

УДК 691.32

**НАДШВИДКЕ ОТРИМАННЯ ПЕРЕДАТОЧНОЇ МІЦНОСТІ БЕТОНУ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСНИХ ДОБАВОК**

Д-р техн. наук А. А. Плугін, асп. О. В. Калюжна, кандидати техн. наук О. С. Борзяк,  
О. А. Плугін, асп. О. М. Савченко

**ULTRAFAST TRANSFER STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE SLEEPERS BY  
USING COMPLEX ADDITIVES**

D. Sc. (Tech.) A. Plugin, postgraduate student O. Kaliuzhna, PhD (Tech.) O. Borziak,  
PhD (Tech.) O. Pluhin, postgraduate student O. Savchenko  
DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248243>

*Анотація.* Досліджено вплив добавок суперпластифікаторів-полікарбоксилатів та їх комплексних добавок з прискорювачами – електролітами та дисперсією гідросилікатів кальцію на ранню міцність бетону залізобетонних шпал. Встановлено, що застосування суперпластифікаторів-полікарбоксилатів дає змогу підвищити ранню міцність бетону після тепловолісної обробки, проте кожену добавку необхідно перевіряти на сумісність із застосованим цементом. Їх комплексні з прискорювачами добавки в умовах природного твердіння забезпечують підвищення ранньої міцності бетону, проте деякі з них, що прискорюють природне твердіння, можуть знизити міцність після ТВО і мають перед застосуванням перевірятись. Проведено електронно-мікроскопічні дослідження структури цементного каменю з добавками, встановлено, що добавка лише полікарбоксилату майже не змінює структуру продуктів гідратації. Комплексні добавки призводять до утворення додаткової кількості кристалогідратів АFт- та/або АFт-фаз. Розроблено схему розвитку процесу тужавлення і початкової стадії твердіння цементу без добавок або з добавками, за допомогою яких встановлений експериментальними дослідженнями найбільший прискорюючий ефект комплексної добавки полікарбоксилату та дисперсії гідросилікатів кальцію пояснено тим, що частинки дисперсії збільшують площу поверхонь, на яких відбувається кристалізація (конденсація) продуктів гідратації цементу, та забезпечують більш швидке заповнення ними прошарків між частинками цементу (мінеральних добавок, заповнювачів) з утворенням ланцюжків з електрогетерогенними контактами. В результаті потенціодинамічних та мікроскопічних досліджень встановлено, що добавки у досліджених дозуваннях не спричиняють корозійного впливу на сталеву арматуру. Досягнуто величини передаточної міцності 32 МПа для шпал через 24 год твердіння за малопрогрівним режимом

і через 2 доби природного твердіння. Запропоновано формулу економічної ефективності використання добавок для зниження енергоємності виробництва залізобетонних шпал.

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

**Abstract.** The influence of superplasticizers-polycarboxylates and their complex additives with accelerants - electrolytes and dispersion of calcium hydroxylates on the early strength of concrete for concrete of concrete sleepers has been studied. It was found that the use of superplasticizers-polycarboxylates can improve the early strength of the concrete after heat treatment, but each additive must be checked for consistency with the cement used. Approx Complex additives with accelerators in conditions of natural hardening ensure an increase in the early strength of concrete, but some of them, which accelerate natural hardening, can reduce the strength after WWTP and must be checked before use. Electron-microscopic examinations of the structure of cement stone with additives were carried out and it was found that the additive of only polycarboxylate does not change the structure of hydration products. Complex additives lead to formation of additional number of crystalline hydrates of AFm- and/or AFt-phases. The scheme of development of the cement hardening process and the initial stage of cement hardening without or with additives has been developed. By means of which the highest accelerating effect of the complex addition of polycarboxylate and calcium hydroxylate dispersions was established by experimental investigations, Dispersion particles increase surface area where crystallization (condensation) of cement hydration products takes place and ensures faster filling of spaces between cement particles (mineral additives) with them, fillers) with establishment of lances with electro-heterogeneous contacts. As a result of potentiodynamic and microscopic investigations it was established that the tested additives in the dosages do not cause corrosion effect on the steel reinforcement bars. Transmission strength values of 32 MPa for sleepers after 24 years of hardening under low-heat regime and after 2 days of natural hardening have been achieved. The formula for economic efficiency of using additives to reduce the energy intensity of production of concrete sleepers has been proposed.

**Keywords:** reinforced concrete sleeper, concrete, early strength, chemical and mineral additives.

**Вступ.** Станом на 01.01.2021 розгорнута довжина колій залізниць загального користування в Україні сягала 27062,3 км, з яких 23902,0 км укладено на залізобетонних шпалах, яких нараховується 44304,8 тис. шт. Оскільки масова заміна дерев'яних шпал залізобетонними завершена ще у 1990-х рр. і нові шпали виробляються лише для капітального ремонту колій високих категорій, їх виробництво сьогодні здійснюється в менших обсягах, ніж проектна потужність наявних заводів. Нині шпали виробляються переважно трьома підприємствами: ПрАТ «Гніванський завод спецзалізобетону» (Гніванський ЗСЗБ), ПрАТ «Коростенський завод залізобетонних шпал» (Коростенський ЗЗБШ) та філією

«Старокостянтинівський завод залізобетонних шпал» АТ «Укрзалізниця». До 2010-х років значна кількість шпал вироблялась ще й ВАТ «Кременчуцький завод залізобетонних шпал» (Кременчуцький ЗЗБШ).

Шпали виробляють армованими пакетами із 44 шт. попередньо напруженого високоміцного дроту Ø3 мм і з бетону класу С32/40. Витрати цементу до 2010-х років перевищували 400 кг на метр кубічний. Шпали формують вібраційним способом у силових формах, на які перед заповненням бетонною сумішшю натягують арматурний пакет. Найбільші виробники – Гніванський ЗСЗБ, Коростенський ЗЗБШ, Кременчуцький ЗЗБШ – 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 (у шпал для рейкових скріплень клемно-болтового типу) шпали формують із жорстких бетонних сумішей. Тому використання пластифікуючих добавок для виробництва шпал 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 сягала 80 і навіть 90 °С, що забезпечувало досягнення передаточної міцності 32 МПа через 8–10 годин. У 2000-х років у зв'язку з різким здороженням енергоносіїв собівартість шпал також різко збільшилась, і з 2010-х років температура пропарювання була знижена до 40–50 °С завдяки збільшенню активності цементів, припиненню двозмінної роботи, удосконаленню пустотоутворювачів або їх заміні закладними анкерами (у шпал для рейкових скріплень анкерного типу). Проте через подальше здороження енергоносіїв зниження температури і тривалості ТВО залишалось актуальним. З 2010-х років починається застосування хімічних добавок, переважно суперпластифікаторів-полікарбоксилатів, що разом з підвищенням активності цементу дозволило знизити витрати цементу менше 400 кг на метр кубічний. У новому ДСТУ Б В.2.6-209:2016 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови» застосування добавок вже допускається. Проте повної відмови від ТВО досі не досягнуто. До застосування добавок – прискорювачів твердіння залишається дуже обережне ставлення через корозійний вплив на арматуру більшості електролітів у разі передозування, їх застосування у ДСТУ Б В.2.6-209:2016

обмежується. Тому пошук нових добавок – прискорювачів твердіння, придатних для бетону шпал, є актуальним завданням.

**Визначення мети і завдання дослідження.** Мета дослідження – обґрунтування виробництва попередньо напружених залізобетонних шпал з природним твердінням бетону за рахунок застосування добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння – неелектролітів.

Завдання досліджень: аналітичний огляд літературних даних про можливості підвищення ранньої міцності бетону за рахунок хімічних та мінеральних добавок; пошукові дослідження з визначення впливу добавок на ранню міцність бетону та вибір добавок; експериментальні дослідження залежності ранньої міцності бетону від вмісту обраних добавок; електронно-мікроскопічні дослідження впливу добавок на структуру цементного каменю; потенціодинамічні та мікроскопічні дослідження впливу хімічних добавок на корозію сталеві арматури.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Дослідження, спрямовані на удосконалення технології залізобетонних шпал, проводились в УкрДУЗТ під керівництвом О. П. Мчедлова-Петросяна з 1960-х років. [1]. До 1990-х років ці дослідження були присвячені інтенсифікації твердіння бетону, підвищенню якості та довговічності шпал. З 1960-х років проводились дослідження з прискорення твердіння бетону шпал різними способами, у т. ч. комплексними хімічними добавками, що містили пластифікатори та прискорювачі твердіння [2] з різними компонентами аж до таких «екзотичних», як хлорид амонію, амінооцтова кислота, оксалат амонію [3].

Ці роботи узгоджувались з розвитком вітчизняної та світової науки в галузі бетонознавства [4–6] та ін. В. Б. Ратіновим була розроблена продуктивна класифікація добавок у бетони [4] на чотири класи: 1 і 2 – солі-електроліти, що є в основному прискорювачами тужавлення і твердіння

(додатково поділені на 5 груп, рис. 1), 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.



Рис. 1. Класифікація В. Б. Ратінова добавок солей-електролітів – прискорювачів твердіння

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 [7]. Аналогічна проблема виникла і під час виробництва залізобетонних попередньо напружених опор контактної мережі [8], залізобетонних плит безбаластного мостового полотна [9].

А. М. Плугінім зі співробітниками було з'ясовано, що тріщиностійкість шпал залежить від характеру структури бетону, формалізованого через показники коефіцієнтів розсунення зерен щебеню цементно-піщаним розчином  $\alpha$  та зерен піску цементним тістом (каменем)  $\mu$  [10, 11]. Ці коефіцієнти характеризують ступінь заповнення простору між зернами щебеню та піску цементно-піщаним розчином та цементним каменем відповідно:

$$\alpha = \frac{V_{цпр}}{V_{нус}^{щ}} = \frac{\frac{\Pi}{\rho_{іст}^n} + \frac{\mathcal{C}}{\rho_{іст}^u} + \frac{B}{\rho^b}}{\frac{\mathcal{C}}{\rho_{нас}^{щ}} \cdot Пус^{щ}}}; \quad \mu = \frac{V_{цт}}{V_{нус}^n} = \frac{\frac{\mathcal{C}}{\rho_{іст}^u} + \frac{B}{\rho^b}}{\frac{\Pi}{\rho_{нас}^n} \cdot Пус^n}, \quad (1)$$

де  $V_{цпр}$ ,  $V_{цт}$  – об'єм цементно-піщаного розчину та цементного тіста відповідно в  $1 \text{ м}^3$  бетону,  $\text{м}^3$ ;  $V_{нус}^{щ}$ ,  $V_{нус}^n$  – об'єм пустот відповідно у щебені та піску, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  бетону, у вихідному (природно насипному) стані,  $\text{м}^3$ ;  $\mathcal{C}$ ,  $\Pi$ ,  $\mathcal{C}$ ,  $B$  – витрата відповідно щебеню, піску, цементу та води на  $1 \text{ м}^3$  бетону,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{іст}^{щ}$ ,  $\rho_{іст}^n$ ,  $\rho_{іст}^u$ ,  $\rho^b$  – істинна густина щебеню, піску, цементу та

густина води відповідно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{нас}^{щ}$ ,  $\rho_{нас}^n$  – насипна густина щебеню та піску відповідно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $Пус^{щ}$ ,  $Пус^n$  – пустотність щебеню та піску відповідно.

А. М. Пługінім, О. А. Калінінім та ін. вдалось майже усунути проблему недостатньої тріщиностійкості шляхом забезпечення оптимальних значень цих коефіцієнтів  $\alpha_{опт}$  і  $\mu_{опт}$  [11, 12]:

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

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

У разі дотримання  $\alpha_{опт}$  і  $\mu_{опт}$  забезпечуються також максимальні показники водонепроникності бетону та його міцності, у т. ч. у 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 їхньої якості, зокрема тріщиностійкості. А. М. Пługінім, А. А. Пługінім, О. В. Романенком та ін. було виконано дослідження [13–17], за результатами яких вдалось розробити склади бетону, що забезпечували значні зниження температури і тривалості тепловологісної обробки [18–19]. Підвищення ранньої міцності в цьому випадку було забезпечено сполученням оптимального складу бетону з  $\alpha_{опт}$  і  $\mu_{опт}$  з уведенням добавок суперпластифікатора сульфонафталфінформальдегіду 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 і, 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. Пługінім, Р. Ф. Руновою та ін. [20]. У 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 через хімічне зв'язування у гідрохлоралюмінати та гідронітроалюмінати кальцію. Проте у наукової і виробничої спільноти 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 роботі [21] 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 «малопаронагрівної та/або без пропарювальної» технології. Проте передаточна міцність за «безпропарювальною» технологією за 8–10 годин не досягається. У [22, 23] пропонується отримувати високу ранню міцність цементу і, 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 В. Б. Ратіновим [4], є мінеральні добавки – кристалічні затравки. Такою може бути метакаолін [24], проте він уводиться для запобігання внутрішній корозії бетону від взаємодії лугів цементу з активним кремнеземом заповнювачів і без додаткового диспергування не тільки не підвищує, а навіть знижує ранню міцність бетону. У [24] пропонується така добавка, як нанодисперсний сульфоалюмінат кальцію, яка отримується шляхом інтенсивного активуючого змішування гідроксиду та алюмінату кальцію і спільно з полікарбосилатом забезпечує високу ранню міцність. Широкі плідні дослідження з прискорення твердіння портландцементу та бетону останніми роками проводяться у Львівській політехніці під керівництвом М. А. Саницького [22, 23, 25, 26]. У роботах [25, 26] 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 й, очевидно, є недостатньою для шпал.

Аналіз ринку добавок показав, що на ньому з'явилися добавки, наприклад Master X-Seed 100 виробництва BASF, що є «суспензією активних наночастинок... для прискорення процесу гідратації на ранніх термінах (6–12 годин)». Регіональні представники компанії BASF не володіють інформацією про склад «суспензії», проте у [24, 26] шляхом фізико-хімічних досліджень встановлено, що вона є дисперсією гідросилікатів кальцію, на які вказував В. Б. Ратінов. Отже, для подальших досліджень як добавку прискорювач-неелектроліт обрано Master X-Seed 100. Проте останніми роками у виробництві та утриманні шпал виникли нові проблеми, що вимагають урахування під час досліджень утворення тріщин, пов'язане з новими факторами, такими як зміна конструкції скріплення на анкерне [27, 28], зміна якості цементу і заповнювачів, що часто обумовлює утворення у шпалах просторової сітки тріщин внаслідок взаємодії лугів цементу з кремнеземом реакційно здатних заповнювачів [29]. Для усунення тріщин у [28] запропоновано підвищити клас бетону шпал з С32/40 до С40/50, проте без підвищення передаточної міцності.

Таким чином, робочу гіпотезу досліджень можна сформулювати таким чином: максимальне підвищення ранньої міцності бетону можливе у разі застосування бетону оптимального складу з комплексною добавкою суперпластифікатора полікарбосилату і прискорювача, що не спричиняє корозійного впливу на арматуру, - дисперсії гідросилікатів кальцію як кристалічної затравки для швидкого утворення кристалогідратів.

#### **Основна частина дослідження**

*Матеріали і методи експериментальних досліджень.* Пошукові 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 [30].

Для експериментальних досліджень впливу добавок на властивості бетону 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; хімічні та мінеральні добавки, наведені у табл. 1, дозування яких визначали згідно з рекомендаціями виробників. Дозування  $CaCl_2$  та  $Ca(NO_3)_2$  прийняли згідно з [13, 14].

Таблиця 1

Добавки в бетон, застосовані для експериментальних досліджень

| Тип добавки                               | Назва добавки                    | Марка або хімічна формула | Виробник                            | Позначення | Дозування, мас. % від витрати цементу |
|---|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|------------|---------------------------------------|
| Суперпластифікатор - Аніонна ПАР          | Полікарбоксилат                  | K-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                                     |
| Прискорювачі твердіння – солі-електроліти | Хлорид кальцію                   | $CaCl_2$                  | Підприємства хімічної промисловості | ХНК        | 1 (0,5+0,5)                           |
|   | Нітрат кальцію                   | $Ca(NO_3)_2$              |                                     |            |                                       |
| Активна мінеральна добавка                | Дисперсія гідросилікатів кальцію | Master X-Seed 100         | BASF                                | ГСК        | 2; 6,48...7,3                         |

Склади бетону для експериментальних досліджень призначали за методикою УкрДУЗТ [12, 31] із забезпеченням визначених за формулою (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 та електронно-зондовий мікроаналіз локального елементного складу цементного каменю з добавками виконували на їх відколах за допомогою сканувального електронного мікроскопа

JEOL JSM-6390LV з енергодисперсійним спектрометром AZtechEnergy X-max<sup>n</sup> 50 (Японія). Зйомку проводили за прискорювальної 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. їхні 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 чотири серії по три зразки в кожній: 1 – контрольні без добавок (б/д); 2 – з добавкою 1 % Master Glenium ACE 430 (СП); 3 – з добавками 1 % Master Glenium ACE 430 і 2 % Master X-Seed100 (СП+ГСК); 4 – з добавками 1 % Master Glenium ACE 430, 0,5 %  $\text{CaCl}_2$  та 0,5 %  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (СП+ХНК).

Потенціодинамічні дослідження здійснювали за схемою, наведеною на рис. 2 згідно з [32] та з урахуванням вимог [22] за допомогою таких приладів та обладнання: потенціостат 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 у межах не менше 10–30 °С; 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 – скляна трубка діаметром 3–5 мм з краном, заповнена насиченим розчином хлористого калію.

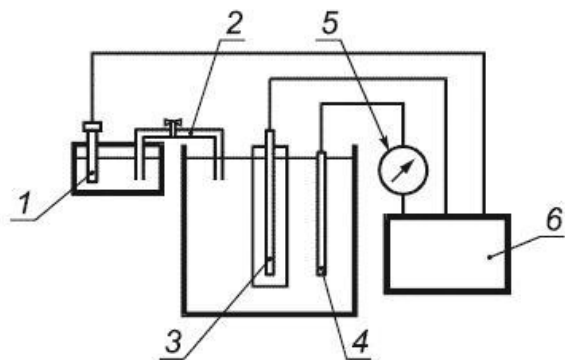


Рис. 2. Електрична схема зняття потенціодинамічних поляризаційних кривих: 1 – електрод порівняння; 2 – електролітичний ключ; 3 – зразок; 4 – допоміжний електрод; 5 – мікроамперметр; 6 – потенціостат

Електрохімічні вимірювання проведено після досягнення бетоном проектної міцності через 28 діб і 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 бетон, оголюючи арматурний стержень на 20 мм  $\pm$  10 мм. Вимірювання сили струму в мікроамперах виконували в зразку через 60  $\pm$  5 хвилин після вмикання потенціостата (рис. 2), після чого знімали анодну частину поляризаційної кривої при проходженні діапазону від потенціалу, що встановився, до плюс 1000 мВ протягом 60 хвилин. Густина струму  $i$ , мкА/см<sup>2</sup> 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<sup>2</sup>.

Площу робочої поверхні сталевого стержня, що стикається з бетоном,  $S$ , см<sup>2</sup>, розраховували за формулою:

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

де  $D$  – діаметр сталевого стержня, см;

$l$  – довжина сталевого стержня, що занурений у бетон, см.

Критерії оцінки захисної дії бетону до сталевій арматурі прийнято відповідно до [32, 33].

Оптико-мікроскопічні дослідження корозійного впливу добавок на сталеву арматуру здійснювали після витримання зразків протягом 1 року у перемінному рівні води за середньорічної температури 16 °С та звільнення поверхні арматури від бетону. Поверхню арматури вивчали за допомогою бінокулярного мікроскопа 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.* Пошукові дослідження виконані на Гніванському заводі спеціалізованого бетону. Визначено міцність на стиск бетону з добавками суперпластифікаторами полікарбоксилатного типу різних виробників, досягнута після тепловологісної обробки (через 24 год після формування). Зразки виготовляли із рівнорухомих сумішей, температура ізотермічної витримки складала 40–50 °С. Встановлено, що 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 МПа (на 9,3 %, Містім), 54,3 МПа (на 23,5 %, АрхБуд), 55,4 МПа (на 25,9 %, Plastidor). Застосування VisoCrete підвищення міцності не забезпечило, що може свідчити про її несумісність із застосованим цементом.

Отже, в результаті пошукових досліджень встановлено, що застосування тільки суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу дає змогу підвищити ранню міцність бетону після тепловологісної обробки за 40–50 °С на 9,3–25,9 % в основному за рахунок зниження В/Ц. Проте кожен добавку необхідно

перевіряти на сумісність із застосованим цементом.

Досліджено кінетику набору міцності на стиск під час природного твердіння за температури 18–20 °С бетону з добавками, у т. ч. комплексними. Отримані кінетичні криві наведено на рис. 3, величини досягнутої міцності після тепловологісної обробки, а також після 1, 7 та 28 діб природного твердіння наведено на рис. 4 і в табл. 2.

Із рис. 3, 4 і табл. 2 випливає, що досліджувані комплексні добавки не тільки підвищили міцність після тепловологісної обробки в будь-яких сполученнях, але й знизили її на 8,2–41,4 %. Навпаки, за природного твердіння всі досліджені добавки та їх сполучення обумовили підвищення міцності бетону в будь-які її терміни. Найбільшу міцність у ранній термін природного твердіння (1 доба) 20,8 МПа зі збільшенням міцності відносно контролю на 49,6 % забезпечило сполучення суперпластифікатора-полікарбоксилату з дисперсією гідросилікатів кальцію. Таке сполучення добавок забезпечило підвищення міцності відносно бетону без добавок на 49,6 %.

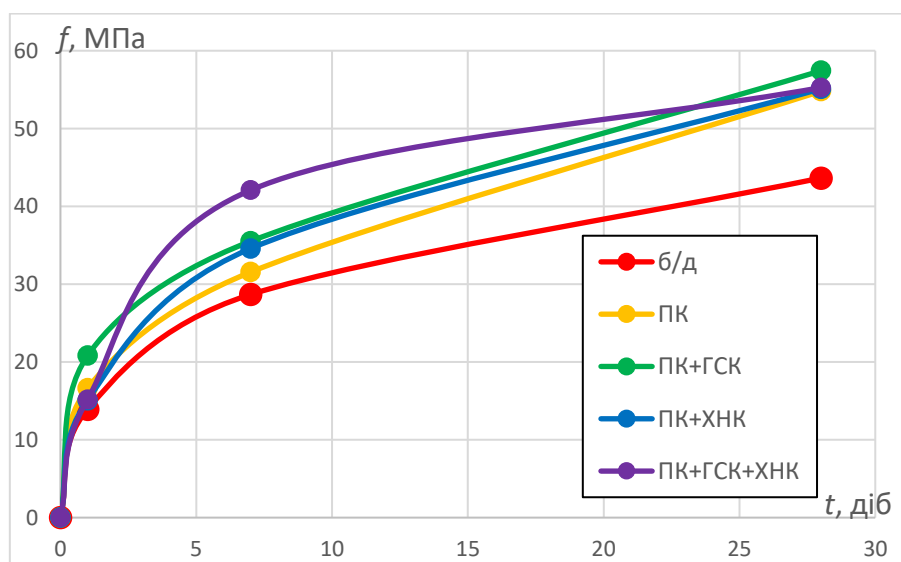


Рис. 3. Кінетика набору міцності бетону без добавок б/д і з добавками ПК, ПК+ГСК, ПК+ХНК, ПК+ГСК+ХНК

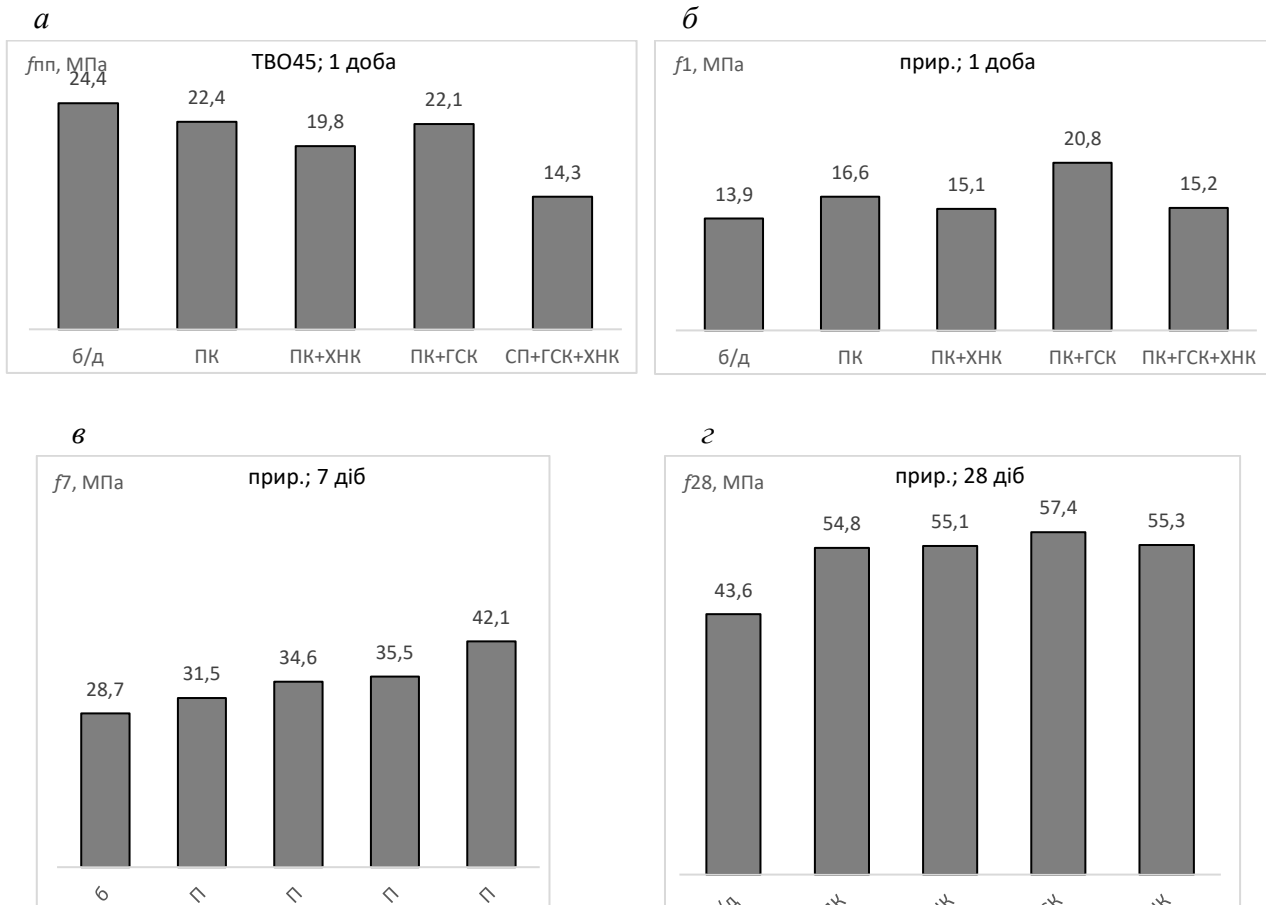


Рис. 4. Діаграми міцності бетону з добавками після пропарювання (а) і після 1 (б), 7 (в) та 28 (г) діб природного твердіння

Таблиця 2

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

| Сполучення добавок | Міцність на стиск $f$ , МПа |                                 |      |      | Підвищення міцності на стиск відносно бетону без добавки, % |                                 |       |       |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------------|------|------|---|---------------------------------|-------|-------|
|                    | після ТВО 45 °С             | після природного твердіння, діб |      |      | після ТВО 45 °С   | 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 |
| ПК+ГСК             | 22,1                        | 20,8                            | 35,5 | 57,4 | -9,4  | +49,6                           | +23,7 | +31,7 |
| ПК+ХНК             | 19,8                        | 15,1                            | 34,6 | 55,1 | -18,9   | +8,6                            | +20,6 | +26,4 |
| ПК+ГСК+ХНК         | 14,3                        | 15,2                            | 42,1 | 55,3 | -41,4   | +9,4                            | +46,7 | +26,8 |

Виконано електронно-мікроскопічні дослідження цементного каменю з добавками. На рис. 5 наведено електронно-мікроскопічні знімки цементного каменю

без добавок (б/д, рис. 5, а) з добавкою суперпластифікатора-полікарбоксилату Master Glenium ACE-430 (ПК, рис. 5, б), з комплексними добавками суперпластифікатора-

полікарбоксилату і прискорювача-електроліта (ПК+ХНК, рис. 5, в) і суперпластифікатора-полікарбоксилату та прискорювача твердіння Master X-Seed 100 (ПК+ГСК, рис. 5, з). За невеликих збільшень  $\times 50$ – $100$  (ліві знімки) структура цементного каменю майже не розрізняється. За великих збільшень  $\times 5000$ – $10000$  (центральні та праві знімки) структура продуктів гідратації відрізняється, зокрема у продуктах гідратації всіх зразків наявні як гелеподібні утворення гідросилікатів кальцію, так і кристалогідрати, з яких в усіх зразках спостерігаються лише гексагональні пластинки портландиту. З інших кристалогідратів лише в цементному камені без добавок і з добавкою ПК проглядаються окремі кубічні кристали алюмінатів кальцію, а в цементному камені без добавок, з добавками ПК і ПК+ГСК спостерігаються голчасті кристали *Aft*-фази – еtringіту, причому у зразках без добавок і з добавкою ПК їхня довжина не перевищує 2 мкм, а у зразках з ПК+ГСК досягає 5–7 мкм. Кристалічні утворення у зразках ПК+ХНК відрізняються від зазначених вище і є, очевидно, *AFm*-фазою, утвореною за участю не тільки сульфату, а й хлориду та нітрату кальцію. Це підтверджується результатами електронно-зондового мікроаналізу локального елементного складу, який показав у зразках з добавками ПК+ХНК незначну кількість хлору, очевидно, зв'язаного цією *AFm*-фазою. Таким чином, за результатами електронно-мікроскопічних досліджень можна зробити висновок, що добавка лише СП майже не змінює структуру продуктів гідратації. Комплексні добавки призводять до утворення додаткової кількості кристалогідратів: ПК+ХНК – *AFm*-фази, що містить хлорид та нітрат кальцію, а ПК+ГСК – *Aft*-фази еtringіту з більш довгими кристалами довжиною до 5–7 мкм.

Такі результати електронно-мікроскопічних досліджень дозволили пояснити механізм впливу добавки дисперсних гідросилікатів кальцію на

ранню міцність за допомогою схем, наведених на рис. 6. На схемах рис. 6, а, б бачимо прошарок між двома частинками цементу, зокрема фрагментів їх поверхонь  $C_3S$  і  $C_2S$ , які одразу після замішування 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. 6, в, з). Без застосування дисперсії ГСК, 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. 6, в), тому пластичність втрачається, а міцність набувається повільніше. В цьому випадку прискорення твердіння досягається застосуванням суперпластифікаторів, які дозволяють знизити витрату води, а отже, зробити меншою первинну товщину прошарків, скоротивши час на їх заповнення, прискорювачів-електролітів, які прискорюють хімічні реакції, забезпечують більш швидку коагуляцію або впливають за іншими механізмами класифікації В. Б. Ратінова (рис. 1). У випадку застосування добавки дисперсії гідросилікатів кальцію вони розподіляються по об'єму прошарків і відіграють роль кристалічних затравок – центрів кристалізації за В. Б. Ратіновим, на яких, як і на поверхнях  $C_2S$  частинок цементу, утворюються кристали *CH* і вже на них, конденсується гель  $C_2SH$  (рис. 6, з). Завдяки цьому прошарки набагато швидше заповнюються продуктами гідратації, які утворюють між частинками ланцюжки з електрогетерогенними контактами (рис. 6, е). Застосування одночасно з ГСК суперпластифікаторів і прискорювачів-електролітів має підвищити ефект

прискорення. Отже, встановлений експериментальними дослідженнями найбільший прискорюючий ефект добавки ПК+ГСК пояснюється тим, що частинки ГСК збільшують площу поверхонь, на яких відбувається кристалізація (конденсація)

продуктів гідратації цементу, та забезпечують більш швидке заповнення ними прошарків між частинками цементу (мінеральних добавок, заповнювачів) з утворенням ланцюжків з електрогетерогенними контактами.

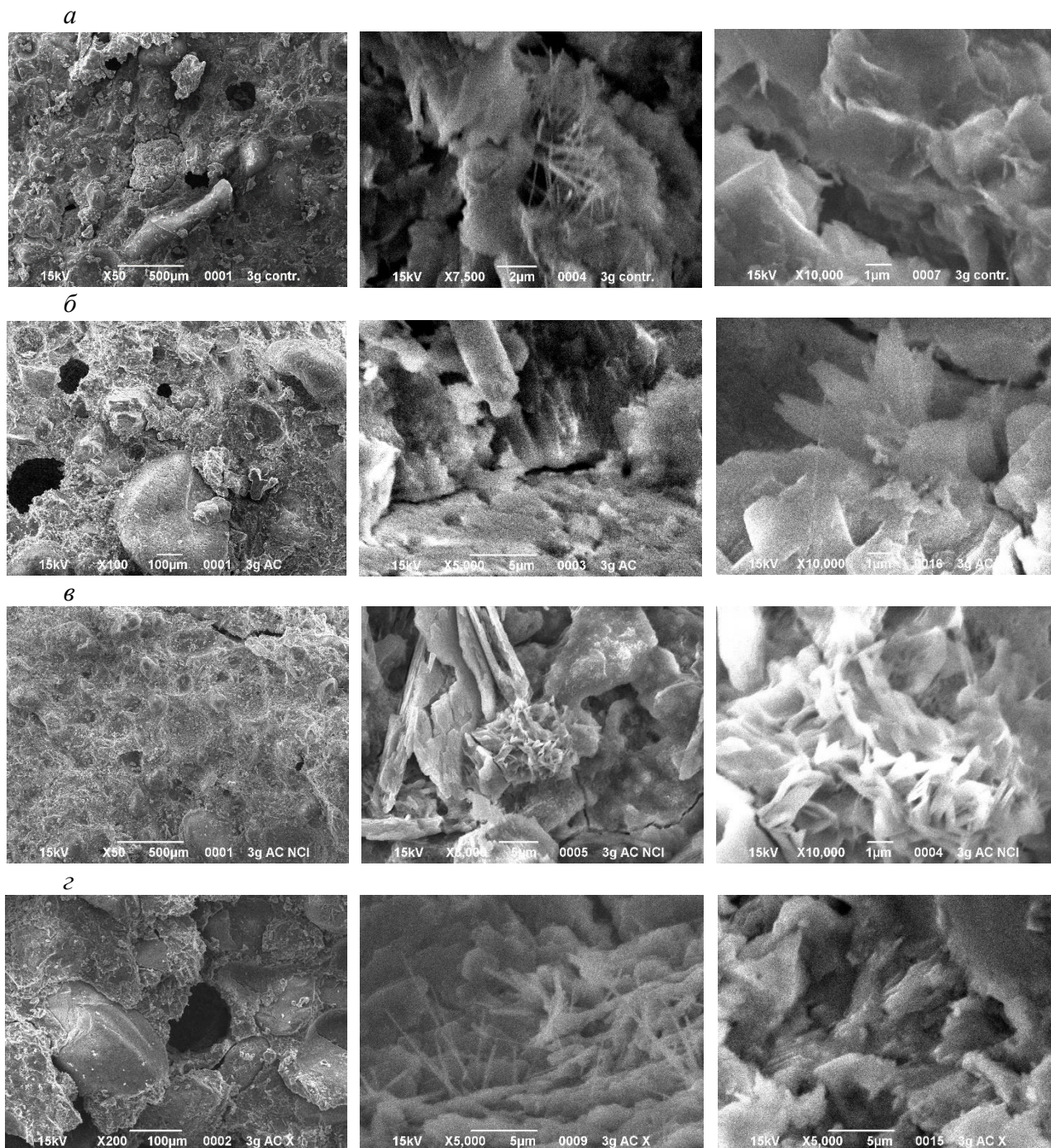


Рис. 5. Електронно-мікроскопічні знімки відколів цементного каменю без добавок б/д (а) і з добавками ПК (б), ПК+ХНК (в), ПК+ГСК (г). Збільшення від  $\times 50$  до  $\times 10000$

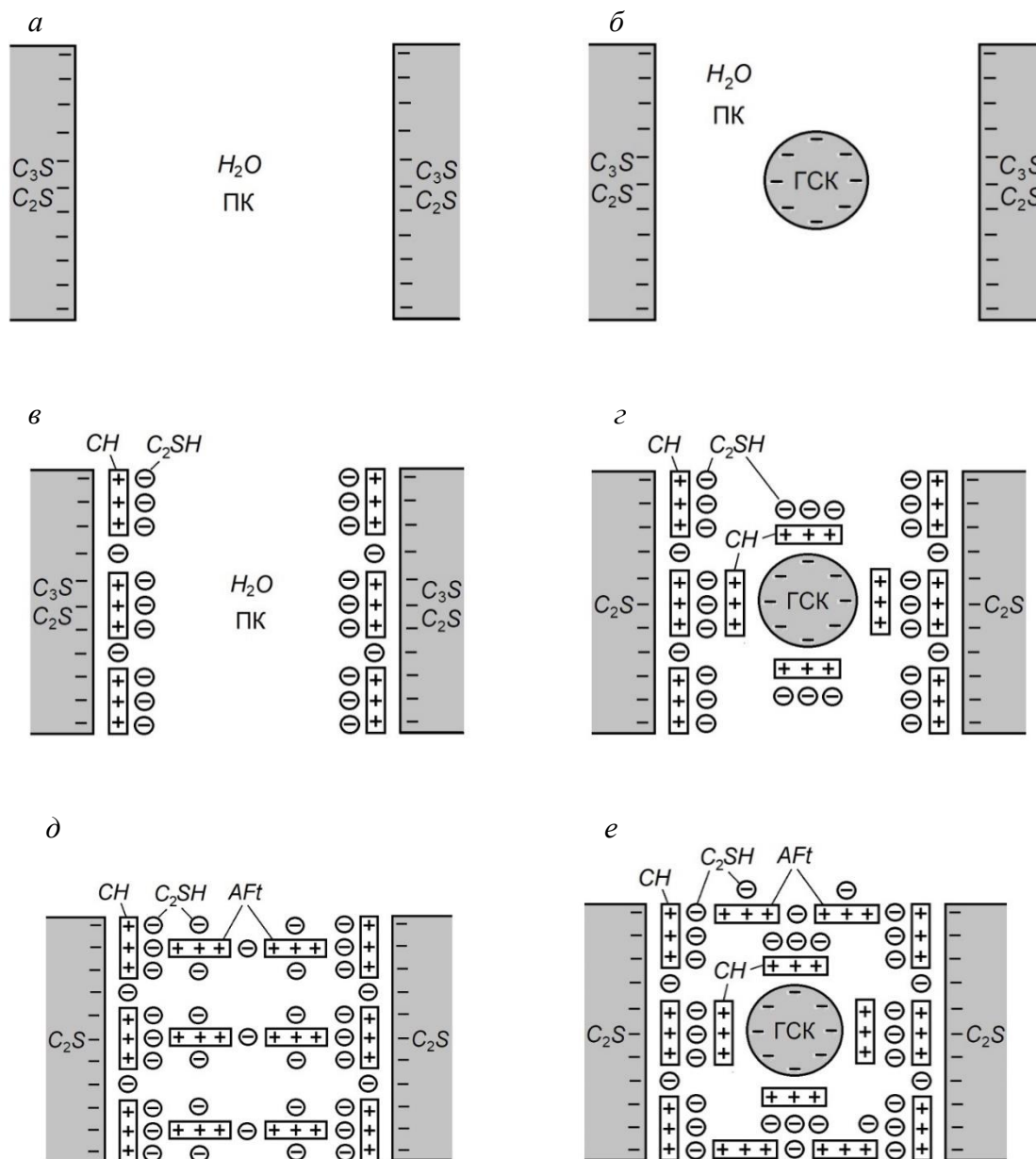


Рис. 6. Схема розвитку процесу тужавлення і початкової стадії твердіння цементу без добавок або з добавками ПК, ПК+ХНК (а, в, д) і з добавками ПК+ГСК (б, г, е): а, б – стан одразу після змішування водою; в, г – утворення перших продуктів гідратації поблизу поверхонь частинок цементу та добавки дисперсних гідросилікатів кальцію; д, е – подальше утворення продуктів гідратації в об'ємі.  $C_3S$ ,  $C_2S$  – клінкерні мінерали цементу; ПК – добавка-полікарбоксилат; ГСК – добавка дисперсних гідросилікатів кальцію;  $CH$  – кристалогідрати портландиту;  $C_2SH$  – гідросилікатний гель;  $AFt$  – кристалогідрати  $AFt$ -фази еtringіту (та/або  $AFm$ -фази для ПК+ХНК)

Корозійний вплив добавок на сталеву арматуру досліджено шляхом потенціодинамічних вимірювань. Результати дослідження у вигляді графіків

(поляризаційних кривих) у координатах: густина струму  $i$ , мкА/см<sup>2</sup>, – потенціал робочого електрода  $E$ , мВ, наведені на рис. 7 і в табл. 3. Як видно із рис. 7, за потенціалу

300 мВ (насичений каломельний електрод) густина струму як для контрольних зразків без добавок, так і для бетону з добавками після 28 діб та 6 місяців твердіння не перевищує 10 мкА/см<sup>2</sup>, що свідчить про те, що арматурна сталь в усіх випадках залишається в пасивному стані. Для бетону з комплексною добавкою суперпластифі-

катора полікарбосилату Master Glenium ACE-430 та дисперсії гідросилікатів кальцію Master X-Seed 100, судячи за мінімальними кутами нахилу поляризаційних кривих та величинами густини струму (3; 2; 52; 34 мкА/см<sup>2</sup>), спостерігається найменша корозійна небезпека, навіть менша, ніж для бетону без добавок.

Таблиця 3

Густина струму стікання з арматури у бетоні з добавками

| Добавки | Густина струму, мкА/см <sup>2</sup> , за накладеного потенціалу, В, 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     |
| ПК+ХНК  | 4,5   | 2      | 66     | 48     |
| ПК+ГСК  | 3   | 2      | 52     | 34     |

Результати світлової мікроскопії корозійного впливу бетону з добавками у вигляді знімків поверхні арматури наведені на рис. 8. У цілому вони підтверджують висновки потенціодинамічних вимірювань. На арматурі, що експонувалась у бетоні без добавок (рис. 8, а), слідів корозії не виявлено зовсім, у бетоні з добавкою ПК (рис. 8, б) спостерігається ледь видимий лише зі значним збільшенням  $\times 88$  коричнюватий наліт продуктів рівномірної корозії. На арматурі, що експонувалась у бетоні з добавками ПК+ХНК і ПК+ГСК, наліт продуктів корозії видимий краще, корозія нерівномірна (рис. 8, в, г).

Отже, встановлено, що досліджені добавки не спричиняють корозійного впливу на арматурну сталь, особливо ПК+ГСК, за якої густина струму стікання з арматури в бетон за накладеного потенціалу 0,9 В, зменшується з 60 до 34 мкА/см<sup>2</sup>, тобто на  $(60-34) \times 100 / 60 = 54\%$ .

Результати експериментальних досліджень у сукупності підтвердили

висунуте припущення про максимальне підвищення ранньої міцності бетону у разі застосування бетону оптимального складу з комплексною добавкою суперпластифікатора полікарбосилату і прискорювача, що не спричиняє корозійного впливу на арматуру, - дисперсії гідросилікатів кальцію як кристалічної затравки для швидкого утворення кристалогідратів. Проте величини передаточної міцності 32 МПа для шпал через 24 години твердіння досягти не вдалось (рис. 3, 4). Її отримання без підвищення температури можливо через 2 доби, отже, для партій шпал, заформованих у передвхідні 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 °С.

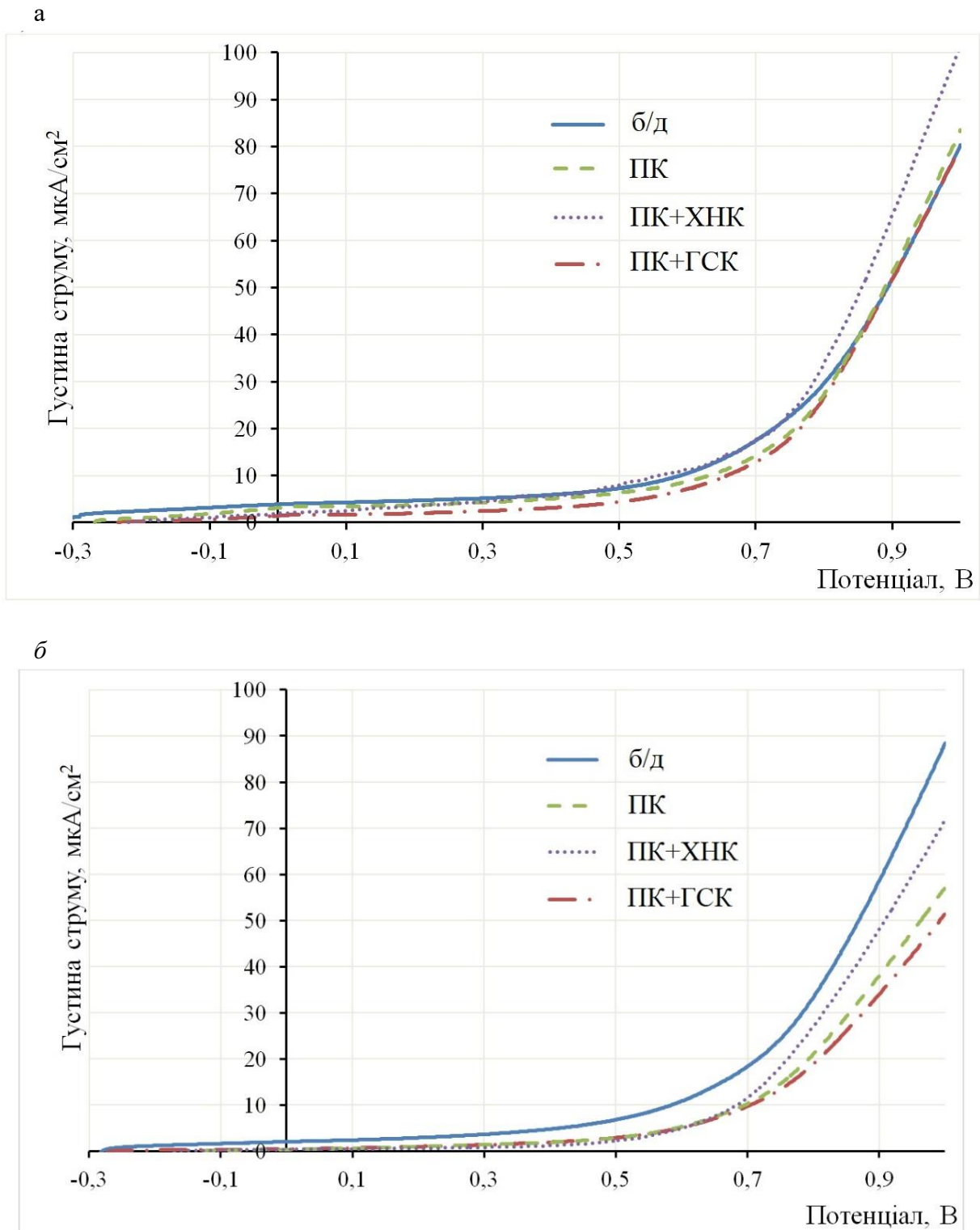


Рис. 7. Поляризаційні криві сталевих стержнів у бетоні з добавками після 28 діб (а) та 6 місяців (б) твердіння

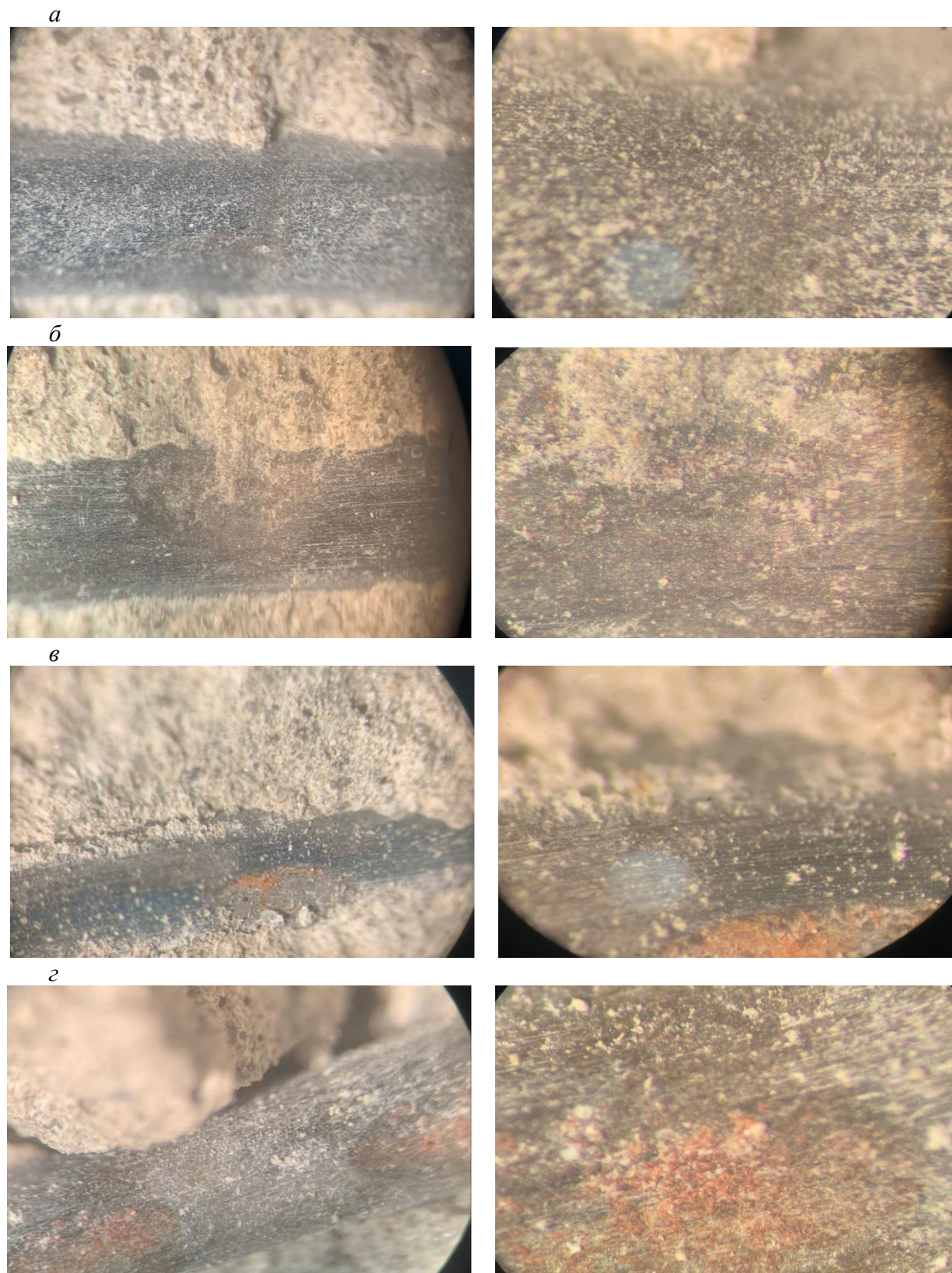


Рис. 8. Стан арматурного дроту після витримування протягом 1 року в перемінному рівні води зразків бетону без добавок б/д (а) і з добавками ПК (б), ПК+ХНК (в), ПК+ГСК (г).  
Світлова мікроскопія, збільшення  $\times 25$  (ліворуч),  $\times 88$  (праворуч)



**Висновки.** Встановлено, що комплексні добавки ПК і прискорювачів твердіння – електролітів (хлориду та нітрату кальцію ХНК) та/або дисперсії гідросилікатів кальцію ГСК в умовах природного твердіння забезпечують підвищення ранньої міцності бетону. Максимальне збільшення міцності відносно контролю на 50 % забезпечила добавка ПК+ГСК. Проте деякі комплексні добавки, що прискорюють природне твердіння, можуть знизити міцність після ТВО на 8–41 % і мають перед застосуванням перевірятись.

За результатами електронно-мікроскопічних досліджень встановлено, що добавка лише ПК майже не змінює структуру продуктів гідратації. Комплексні добавки призводять до утворення додаткової кількості кристалогідратів: ПК+ХНК – *AFm*-фази, що містить хлорид та нітрат кальцію, а ПК+ГСК – *Aft*-фази еtringіту з більш довгими кристалами довжиною до 5–7 мкм. Розроблено схему розвитку процесу тужавлення і початкової стадії твердіння цементу без добавок або з добавками ПК, ПК+ХНК, ПК+ГСК, за допомогою яких встановлений експериментальними дослідженнями найбільший прискорювальний ефект добавки ПК+ГСК пояснено тим, що частинки ГСК збільшують площу поверхонь, на яких відбувається кристалізація (конденсація) продуктів гідратації цементу, і забезпечують більш

швидке заповнення ними прошарків між частинками цементу (мінеральних добавок, заповнювачів) з утворенням ланцюжків з електрогетерогенними контактами.

У результаті потенціодинамічних та мікроскопічних досліджень встановлено, що добавка ПК та комплексні добавки ПК+ХНК і ПК+ГСК у досліджених дозуваннях не спричиняють корозійного впливу на сталеву арматуру, особливо ПК+ГСК, з якою густина струму стікання з арматури в бетон за накладеного потенціалу 0,9 В зменшується відносно бетону без добавок з 60 до 34 мкА/см<sup>2</sup>, тобто на 54 %.

Результати експериментальних досліджень у сукупності підтвердили висунуте припущення про максимальне підвищення ранньої міцності бетону у разі застосування бетону оптимального складу з комплексною добавкою суперпластифікатора-полікарбоксилату і прискорювача, що не спричиняє корозійного впливу на арматуру, - дисперсії гідросилікатів кальцію як кристалічної затравки для швидкого утворення кристало-гідратів. Проте величини передаточної міцності 32 МПа для шпал через 24 години природного твердіння досягти не вдалось. Її отримання можливо через 2 доби, отже, для партій шпал, заформованих у передвихідні та передсвяткові дні. Для партій шпал, розпалублення яких здійснюється через 24 години, має застосовуватись малопрогрівний режим твердіння за температур 40–50 °С.

### Список використаних джерел

1. Железобетонные шпалы (Вопросы изготовления и эксплуатации. Проблемы надежности и долговечности) / под ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. *Труды ХИИТа*. 1971. № 122. 64 с.
2. Мчедлов-Петросян О. П., Ушеров-Маршак А. В., Колесниченко Л. К. Основы и методы ускорения твердения бетона. *Труды ХИИТа*. 1966. № 86. С. 18–30.
3. Гасан Ю. Г., Кутах А. П. Комплексные добавки – интенсификаторы твердения бетона. *Интенсификация производства сборного железобетона: межвуз. сб. научн. тр. ХИИТ*. 1986. С. 28–30.
4. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. Москва: Стройиздат, 1989. 188 с.
5. Ramachandran V. S., Feldman R. F. Concrete admixture handbook. Properties, Science, and Technology. Noyes Publication. USA, 1984.
6. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. Москва, 1998. 768 с.

7. Рыльцева Т. Н. Повышение трещиностойкости защитного слоя струнбетона в зоне передачи напряжений: автореф. дис. ... к. т. н.: 05.23.05/ ХАДИ. Харьков, 1986. 20 с.
8. Плугин А. А. Повышение качества опор контактной сети на основе применения статистических методов. *Интенсификация производства сборного железобетона*: межвуз. сб. научн. тр. ХИИТ. 1990. № 13. С. 51–57.
9. Систематизація пошкоджень залізобетонних плит безбаластного полотна залізничних мостів / А. А. Плугін, О. А. Забіяка, С. В. Мірошніченко, Г. О. Линник, А. І. Бабенко. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2009. № 109. С. 120–131.
10. Плугин А. Н., Калинин О. А., Либенко Ю. П. Особенности структурных характеристик бетона  $\alpha$  и  $\mu$ . *Интенсификация производства сборного железобетона*: межвуз. сб. научн. тр. ХИИТ. 1990. № 13. С. 62–71.
11. Калинин О. А. Совершенствование состава и структуры бетона для повышения трещиностойкости железобетонных изделий: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / ХДТУБА. Харків, 1996. 20 с.
12. Пат. 62613 UA Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону. А. М. Плугін, О. А. Калінін, С. В. Мірошніченко, А. А. Плугін, С. М. Кудренко, В. А. Лютий, А. В. Никитинський, І. В. Подтележнікова, Г. О. Линник, М. Д. Костюк, В. О. Яковлев. *УкрДАЗТ*. Заявл. 15.04.2003, № 2003043396. Опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.
13. Плугін А. А., Романенко О. В., Яковлев В. О. Обґрунтування скорочення енерговитрат при тепловологісній обробці залізобетонних шпал. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2009. № 109. С. 38–56.
14. Романенко О. В., Плугін А. А., Яковлев В. О. Уточнення оптимальної витрати добавки суперпластифікатора при виробництві залізобетонних шпал без тепловологісної обробки. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2010. № 115. С. 97–103.
15. Развитие теоретических представлений о ранней прочности цементного камня и бетона и механизме формирования их первичной структуры / А. В. Романенко, А. А. Плугин, А. Н. Плугин, О. А. Калинин, Ал. А. Плугин. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. 59 (5/10). С. 28–32.
16. Вплив добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння на кінетику набору міцності цементним каменем / А. А. Плугін, О. В. Романенко, О. А. Калінін, О. А. Плугін, О. В. Афанасьев. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2015. 1130 (21). С. 14–22.
17. Reducing of energy intensity of concrete sleepers production using superplasticizer sand hardening accelerators / A. A. Plugin, A. N. Plugin, O. A. Plugin, O. V. Romanenko, O. A. Kalinin, S. V. Miroshnichenko, A. I. Babii, N. M. Partala. 19 Ibausil, Weimar, 2, 2015. 1125–1133.
18. Пат. 99426 UA Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон. Плугін А. А., Плугін А. М., Романенко О. В., Плугін О. А., Калінін О. А., Плугін Д. А., Мірошніченко С. В.; *УкрДАЗТ*. Заявл. 14.12.2011. Заявка № а 2011 14838. Опубл. 10.08.2012. Бюл. № 15.
19. Склади бетону з добавками суперпластифікаторами і прискорювачами твердіння для виробництва залізобетонних шпал без пропарювання / А. А. Плугін, О. В. Романенко, А. І. Бабій, О. А. Калінін, О. А. Плугін. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2015. 155. С. 62–72.
20. 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, 201869-73. DOI:10.4028/www.scientific.net/JERA.36.69.
21. Серенко А. Ф., Петрова Т. М. Беспропарочная технология производства подрельсовых конструкций / Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. Москва, 2012. 136 с.

22. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Kruts T., Horpynko O., Geviuk I. Design of rapid hardening quaternary zeolite-containing Portland-composite cements. *Key Engineering Materials*. 761 (2018). P. 193-196. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.761.193.
23. Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Y. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 84 (6/6), P. 50–57.
23. Дворкін Л. Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах. Київ: КНУБА, 2007. 216 с.
24. Кривобородов Ю. Р., Еленова А. А. Применение микродисперсных добавок для ускорения твердения цемента. *Строительные материалы*. 2016. № 9. С. 65–67.
25. Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Y. Nanomodified Portland cement compositions with alkaline activation. *Budownictwo o zoptymalizowanym potenciale energetycznym: Praca zbiorowa*. 2016. 2(18). С. 119–128.
26. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucinska T., Rykhlytska O. Development of nanomodified rapid hardening clicker-efficient concretes based on Portland-composite cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 100 (4/6). P. 38–48.
27. Досвід експлуатації залізобетонних шпал з пружними рейковими скріпленнями, розробленими в УкрДАЗТ / А. М. Пługін, А. А. Пługін, Ю. Л. Тулей, С. В. Мірошніченко та ін. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2014. 148 (2). С. 92–103.
28. Plugin A. A., Mirosnichenko S. V., Lobiak O. V., Kalinin O. A., Plugin D. A. Crack resistance of reinforced-concrete sleepers with elastic rail fastening systems without base-plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1002 (1) (2020) 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/1002/1/012010.
29. Вплив корозії бетону від взаємодії лугів цементу з реакційно здатними заповнювачами на пошкодження залізобетонних шпал у колії / А. А. Пługін, О. П. Крикун, В. В. Зінченко, О. С. Борзяк, О. А. Дудін. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2021. № 196. С. 43–57.
30. Аналіз складів бетону для виготовлення залізобетонних шпал на заводах ЗБШ України / О. В. Романенко, О. А. Калінін, О. А. Пługін, А. А. Пługін, А. І. Бабій. *Науковий вісник будівництва*. 2015. 80 (2). С. 144–147.
31. 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.
32. СТ СЭВ 4421-83. Защита от коррозии в строительстве. Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Электрохимический метод испытаний.
33. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001, NEQ) Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови.

---

Пługін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії та транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: (057) 730-10-58. E-mail: aaplugin@gmail.com.

Калюжна Олена Вячеславівна, аспірант кафедри залізничної колії та транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-5371-7502.

E-mail: kaliuzhna.el@gmail.com.

Борзяк Ольга Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій і споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936.

E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Пługін Олексій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039.

E-mail: pluhin\_bmg@kart.edu.ua.

---

Савченко Олександр Михайлович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій і споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4610-289X.  
E-mail: savcenkoa285@gmail.com.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), Professor and Head of Railway Tracks And Transport Facilities Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: (057) 730-10-58.  
E-mail: aapugin@gmail.com.

Kaliuzhna Olena, postgraduate student, Railway Tracks And Transport Facilities Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-5371-7502. E-mail: kaliuzhna.el@gmail.com.

Borziak Olga, PhD (Tech). Associate Professor, Department Of Building Materials And Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Pluhin Oleksii, PhD (Tech). Associate Professor, Department Of Structural Mechanics And Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039. E-mail: pluhin\_bmg@kart.edu.ua.

Savchenko Oleksandr, postgraduate student, Department Of Building Materials And Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4610-289X. E-mail: savcenkoa285@gmail.com.

Статтю прийнято 16.06.2021 р.