуз. сб. научн. тр., ХИИТ (1986) 28-30.
3. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. Стройиздат, Москва (1989) 188 с.
4. Ramachandran V.S., Feldman R.F. Concrete admixture handbook. Properties, Science, and Technology. Noyes Publication. USA. 1984.
5. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. Москва (1998) 768 с.
6. Рылтсева Т.Н. Повышение трещиностойкости защитного слоя струнбетона в зоне передачи напряжений. Автореф. дисс... к.т.н. 05.23.05. ХАДИ, Харьков (1986) 20 с.
7. Мирошніченко С.В., Плугін А.Н., Плугін А.А., Корнієнко І.Г. К вопросу исследования трещиностойкости железобетонных плит безбалластного мостового полотна. Будівельні конструкції, 72 (2009) 457-464.
8. Плугін А.Н., Калинин О.А., Либенко Ю.П. Особенности структурных характеристик бетона α и μ . Интенсификация производства сборного железобетона. Межвуз сб. научн. тр. ХИИТ, 13 (1990) 62-71.
9. Пат.62613 UA Спосіб визначення складу високоміцного, трещиностійкого і водонепроникного бетону. А.М.Плугін, О.А.Калінін, С.В.Мірошніченко, А.А.Плугін, С.М.Кудренко, В.А.Лютій, А.В.Никитинський, І.В.Подтележнікова, Г.О.Линник, М.Д.Костюк, В.О.

REFERENCES:

1. Mchedlov-Petrosyan O.P., Usherov-Marshak A.V., Kolesnichenko L.K. Osnovy i metody uskoreniya tverdeniya betona. Zhelezobetonnyye shpaly. Trudy KhIITa. 86 (1966) 18- 30.
2. Gasan Yu.G., Kutakh A.P. Kompleksnyye dobavki – intensifikatory tverdeniya betona. Intensifikatsiya proizvodstva sbornogo zhelezobetona. Mezhevuz. sb. nauchn. tr.. KhIIT (1986) 28-30.
3. Ratinov V.B., Rozenberg T.I. Dobavki v beton. Stroyizdat. Moskva (1989) 188 s.
4. Ramachandran V.S., Feldman R.F. Concrete admixture handbook. Properties, Science, and Technology. Noyes Publication. USA. 1984.
5. Batrakov V.G. Modifitsirovannyye betony. Teoriya i praktika. Moskva (1998) 768 s.
6. Ryltseva T.N. Povysheniye treshchinostoykosti zashchitnogo sloya strunobetona v zone peredachi napryazheniy. Avtoref. diss... k.t.n. 05.23.05. KhADI. Kharkov (1986) 20 s.
7. Miroshnichenko S.V., Plugin A.N., Plugin A.A., Korniyenko I.G. K voprosu issledovaniya treshchinostoykosti zhelezobetonnykh plit bezballastnogo mostovogo polotna. Budivelni konstruktsii. 72 (2009) 457-464.
8. Plugin A.N., Kalinin O.A., Libenko Yu.P. Osobennosti strukturnykh kharakteristik betona α i μ . Intensifikatsiya proizvodstva sbornogo zhelezobetona. Mezhevuz sb. nauchn. tr. KhIIT. 13 (1990) 62-71.
9. Pat.62613 UA Sposib vyznachennia skladu vysokomitsnogo, trishchynostiikoho i vodonepronyknoho betonu. A.M.Pluhin, O.A.Kalinin, S.V.Miroshnichenko, A.A.Pluhin, S.M. Kudrenko, V.A.Liutyi, A.V.Nykytynskyi, I.V. Podtele-

- Яковлев. УкрДАЗТ. Заявл.15.04.2003, №2003043396. Оpubl. 15.06.2005, Бюл. №6.
10. Plugin A.A., Plugin A.N., Plugin O.A., Romanenko O.V., Kalinin O.A., Miroshnichenko S.V., Babii A.I., Partala N.M. Reducing of energy intensity of concrete sleepers production using superplasticizer sand hardening accelerators. 19 Ibausil, Weimar, 2 (2015) 1125-1133.
 11. Плуґін А.А., Романенко О.В., Бабій А.І., Калінін О.А., Плуґін О.А. Склади бетону з добавками суперпластифікаторами і прискорювачами твердіння для виробництва залізобетонних шпал без пропарювання. Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Харків, 2015. Вип.155. С.62–72.
 12. Plugin A.A., Runova R.F. Bonding Calcium Chloride and Calcium Nitrate into Stable Hydration Portland Cement Products: Stability Conditions of Calcium Hydrochloraluminates and Calcium Hydronitroaluminates. International Journal of Engineering Research in Africa, 36 (2018) 69-73. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.36.69>.
 13. Серенко А.Ф., Петрова Т.М. Беспропарочная технология производства подрельсовых конструкций. Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, Москва (2012) 136 с.
 14. Гев'юк І.М. Мультиmodalні композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та модифіковані бетони на їх основі. Автореф. дис... к.т.н. 05.23.05. НУ «Львівська політехніка» (2018) 21 с.
 15. Еленова А.А. Разработка комплексной добавки для ускоренного твердения цементного камня. Дис. к.т.н. 05.17.11. РКХТУ им. Д.Менделеева, Москва (2017) 164 с.
 16. Марущак У.Д. Наномодифіковані надшвидкотверднучі цементуючі системи та високофункціональні бетони на їх основі. Автореф. дис... д.т.н. 05.23.05. НУ «Львівська політехніка» (2019) 37 с.
 17. Кропивницька Т.П. Лужноактивовані композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та наномодифіковані бетони на їх основі. Автореф. дис... д.т.н. 05.23.05. НУ «Львівська політехніка» (2020) 36 с.
 18. Романенко О.В., Калінін О.А., Плуґін О.А., Плуґін А.А., Бабій А.І. Аналіз складів бетону для виготовлення залізобетонних шпал на заводах ЗБШ України. Науковий вісник будівництва 80 (2) (2015) 144–147.
 19. Методика визначення оптимального складу високоміцного, тріщиностійкого та водонепроникного бетону для конструкцій і споруд залізничного транспорту. ЦП-0224 Рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит безбаластного мостового полотна. УкрДАЗТ, ЦП УЗ, Київ (2010) 16–23.
 - zhnikova, H.O.Lynnyk, M.D. Kostiuk, V.O. Iakovliev. UkrDAZT. Zaiavl. 15. 04. 2003, №2003043396. Opubl. 15.06.2005, Biul.№6.
 10. Plugin A.A., Plugin A.N., Plugin O.A., Romanenko O.V., Kalinin O.A., Miroshnichenko S.V., Babii A.I., Partala N.M. Reducing of energy intensity of concrete sleepers production using superplasticizer sand hardening accelerators. 19 Ibausil, Weimar, 2 (2015) 1125-1133.
 11. Pluhin A.A., Romanenko O.V., Babii A.I., Kalinin O.A., Pluhin O.A. Sklady betonu z dobavkamy superplastyfikatoramy i pryskoriuvachamy tverdinnia dlia vyrobnytstva zalizobetonnykh shpal bez propariuvannia. Zb. nauk. prats UkrDUZT. Kharkiv, 2015. Vyp.155. S.62–72
 12. Plugin A.A., Runova R.F. Bonding Calcium Chloride and Calcium Nitrate into Stable Hydration Portland Cement Products: Stability Conditions of Calcium Hydrochloraluminates and Calcium Hydronitroaluminates. International Journal of Engineering Research in Africa, 36 (2018) 69-73.
 13. Serenko A.F., Petrova T.M. Besproparochnaia tekhnolohyia proyzvodstva podrelsovyykh konstruksyi. Uchebno-metodycheskyi tsentr po obrazovanyiu na zheleznodorozhnom transporte, Moskva (2012) 136 s.
 14. Heviuk I.M. Multymodalni kompozytsiini portlandtsementy z vysokoiu rannoio mitsnistiu ta modyfikovani betony na yikh osnovi. Avtoref. dys... k.t.n. 05.23.05. NU «Lvivska politekhnik» (2018) 21 s.
 15. Elenova A.A. Razrabotka kompleksnoy dobavki dlya uskorennoho tverdeniya tsementnogo kamnya. Diss... k.t.n. 05.17.11. RKhTU im. D.Mendeleyeva. Moskva (2017) 164 s.
 16. Marushchak U.D. Nanomodyfikovani nadshvydkotverdnuchi tsementuiuchi systemy ta vysokofunktsionalni betony na yikh osnovi. Avtoref. dys... d.t.n. 05.23.05. NU «Lvivska politekhnik» (2019) 37 s.
 17. Kropyvnytska T.P. Luzhnoaktyvovani kompozytsiini portlandtsementy z vysokoiu rannoio mitsnistiu ta nanomodyfikovani betony na yikh osnovi. Avtoref. dys... d.t.n. 05.23.05. NU «Lvivska politekhnik» (2020) 36 s.
 18. Romanenko O.V., Kalinin O.A., Pluhin O.A., Pluhin A.A., Babii A.I. Analiz skladiv betonu dlia vyhotovlennia zalizobetonnykh shpal na zavodakh ZBSh Ukrainy. Naukovyi visnyk budivnytstva 80 (2) (2015) 144-147.
 19. Metodyka vyznachennia optymalnoho skladu vysokomitsnoho, trishchynostiikoho ta vodonepronyknoho betonu dlia konstruksii i sporud zaliznychnoho transportu. TsP-0224 Rekomendatsii iz zabezpechennia trishchynostiikosti plyt bezbalastnoho mostovoho polotna. UkrDAZT, TsP UZ, Kyiv (2010) 16–23.

20. СТ СЭВ 4421-83 Защита от коррозии в строительстве. Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Электрохимический метод испытаний.
21. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001, NEQ) Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови.
20. ST SEV 4421-83 Zashchita ot korrozii v stroitelstve. Zashchitnyye svoystva betona po otnosheniyu k stalnoy armature. Elektrokhimicheskii metod ispytaniy.
21. DSTU B V.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001, NEQ) Dobavky dlia betoniv i budivelnykh rozchyniv. Zahalni tekhnichni umovy.

Plugin A.A., Kaliuzhna O.V., Babii A.I, Pluhin O.A, Ovchinnikov O.O. INCREASING THE EARLY STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE SLEEPERS BY THE SUPERPLASTIFICATOR ADDITIVES. The influence of superplasticizer-polycarboxylate additives on the early concrete strength of reinforced concrete sleepers has been studied. It has been established that the use of superplasticizers-polycarboxylates can increase the early strength of concrete after heat treatment, but each additive must be tested for compatibility with the cement used. Electron microscopic studies have not revealed a significant change in the structure of hydration products due to the use of superplasticizers-polycarboxylates. The scheme of development of the cement setting process and the initial stage of hardening without additives or with additives of superplasticizers-polycarboxylates has been developed, which explains their accelerating effect consisting in reduction of water consumption, decrease in the primary thickness of interlayers between cement particles, mineral additives, aggregates, their filling with hydration products. As a result of potentiodynamic and microscopic studies it was found that the addition of superplasticizer-polycarboxylate has no corrosive effect on steel reinforcement. It was established that to obtain transfer strength of 32 MPa in 24 hours it is necessary to provide low-heat curing at the temperature of isothermal curing at 40-50°C, and in 2 days it is achieved with natural curing. It is recommended as the cost of energy carriers and additives changes, to monitor the economic efficiency of the reduction of the modes of TIE due to their use. The formula of economic efficiency of using additives to reduce the energy intensity of the production of reinforced concrete sleepers has been proposed.

Key words: reinforced concrete sleeper, concrete, early strength, chemical and mineral additives.