

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Українська державна академія залізничного транспорту

**РОМАНЕНКО Олександр Валерійович**

УДК 691.32

**ОСОБЛИВОШВИДКОТВЕРДНУЧИЙ БЕЗПРОПАРЮВАЛЬНИЙ БЕТОН  
ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ  
БЕЗ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ**

Спеціальність 05.23.05 - будівельні матеріали та вироби

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
Плугін Андрій Аркадійович,  
Українська державна академія  
залізничного транспорту,  
завідувач кафедри будівельних матеріалів,  
конструкцій та споруд

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Дворкін Олег Леонідович,  
Національний університет водного господарства  
і природокористування,  
професор кафедри технології  
будівельних виробів і матеріалознавства

кандидат технічних наук, доцент  
Толмачов Сергій Миколайович,  
Харківський національний автомобільно-  
дорожній університет,  
доцент кафедри технології дорожньо-будівельних  
матеріалів

Захист відбудеться 13 грудня 2012 р. о 13.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Української державної академії залізничного транспорту за адресою: Україна, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: Україна, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7

Автореферат розісланий «    » листопада 2012 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент

Г.Л. Ватуля

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** На залізницях України продовжується переукладання залізничних колій з дерев'яних шпал на попередньо напружені залізобетонні. Потреба в нових залізобетонних шпалах становить близько 963 тис. шт. на рік. При виготовленні попередньо напружених залізобетонних шпал передачу попереднього напруження арматури проводять через 8–10 годин після формування, забезпечуючи передатну міцність за рахунок тепловологісної обробки парою, що виробляється газовими котельними. З огляду на дорожнечу газу, відмова від пропарювання і виготовлення шпал за безпропарювальною технологією є актуальним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Української державної академії залізничного транспорту у складі держбюджетної теми плану НДДКР Мінтрансв'язку України № ДР 0110U002128 «Розробка теоретичних основ та експериментальні дослідження впливу струмів витоку та блукаючих струмів на бетон та розчин бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій», госпдоговірних тем плану НДДКР Укрзалізниці: № 5/07-ЦТех-344/07-ЦЮ «Проведення досліджень та розробка рекомендацій по застосуванню пластифікаторів та прискорювачів твердіння при виготовленні залізобетонних шпал та плит безбаластного мостового полотна» та ін.

**Мета дослідження** – розроблення особливошвидкотверднучого бетону з добавками суперпластифікатором і прискорювачем твердіння для виготовлення залізобетонних шпал без тепловологісної обробки.

**Наукова гіпотеза досліджень:** отримання особливошвидкотверднучого бетону для виготовлення залізобетонних шпал без тепловологісної обробки може бути забезпечено шляхом оптимального складу бетону із застосуванням добавок суперпластифікатора і прискорювача твердіння в оптимальних кількостях.

### **Завдання дослідження:**

- виконати критичний аналіз існуючих способів прискорення твердіння бетону, уявлень про оптимальні структурні характеристики бетону на макро-, мезо- та мікрорівнях з позиції підвищення його ранньої міцності, обрати добавки суперпластифікатори і прискорювачі твердіння для детальних досліджень;

- розробити методики дослідження реологічних та структурних характеристик цементно-водних систем і бетонів на ранній стадії їх природного твердіння;

- розвинути теоретичні уявлення з відповідними фізико-математичними моделями і схемами про кінетику природного твердіння цементного каменю і бетону, механізми формування ранньої структури і міцності бетону, механізми дії добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння в бетонах з жорстких бетонних сумішей на основі положень колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів;

- виконати комплексні експериментальні дослідження, в т.ч. фізико-хімічні, що підтверджують або уточнюють наукову гіпотезу і розроблені теоретичні уявлення, і на цій основі остаточно обрати оптимальний склад бетону і комплекс добавок;

- виконати опрацювання технології виготовлення залізобетонних шпал без тепловологісної обробки в умовах, максимально наближених до заводських, з перевіркою якості бетонної суміші, бетону і шпал, а також виробничу перевірку і впровадження результатів досліджень при виготовленні шпал на заводі ЗБШ, при капітальному ремонті штучних споруд залізниць, при розробленні галузевих нормативних та інструктивних документів.

**Об'єкт дослідження** – цементно-водні системи ЦВС, цементний камінь, бетон, залізобетонні шпали для залізничної колії.

**Предмет дослідження** – процеси твердіння, формування структури і властивостей ЦВС, цементного каменю і бетону, механізми дії добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння, властивості бетону і залізобетонних шпал.

**Методи дослідження.** Дослідження фізико-механічних властивостей цементного каменю, бетону і шпал здійснювалися стандартними методами і за оригінальними методиками, фазового складу і структури цементного каменю – фізико-хімічними методами рентгенофазового аналізу, інфрачервоної спектроскопії, скануючої електронної мікроскопії, електричних характеристик бетону і шпал – за оригінальними методиками за допомогою стандартних вимірювальних приладів і спеціально розроблених датчиків і установок.

**Достовірність результатів досліджень** забезпечена використанням в теоретичних дослідженнях фундаментальних положень і закономірностей колоїдної хімії, фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів, в експериментальних дослідженнях – комплексу незалежних стандартних і оригінальних фізико-механічних, фізико-хімічних і електрометричних методів, статистичної обробки результатів досліджень, а також підтвердженням результатів теоретичних і експериментальних досліджень виробничими та експлуатаційними випробуваннями.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Розроблено теоретичні уявлення і схеми будови первинного каркаса бездобавочної і з добавкою суперпластифікатором цементно-водної системи ЦВС. У бездобавочній ЦВС первинний каркас формується за рахунок міцних електрогетерогенних контактів ЕГК між блоками первинного еtringіту на поверхні  $C_3A$  і глобулами реакційного шару на поверхні  $C_3S$ . У ЦВС з добавкою суперпластифікатором – сульфонафталінформальдегідом С-3 первинний каркас формується за рахунок блоків первинного портландиту на поверхні  $C_3S$  і завершується при накопиченні між ними в достатній кількості глобул гідросилікатного гелю, що утворюють з блоками портландиту міцні ЕГК.

2. Встановлено, що для формування міцного первинного каркаса ЦВС та досягнення ранньої міцності бетону найбільш прийнятною за вибірковою адсорбцією на  $C_3A$  і здатністю вбудовуватися в первинний каркас без порушення його структури є добавка суперпластифікатор – сульфонафталінформальдегід С-3. Незначна міцність первинного каркаса бездобавочної ЦВС обумовлена незначною часткою  $C_3A$  на поверхні цементу, а набагато більша міцність первинного каркаса з добавкою С-3 обумовлена значно більшою часткою  $C_3S$  на поверхні частинок цементу.

3. Встановлено, що в цементному тісті і камені особливошвидкотверднучого бетону С-3 виконує не тільки пластифікуючу і

водоредукуючу, але і структуроутворюючу функцію, вбудовуючись у загальну структуру первинного каркаса, а хлорид кальцію – не тільки прискорюючу, а також структуроутворюючу функцію, зміцнюючи електрогетерогенні контакти.

4. Розроблено склад особливошвидкотверднучого безпропарювального бетону з оптимальними значеннями коефіцієнтів розсунення зерен щебеню  $\alpha_{\text{опт}}$  і піску  $\mu_{\text{опт}}$ , водоцементного відношення  $(В/Ц)_{\text{опт}} = 0,32$ , витрати добавок суперпластифікатора С-3 – 0,45 % і прискорювача твердіння хлориду кальцію 1% від маси цементу, що забезпечує передатну міцність бетону 32 МПа через 12–16 годин твердіння при температурі до 30 °С.

5. Отримано рентгенограми, інфрачервоні спектри поглинання, електронномікроскопічні знімки цементного каменю через 12 годин безпропарювального твердіння, а також результати їх інтерпретації.

**Практичне значення отриманих результатів.** За результатами теоретичних і експериментальних досліджень розроблено особливошвидкотверднучий бетон, що забезпечує виготовлення попередньо напружених залізобетонних шпал та аналогічних виробів без тепловологісної обробки (при температурі до 30 °С) за 12–16 годин. Розроблено методику визначення складу бетону. Зазначені розробки впроваджені при виготовленні дослідно-промислової партії залізобетонних шпал на підприємстві «ТД Україна Промресурс» (Кременчуцький ЗЗБШ), а також при розробленні проектів та капітальному ремонті ряду штучних споруд Південної залізниці. При особистій участі автора розроблено 5 інструктивних та рекомендаційних документів Укрзалізниці: ЦП 0224 «Рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит безбаластного мостового полотна»; «Рекомендації для застосування пластифікаторів та прискорювачів твердіння при виготовленні залізобетонних шпал і плит безбаластного мостового полотна»; «Рекомендації із захисту від корозії елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях»; «Рекомендації із захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів, на яких закріплена контактна мережа»; «Рекомендації із захисту та підсилення конструкцій пасажирських платформ на електрифікованих ділянках залізниць». Матеріали дисертації використовуються в УкрДАЗТ у навчальному процесі в лекційних курсах, на лабораторних і практичних заняттях, у курсовому та дипломному проектуванні. Економічний ефект від впровадження результатів досліджень склав 1206,402 тис. грн. Соціальний ефект від впровадження полягає в економії газу, а також підвищенні безпеки руху поїздів на ділянках з відремонтованими штучними спорудами.

**Особистий внесок здобувача.** Критичний аналіз існуючих уявлень, узагальнення даних про особливості технології виготовлення залізобетонних шпал і плит безбаластного мостового полотна, експериментальні дослідження і аналіз більшої частини їх результатів, розрахунки за розробленими рівняннями і формулами, експлуатаційна перевірка результатів досліджень, впровадження складів на заводі виконані автором особисто. Розроблення наукової гіпотези та нових наукових положень виконані спільно з науковим керівником, впровадження результатів досліджень – спільно з співавторами публікацій, яким автор висловлює щире подяку.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 9 наукових працях, з них 7 статей у збірниках наукових праць, що входять до

переліку рекомендованого ДАК МОН молоді та спорту України, додатково, – 1 стаття в науково-технічному журналі, 1 патенті України на корисну модель.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, основних висновків, списку літератури з 135 найменувань на 14 сторінках; містить 120 сторінок основного тексту, 109 рисунків, 29 таблиць, 4 додатки; повний обсяг – 241 сторінка.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульована мета та поставлені завдання досліджень, обрані стандартні і розроблені оригінальні методи та методики досліджень, викладені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів досліджень, відомості про структуру дисертації, публікації та апробації роботи.

У розділі 1 виконано аналітичний огляд та аналіз літературних даних, виявлено специфічні характеристики бетонної суміші та бетону для залізобетонних шпал, можливості збільшення ранньої міцності бетону. Показано, що бетонна суміш повинна мати структурну міцність, яка дозволяє витримувати зсувні впливи при видаленні пустотоутворювачів і торцевих перегородок з форм, а міцність бетону через 12–16 годин твердіння має досягати значення передатної не менше 32 МПа. Показано, що з числа існуючих способів підвищення ранньої міцності бетону найбільш ефективними є застосування добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння.

Проте в даний час при виробництві залізобетонних шпал хімічні добавки не застосовуються, що в основному пов'язано з обмеженнями, встановленими правилами їх застосування ДБН В.2.7-64-97 та ін. Зазначеними нормами заборонено застосування більшості добавок електролітів для залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в зоні дії блукаючих постійних струмів, що пов'язано з їх здатністю знижувати електроопір бетону. Крім того, застосування суперпластифікаторів при виготовленні залізобетонних шпал не знайшло місця через неможливість реалізації водоредукуючого ефекту для жорстких бетонних сумішей. Однак деякі з добавок електролітів (хлориди, нітрати, сульфати) можуть зв'язуватися цементом в індивідуальні або традиційні продукти гідратації. За З.М. Ларіоною, їх катіон  $Ca^{2+}$  і аніони  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  і  $SO_4^{2-}$  зв'язуються в гідрохлоралюмінати, гідронітроалюмінати і гідросульфоалюмінати кальцію.

Виконано аналіз можливостей отримання необхідної ранньої міцності бетону за допомогою наявних на ринку комплексних добавок суперпластифікаторів з прискорювачами. Проаналізовано Релаксол-Темп 3 (Україна), Реламікс Т-2, УП-4, Пластил-У, Форт УП-2М, Лігнопан Б-2, Петролафс (Росія), Betodur NA (Чехія). Приріст ранньої міцності бетону з цими добавками становить 33–47 %, що значно менше, ніж з хлоридом кальцію, нітратом кальцію, сульфатом натрію.

Таким чином, критичний аналіз існуючих даних не дозволив вибрати з доступних комплексних добавок таку, яка забезпечить передатну міцність бетону шпал 32 МПа за 12–16 годин природного твердіння. У зв'язку з викладеним виникла необхідність дослідження впливу на міцність бетону інших факторів. На основі аналізу робіт А.М. Плугіна, А.А. Плугіна, О.А. Калініна, С.В. Мірошніченка, присвячених створенню високоміцних

водонепроникних тріщиностійких бетонів з високою довговічністю, встановлено, що значне збільшення ранньої міцності можуть забезпечити оптимальні структурні характеристики бетону на різних рівнях структури (макро-, мезо-, мікро-) – коефіцієнти розсунення зерен щебеню і піску  $\alpha_{\text{опт}}$  і  $\mu_{\text{опт}}$ , водо-цементне відношення  $(В/Ц)_{\text{опт}}$ .

У розділі 2 наведено характеристики використаних матеріалів і методів досліджень. В експериментальних дослідженнях застосовувалися: портландцемент ПЦ І-500Н; пісок кварцовий з модулем крупності 1,1–1,2; щебінь гранітний суміші фракції 5–20 мм; вода водопровідна; добавка суперпластифікатор сульфонафталінформальдегід С-3 (СП-1) виробництва ВАТ «Поліпласт» (м. Новомосковськ Тульської обл.); добавки прискорювачі твердіння хлорид кальцію ХК, хлорид натрію ХН, сульфат натрію СН, нітрат натрію НН, нітрат кальцію НК.

Реологічні характеристики ЦВС оцінювали за її умовною в'язкістю (часом витікання з калібрувального отвору віскозиметра ВЗ-1), бетонної суміші – за вібророзтічністю (за аналогією зі способом визначення жорсткості Б.Г. Скрамтаєва). Фізико-механічні властивості цементного каменю, бетону і шпал визначали стандартними методами і за оригінальними методиками, в т.ч. розробленою автором методикою визначення опору бетону проковзуванню арматурного дроту. Фазовий склад і структуру цементного каменю досліджували фізико-хімічними методами: рентгенофазового аналізу за допомогою комп'ютеризованого рентгенівського дифрактометра ДРОН-3, інфрачервоної спектроскопії – ІК-Фур'є-спектрометра Bruker Alpha, скануючої електронної мікроскопії – СЕМ JEOL JSM-840. Електричні характеристики бетону і шпал визначали за оригінальними методиками за допомогою спеціально розроблених датчиків і установок та цифрового мультиметра DT9208A з вхідним опором 10 МОм.

Розділ 3 присвячено розвитку теоретичних уявлень про кінетику набору міцності цементного каменю і бетону, механізму формування їх первинної структури, способам підвищення ранньої міцності бетону без тепловологісної обробки. Як відомо, структура і міцність цементного каменю формуються за рахунок двох головних процесів твердіння цементу – гідратації з утворенням елементів структури (кристалогідратів і гелю) і структуроутворення, тобто виникнення контактів між елементами структури. Про швидкість протікання процесу гідратації зазвичай судять за зміною ступеня гідратації (рис. 1).

а)

б)

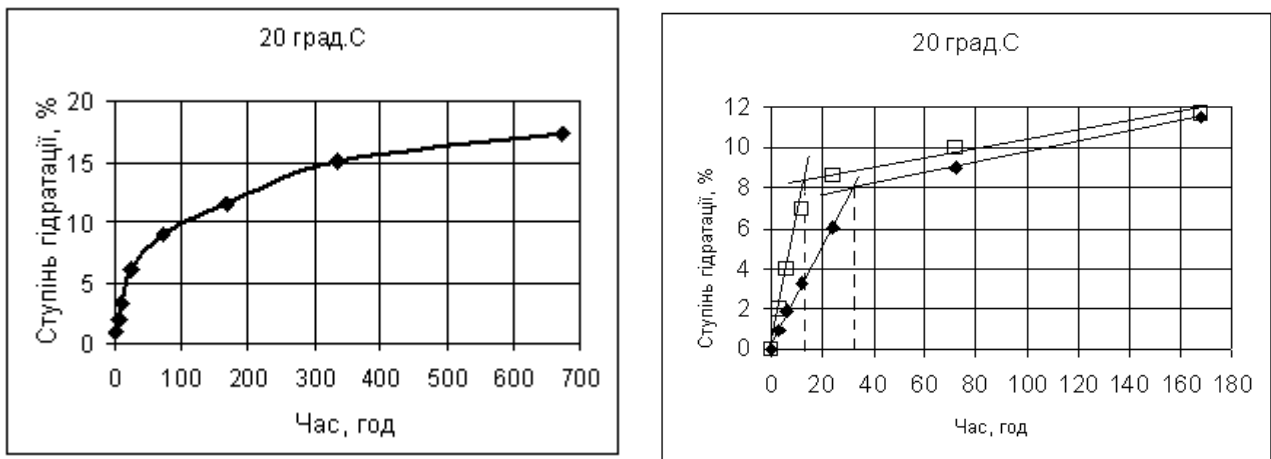


Рис.1. Залежність ступеня гідратації цементу від часу: *a* – відома залежність при 20°C; *б* – перетворена залежність з поділом на два періоди твердіння при 20 °С (♦) і 40 °С (□)

З рис.1, б видно, що при підвищенні температури твердіння від 20 до 40 °С утворення елементів структури значно прискорюється – перший період твердіння скорочується від 26 до 13 годин, тобто вдвічі. При цьому ступінь гідратації близько 8 % практично не змінюється. Це свідчить про те, що структура цементного каменю і товщина шару продуктів гідратації на частинках цементу на першому етапі твердіння незмінні, змінюється лише швидкість гідратації і формування первинної структури цементного каменю. Тривалість її формування становить близько 26 годин для температури твердіння 20 °С і близько 18 годин – для прийнятної температури твердіння 30 °С.

Розвинено уявлення про ранню міцність цементного каменю безпропарювального твердіння. Фізично вона обумовлена утворенням між позитивно зарядженими блоками кристалогідратів і гелевими частинками гідросилікатного гелю елементарних одиничних контактів – електрогетерогенних ЕГК або електрогомогенних з одним загальним шаром протиіонів. Первинні продукти гідратації – блоки кристалогідратів еtringіту і портландиту утворюються в прошарках між частинками цементу, а також між частинками цементу і зернами піску і щебеню. При цьому формується первинний просторовий каркас із ЕГК, утвореними одиничними контактами типу  $Ca^{2+}-H_2O-OH$ . Подальша гідратація цементу призводить до збільшення кількості продуктів гідратації, які ущільнюють і зміцнюють первинний просторовий каркас. Первинний каркас максимально міцний, коли прошарок між частинками цементу сформований у середньому двома шарами блоків портландиту з рівноважним розміром  $0,25 \text{ мкм} = 2,5 \times 10^{-7} \text{ м}$ . У свою чергу товщина прошарку між частинками гелю має бути рівною діаметру гідратованого катіона  $Ca^{2+} - d_{Ca^{2+}+2d_{H_2O}} = 7,6 \times 10^{-10} \text{ м}$ . Отже, для виготовлення залізобетонних шпал за безпропарювальною технологією необхідно забезпечити додаткове скорочення тривалості першого періоду гідратації і збільшення міцності первинної структури. Це можуть забезпечити оптимальне В/Ц і застосування добавок прискорювачів, які можуть чинити на твердіння цементного каменю і бетону не лише прискорюючий, але і структуроутворюючий вплив.



Добавки суперпластифікатори поділяються на групи: I – сульфований мелаїноформальдегід СМФ; II – продукти конденсації нафталінсульфоїкислоти і формальдегіду СНФ; III – модифіковані лігносульфонати МЛС; IV – полікарбоксилати ПКК та ін. Молекули (частинки) суперпластифікаторів є аніонними поліелектролітами і беруть участь у формуванні ранньої структури, утворюючи через активні групи  $SO_3^-$  з позитивно зарядженими кристалогідратами еtringіту і портландиту міцні ЕГК. Молекули СНФ (С-3) мають найбільш високу поверхневу концентрацію груп  $SO_3^-$  у порівнянні з МЛС (ЛСТ) і СМФ (Melment F10). Отже, для міцності первинного каркаса і одержання більш високої ранньої міцності кращою добавкою є СНФ С-3. Можливим також є застосування інших СНФ – Sikament-N, Marefluid IF, SikaPlast-520. Проте їх вартість при практично однаковому пластифікуючому ефекті, а також ПКК, у 2 і більше разів вище вартості С-3 (близько 12 грн/кг).

Найбільша величина позитивного потенціалу у  $C_3A$  обумовлює переважну адсорбцію на ньому часток С-3 і т.п. з активними групами  $SO_3^-$ . При оптимальній кількості С-3 ( $СП_{opt}$ ) відбувається адсорбція на всій поверхні  $C_3A$ . При збільшенні кількості добавки понад оптимальної відбувається її адсорбція на поверхнях, покритих  $C_3S$  з меншими позитивними потенціалами. При цьому гальмується, а при достатньо великій кількості добавки і зупиняється гідратація  $C_3S$ . Отже, для отримання бетону з максимальною швидкістю гідратації і міцністю первинного каркаса цементного каменю необхідно виключити адсорбцію суперпластифікатора на поверхнях  $C_3S$  шляхом обмеження її кількості до оптимальної (близько 0,2–0,3 % для С-3).

В рамках зазначених теоретичних передумов запропоновані також схеми максимально міцного первинного каркаса в бездобавочному і з добавкою суперпластифікатором цементному камені. При цьому передбачається, що в бездобавочному цементному камені первинний каркас формується за рахунок утворення міцних ЕГК між позитивно зарядженими ділянками  $C_3A$  і частинками еtringіту, що утворюється раніше за інших кристалогідратів (рис. 2, а). Добавка С-3, як зазначалося, адсорбується на поверхні  $C_3A$  і блокує її від прямого контакту з водою, в результаті чого розчинення  $C_3A$  і утворення еtringіту протягом досить тривалого часу не відбувається. Однак при оптимальній кількості добавки поверхня  $C_3S$  залишається відкритою, відбувається його гідратація з утворенням поверхневих кристалогідратів гексагонального портландиту, які утворюють ЕГК через негативно заряджені частинки гідросилікатного гелю (рис. 2, б).

а)

б)

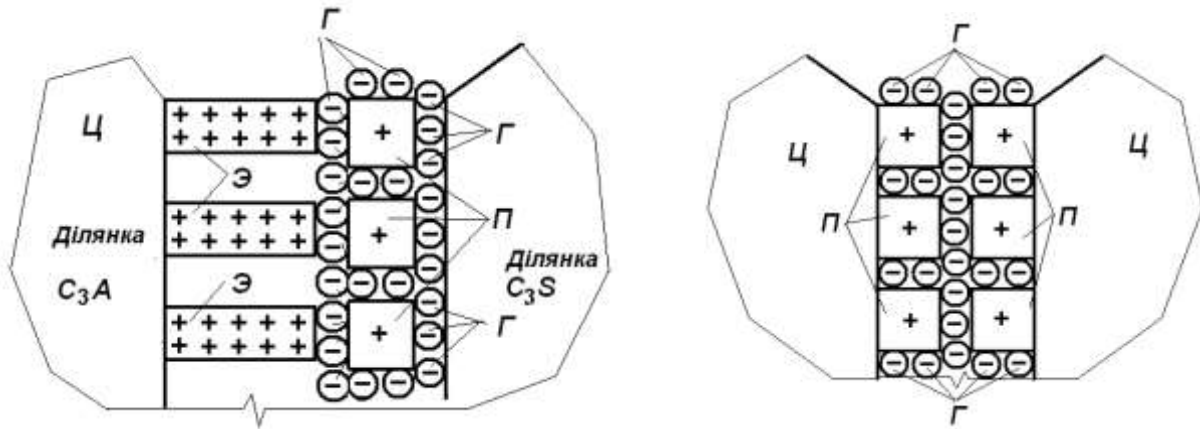


Рис. 2. Передбачуваний максимально міцний контакт між частинками цементу в первинному каркасі цементного каменю: а – без добавки суперпластифікатора, б – з добавкою суперпластифікаторів. Ц -- частинка цементу; Г – кулька гелю; Э – блок етрингіту; П – блок портландиту

Відповідно до цих схем виведено рівняння товщини шару продуктів гідратації цементу:

$$\delta_{\text{ПГ}} = \frac{\alpha R_{\text{Ц}}}{3\gamma_{\text{C}_3\text{S}} \text{Пус}_{\text{ПГ}}}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – ступінь гідратації цементу, 0,08;  $R_{\text{Ц}}$  – середній радіус частинки цементу, що визначає його питому поверхню  $s_{\text{Ц}} = 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ :

$$R_{\text{Ц}} = \frac{3}{s_{\text{Ц}} \rho_{\text{Ц}}} = 3,22 \text{ мкм}; \quad (2)$$

$\gamma_{\text{C}_3\text{S}}$  – частка  $\text{C}_3\text{S}$  у клінкері;  $\text{Пус}_{\text{ПГ}}$  – пористість шару продуктів гідратації;  $\rho_{\text{Ц}}$  – густина цементу,  $3100 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Для оцінки структуроутворюючої ролі С-3 визначили середній розмір її молекули, відповідний оптимальній кількості добавки СП = 0,002, і середньої частки в клінкері  $\text{C}_3\text{A}$   $\gamma_{\text{C}_3\text{A}} = 0,05$ :

$$\delta_{\text{СП}} = \frac{\text{СП}}{\rho_{\text{СП}} s_{\text{Ц}} \gamma_{\text{C}_3\text{A}}} = 95 \text{ нм}. \quad (3)$$

Ця величина відповідає максимальному розміру негативно зарядженої глобули гідросилікатного гелю, що забезпечує вбудовування частинки С-3 в первинний каркас цементного каменю без деформацій і порушень структури. Тобто суперпластифікатор С-3 виконує структуроутворюючу функцію, легко вбудовуючись у загальну структуру, яка формується з кристалогідратів і глобул гідросилікатного гелю.

У розділі 4 наведено результати експериментальних досліджень з перевірки розроблених уявлень про механізм формування первинного каркаса цементно-водної системи і розробленні особливошвидкотверднучого безпропарювального бетону. Для цього виконано експериментальні дослідження реологічних кривих залежностей умовної в'язкості  $t$  ЦВС без добавок і з добавками суперпластифікаторами від В/Ц у діапазоні від 0,23 до 0,5. На рис. 3 подано характерний графік залежності  $t$  від В/Ц для бездобавочного ЦВС.

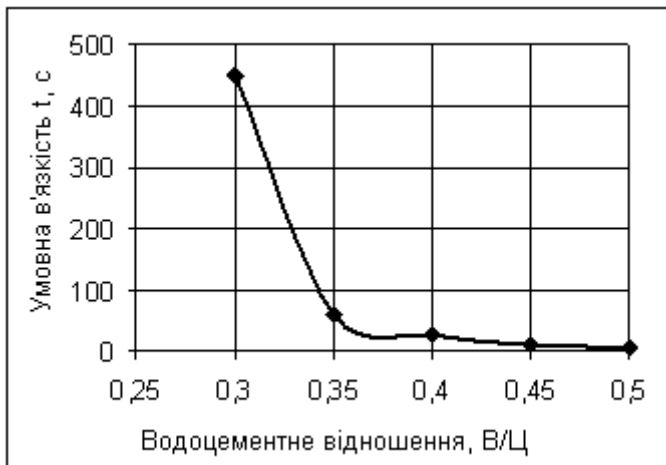


Рис. 3. Залежність умовної в'язкості  $t$  ЦВС від В/Ц

Просторову структуру при В/Ц < 0,3, утворену структурованою дисперсною системою з ЕГК між частинками цементу і моношаром первинних поверхневих блоків кристалогідратів і глобул гідросилікатного гелю, назвали первинним каркасом. При подальшому твердінні він обростає новими продуктами гідратації і ущільнюється, утворюючи щільний цементний камінь з високою міцністю. Виконано зіставлення запропонованої схеми первинного каркаса з відомими даними Р. Треттіна атомної силової мікроскопії. За цими даними відразу при контакті частинок цементу з водою вже через 15 с гідратації гладка поверхня на ділянках  $C_3S$  покривається глобулами дуже високоосновних гідросилікатів кальцію (реакційний шар) розміром у середньому 50 нм. У той же час на ділянках поверхні  $C_3A$  у зв'язку з його найбільшою активністю утворюються поверхневі блоки еtringіту, з'єднані через глобули високоосновного гідросилікатного гелю (ЕГК) з ділянками  $C_3A$  (рис. 2, а). При цьому утворюється ажурний просторовий каркас невисокої міцності, яка визначається площею ділянок поверхні  $C_3A$ , що складає в середньому 6 % від загальної поверхні частки цементу. На поверхні цього шару також швидко утворюються поверхневі блоки портландиту (бугорки зростання за Л.Г. Шпиноюю).

У ЦВС з добавкою С-3 поверхню  $C_3A$  блокують частинки добавки, еtringіт при цьому не утворюється, і при оптимальній кількості добавки, що витрачається тільки на адсорбцію на поверхні  $C_3A$ , гідратує поверхня  $C_3S$ . При цьому, у зв'язку з відсутністю зростання еtringіту, зростає концентрація  $Ca(OH)_2$  в розчині і на поверхні реакційного шару швидко виникають поверхневі блоки портландиту (бугорки зростання). Зростаючи назустріч від протилежних поверхонь частинок цементу, вони потім з'єднуються в ЕГК через глобули гелю по мірі їх виникнення (рис. 2, б). За даними Л.Г. Шпиноюї, первинні кристали портландиту, які утворюються з гексагональних пластинок (зародків), зростають на підкладці до критичного розміру, а потім перетворюються в конусоподібні кристалики розміром 200–300 нм. Оскільки частка ділянок  $C_3S$  на поверхні частки цементу складає близько 60 %, тобто в 6 разів більше, ніж  $C_3A$ , така структура цементного каменю утворює первинний каркас, що має максимальну міцність.

Виходячи з цих уявлень зіставили контакти, що формуються між частинками цементу в ЦВС без добавок і з С-3 з шаром води завтовшки  $\delta_B$  на поверхні частинок цементу і відповідним цій товщині В/Ц. Миттєву товщину

шару води на поверхні частинок цементу визначили розподілом обсягу води в ЦВС на площу поверхні частинок цементу або В/Ц на питому поверхню цементу:

$$\delta_{\text{В}} = \frac{\text{В/Ц}}{s_{\text{Ц}}} = 1_{\text{мкм}}, \quad (4)$$

де В/Ц = 0,3 відповідає точці переходу ЦВС з текучого в нетекучий стан (не витікає з віскозиметра ВЗ-1 під дією власної ваги).

Відповідно, прошарок води між частинками цементу складає  $\delta_{\text{ПР}} = 2$  мкм. Однак, як зазначалося, вже через лічені секунди ділянки  $\text{C}_3\text{S}$  на частинці цементу покриваються реакційним шаром з глобул дуже високоосновного гідросилікатного гелю розміром у середньому 0,05 мкм. Він збільшує результуючу поверхню цементу і цим зменшує товщину шару води на поверхні його часток. Для оцінки цієї товщини визначили питому поверхню глобул ( $4,44 \times 10^5 \text{ см}^2/\text{г}$ ), по радіусу частинки реакційного шару – її масу ( $5,28 \times 10^{-12} \text{ г}$ ), загальну площу поверхні, яка додається реакційним шаром, що утворюється ( $5400 \text{ см}^2/\text{г}$ ), і результуючу питому поверхню частинок цементу  $s_{\text{Ц}} = 8400 \text{ см}^2/\text{г}$ . З цієї величини товщина шару води на частинках цементу за формулою (4) складе  $\delta_{\text{В}} = 0,36$  мкм, а товщина прошарку води між ними  $\delta_{\text{ПР}} = 0,72$  мкм. Як бачимо, за рахунок утворення реакційного шару з високою питомою поверхнею на ділянках  $\text{C}_3\text{S}$  часток цементу товщина шару води на них і прошарку між ними зменшується більш ніж удвічі.

Розміри блоків еtringіту в цементному камені за Л.Г. Шпиновою на порядок менше, ніж у вільному розчині, і перебувають в межах 0,4–1 мкм, у середньому 0,7 мкм. З урахуванням цих розмірів і розмірів глобул реакційного шару 0,05 мкм, загальна товщина шару еtringіту і глобул гелю складає 0,75 мкм, що близько до товщини шару води при В/Ц = 0,3 (0,72 мкм). Відповідно до цього уточнена (рис. 4) раніше припущена (рис. 2, а) схема ЕГК між позитивно зарядженим блоком еtringіту і негативно зарядженими глобулами гелю, який забезпечує достатньо високу міцність (пластичну) первинного каркаса бездобавочної ЦВС та втрату нею текучих властивостей.

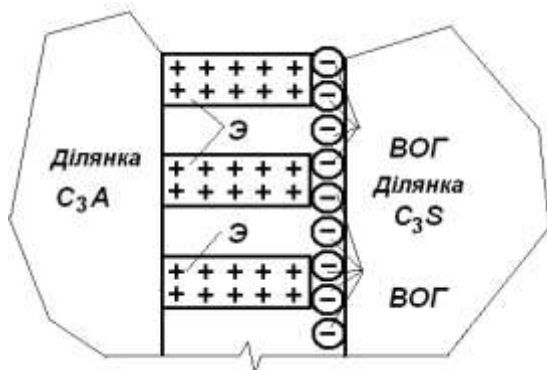


Рис. 4. ЕГК первинного каркаса між частинками цементу на ділянці  $\text{C}_3\text{A}$  в бездобавочній ЦВС. Е – частинка (блок) еtringіту

Для оцінки кінетичних особливостей текучості і вібророзтічності ЦВС розроблено уявлення про механізм її течії на підставі рівняння стаціонарного потоку витікання з віскозиметра ВЗ-1. Це рівняння визначається рівновагою рушійної сили – ваги ЦВС у резервуарі віскозиметра і сили, що перешкоджає течії. Рушійна сила, під дією якої ЦВС впливає з сопла віскозиметра радіусом  $R_{\text{КАП}}$ , дорівнює силі її тяжіння:

$$F_{\text{ДВ}} = \pi R_{\text{КАП}}^2 H \rho_{\text{Ц}} g . \quad (5)$$

Сила, що перешкоджає витіканню ЦВС, визначається тертям між шарами частинок:

$$F_{\text{ТР}} = 2\eta\pi R_{\text{КАП}} l_{\text{КАП}} \nu / \delta_{\text{КАП}} . \quad (6)$$

Рівність цих виразів визначає рівняння стаціонарного потоку:

$$\pi R_{\text{КАП}}^2 H \rho_{\text{Ц}} g = 2\eta\pi R_{\text{КАП}} l_{\text{КАП}} \nu / \delta_{\text{КАП}} . \quad (7)$$

Довжина шляху, який проходить ЦВС, витікаючи через капіляр:

$$L = V / \pi R_{\text{КАП}}^2 . \quad (8)$$

З цих рівнянь виведено рівняння для швидкості потоку

$$\nu = \frac{R_{\text{КАП}} H \rho_{\text{Ц}} g \delta_{\text{КАП}}}{2\eta l_{\text{КАП}}} \quad (9)$$

і часу витікання ЦВС з віскозиметра, тобто її умовна в'язкість:

$$t = L / \nu . \quad (10)$$

При  $V = 60 \text{ см}^3$  (об'єм витікаючої ЦВС),  $R_{\text{КАП}} = 0,02 \text{ см}$ ,  $V/\text{Ц} = 0,35$  (перехід ЦВС у рідкотекучий стан)  $t = 16,74 / 0,35 = 48 \text{ с}$ , що близько до експериментальної величини  $\approx 50 \text{ с}$  (рис. 3).

При  $V/\text{Ц} < 0,35$ , тобто для структурованої ще текучої ЦВС, виникають ЕГК за схемою рис. 2, а й притягуюча взаємодія між блоками еtringіту і глобулами високоосновного гідросилікатного гелю на ділянці  $S_{3A}$ , що призводить до збільшення в'язкості ЦВС на величину  $\eta_{\text{СТР}}$ . Пояснений кількісно механізм такого збільшення в'язкості ЦВС включенням у рівняння в'язкості виразу для питомої сили тяжіння

$$f_{\text{СТР}} = \frac{\Psi_{\text{ЭП.ЭТ}}^{\text{P}} \times q_{\text{ВОГ}}}{d_{\text{ЭТ-ВОГ}} - d_{0,35}} , \quad (11)$$

де  $\Psi_{\text{ЭП.ЭТ}}^{\text{P}}$  – рівноважний електроповерхневий потенціал еtringіту, В;  $q_{\text{ВОГ}}$  – густина поверхневого заряду глобул гелю, Кл/м<sup>2</sup>.

З урахуванням виразів для  $q_{\text{ВОГ}}$  (через рівноважний електроповерхневий потенціал гелю  $\Psi_{\text{ЭП.ЭТ}}^{\text{P}}$ ), а також вмісту  $S_{3A}$  в клінкері  $\gamma_{S_{3A}}$ , пустотності структури в шарі еtringіту  $\text{Пус}_{\text{ЭТ}}$  і в шарі дуже високоосновних гідросилікатів (в реакційному шарі)  $\text{Пус}_{\text{ВОГ}}$  виведено вираз для  $f_{\text{СТР}}$ :

$$f_{\text{СТР}} = \frac{\epsilon\epsilon_0 \Psi_{\text{ЭП.ЭТ}}^{\text{P}} \Psi_{\text{ЭП.ВОГ}}^{\text{P}}}{d_1 (d_{\text{ЭТ-ВОГ}} - d_{0,35})} \times \gamma_{S_{3A}} (1 - \text{Пус}_{\text{ЭТ}})(1 - \text{Пус}_{\text{ВОГ}}) , \quad (12)$$

де  $d_{\text{ЭТ-ВОГ}}$  – відстань між потенціал визначальними іонами  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{OH}^-$  в одиничному ЕГК;  $d_{0,35}$  – товщина шару вільної води (при  $V/\text{Ц} = 0,35$ ).

Після підстановки відповідних даних отримано рівняння для додаткової (структурної) сили гальмування потоку ЦВС з віскозиметра:

$$F_{\text{СТР}} = 0,00604 / (V/\text{Ц}) \text{ Н} . \quad (13)$$

Ця сила спрямована проти ваги ЦВС, у результаті чого рушійна сила структурованого потоку представлена рівнянням (7), а після підстановки відповідних значень:

$$F_{\text{ТР}} = \frac{0,018\nu}{V/\text{Ц}} , \text{ Н} . \quad (14)$$

Рушійна сила від власної ваги ЦВС за (5)  $F_{PC} = 0,021$  Н. Результуюче рівняння стаціонарного потоку:

$$0,021 - \frac{0,0604}{V/C} = \frac{0,018v}{V/C}, \quad (15)$$

з якого виводимо вираз для швидкості витікання ЦВС з віскозиметра,  $v$ :

$$v = \frac{\left(0,021 - \frac{0,00604}{V/C}\right) \cdot \frac{V}{C}}{0,018} = 1,17 \frac{V}{C} - 0,34. \quad (16)$$

За виразом (16) визначали значення для умовної в'язкості ЦВС, за якими був побудований графік залежності умовної в'язкості від  $V/C$  (рис. 5). Як видно з рис. 5, розрахункова крива близька до експериментальної. Її перехід у зону негативних значень при  $V/C < 0,3$  означає повну втрату текучості. При цьому швидкість витікання ЦВС стає рівною 0. При  $V/C = 0,3$  формується первинний каркас ЦВС без добавки суперпластифікатора.

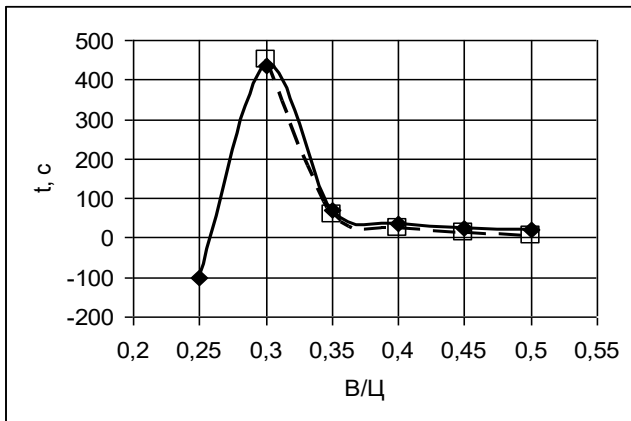


Рис. 5. Залежність умовної в'язкості ЦВС  $t$  від  $V/C$ :  
 - • - - розрахункова;  
 - □ - - експериментальна

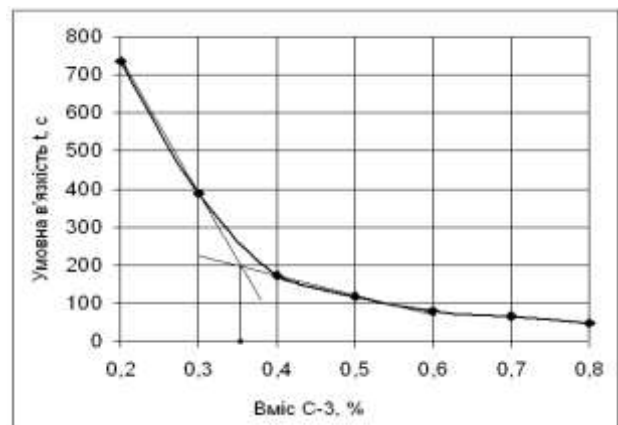


Рис. 6. Залежність умовної в'язкості  $t$  віброваної ЦВС від вмісту С-3, % від маси цементу при  $V/C = 0,23$

Для забезпечення безсадковості і доброї віброущільнюваності бетонної суміші з добавкою С-3 важливим завданням експериментальних досліджень є визначення  $V/C$ , при якому створюється первинний каркас, і оптимальної кількості С-3, при якій досягається необхідна вібророзтічність суміші. Експериментальна крива залежності умовної в'язкості ЦВС від вмісту С-3 наведена на рис. 6. При вимірюванні умовної в'язкості  $t$  ЦВС з  $V/C = 0,23$  при вібрації витікала рівномірно навіть без добавки. З рис. 6 видно, що при вмісті С-3 більше 0,6 % ЦВС є рідкотекучою, неструктурованою, придатною для литих бетонних сумішей. При  $V/C$  від 0,35 до 0,6 % суміш є структурованою, але ще текучою. При  $V/C = 0,35$  % суміш переходить з дисперсної системи зі зруйнованою структурою в структуровану нетекучу.

Грунтуючись на цих експериментальних даних, розглянемо, при якому  $V/C$  формується первинний каркас у ЦВС з С-3. У зв'язку з відсутністю в ЦВС з оптимальною кількістю С-3 протягом досить тривалого часу еtringіту, прошарок між частинками цементу буде формуватися за рахунок блоків портландиту і глобул гідросилікатного гелю з утворенням первинного каркаса з

міцними ЕГК між блоками портландиту і глобулами гелю між ними (рис. 2, б). Однак, з урахуванням реакційного шару, схема цього раніше передбачуваного максимально міцного контакту між частинками цементу буде мати вигляд, як на рис.7.

Товщина прошарку при цьому становить:

$$\delta_{\text{ПР}} = 2b_{\text{П}} + 2b_{\text{ВОГ}} + b_{\text{Г}} = 2 \times 0,27 + 2 \times 0,05 + 0,1 = 0,74 \text{ мкм}, \quad (17)$$

а товщина портландитового і гелевого шару на поверхні частинок цементу

$$\delta_{\text{ПР}}/2 = 0,37 \text{ мкм}.$$

З виразу (4) при  $s_{\text{Ц}}^1 = 8440 \text{ см}^2/\text{г}$  (у зв'язку з утворенням реакційного шару дуже високоосновного гелю) цій товщині відповідає В/Ц:

$$V/\text{Ц} = \delta_{\text{ПР}} s_{\text{Ц}}^1 = 0,37 \times 10^{-4} \times 8400 = 0,31 \text{ см}^3/\text{г}. \quad (18)$$

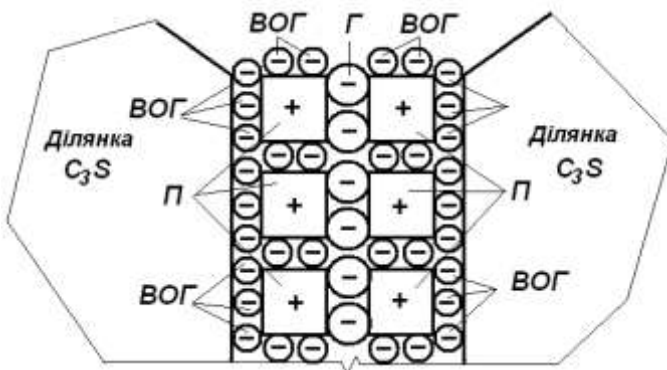


Рис. 7. Максимально міцний контакт між частинками цементу: Ц — частинка цементу; П — блок портландиту; Г — глобули гідросилікатного гелю; ВОГ — глобули гелю високоосновних гідросилікатів кальцію.

З урахуванням цих розмірів і розмірів глобул реакційного шару 0,05 мкм загальна товщина прошарку становить 0,75 мкм, що близько до товщини шару води 0,72 мкм при В/Ц = 0,3. Слід враховувати, що вода, яка витрачається на змочування щебеню, в основному вбирається в його мікротріщини і не бере участі у формуванні первинного каркаса ЦВС. Отже, для формування первинного каркаса в ЦВС при приготуванні бетонної суміші необхідно збільшити В/Ц на величину, рівну при витраті щебеню 1250 кг/м<sup>3</sup>, його середньому водопоглинанні 1 %, витраті цементу 550 кг/м<sup>3</sup>:

$$\Delta \frac{V}{\text{Ц}} = \frac{\text{Ц}W^{\text{Щ}}}{\text{Ц}} = \frac{1250 \times 0,01}{550} = 0,02. \quad (19)$$

Результуюче (В/Ц)<sub>ОПТ</sub> для бетонної суміші, що забезпечує отримання первинного каркаса з міцними ЕГК, складає 0,31+0,02 = 0,33. При такому В/Ц ЦВС з добавкою С-3 поводить себе як текуча рідкоподібна, легко віброущільнювальна. Зазначене В/Ц забезпечує утворення первинного каркаса при перемішуванні бетонних сумішей, однак саме формування міцного каркаса з ЕГК відбувається при твердінні бетону, коли виникнуть у достатній кількості глобули гідросилікатного гелю. У зв'язку з цим, при перемішуванні бетонної суміші між однаково зарядженими блоками портландиту виникає відштовхування, що не знижує ефективності розріджувальної дії добавки С-3.

Виконані експериментальні дослідження впливу на міцність цементного каменю добавок прискорювачів ХК, ХН, СН, НН, вміст яких варіювали від 0 до 4–5 % від маси цементу з кроком 1 %. Зразки тверднули при температурі 20°C і відносній вологості повітря близько 100 % протягом 1 доби. За результатами досліджень максимальну міцність забезпечила добавка ХК, яка і обрана для

подальших досліджень. Визначення оптимального вмісту ХК у ЦВС, що містить добавку С-3, виконали за експериментальною залежністю міцності при згині зразків-балочок з цементного каменю з В/Ц = 0,23 від вмісту ХК (рис. 8). Згідно цієї залежності міцність цементного каменю з добавкою С-3 значно (на 20 %) збільшується при введенні в суміш ХК у кількості 1 % від витрати цементу, при подальшому збільшенні вмісту ХК міцність збільшується незначно. Така залежність є специфічною, що виявляється лише в ЦВС з оптимальною кількістю С-3 при формуванні первинного каркаса. Дане пояснення такої залежності, виходячи зі зростання концентрації катіонів  $Ca^{2+}$  в розчині, впливу ХК на рівноважний електроповерхневий потенціал  $\psi_{EP}^P$  блоків кристалогідратів і глобул гідросилікатного гелю і міцність ЕГК між ними. У зв'язку з викладеним, а також тим, що введення електролітів може знизити електричний опір бетону, прийнято оптимальний вміст ХК 1 % від витрати цементу.

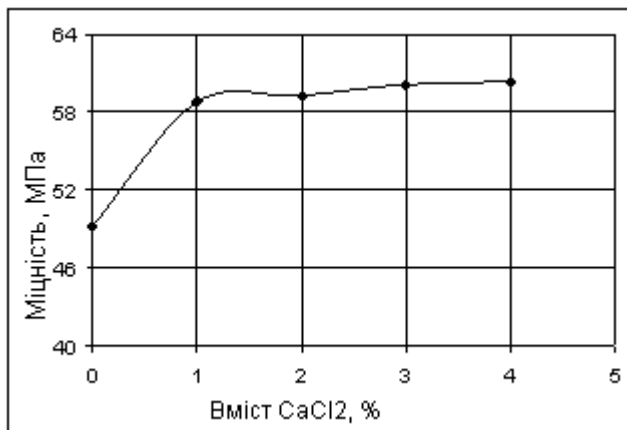


Рис. 8. Залежність міцності цементного каменю при згині від вмісту добавки прискорювача твердіння ХК, % від маси цементу

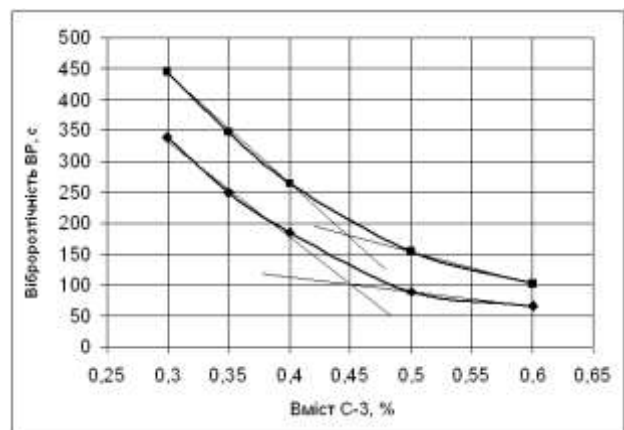


Рис. 9. Залежність вібророзтічності (нижня крива) і тривалості вібрування бетонної суміші (верхня крива) від вмісту С-3, % від маси цементу

В бетонній суміші до ЕГК у первинному каркасі цементного каменю додаються ЕГК між частинками цементу і зернами заповнювачів, що зменшують рухливість бетонної суміші. Для перевірки цього припущення виконані експериментальні дослідження залежності реологічних властивостей бетонної суміші з оптимальними для використовуваних заповнювачів коефіцієнтами розсунення  $\alpha_{OPT}=1,1$  і  $\omega_{OPT}=2,7$  від вмісту С-3 в межах 0,3–0,6 % від витрати цементу (рис. 10). Порівняння реологічних кривих для бетонної суміші (рис. 10) і ЦВС (рис. 6) показує, що вони мають однаковий характер з досить чітким переломом, а реологічні властивості бетонної суміші визначаються, головним чином, реологічними властивостями цементного тіста в ній. Отже, перелом на кривій для бетонної суміші характеризує перехід цементного тіста від дисперсної системи зі зруйнованою структурою в структуровану нетекучу і формування первинного каркаса майбутнього цементного каменю з міцними ЕГК за схемою рис. 4. Однак В/Ц, при якому здійснюється такий перехід, для бетонної суміші (В/Ц = 0,45) істотно вище, ніж у ЦВС (В/Ц = 0,35, рис. 6). Це обумовлено тим, що в бетонній суміші з С-3 на поверхні заповнювачів, особливо кварцового піску, майже миттєво виникають поверхневі гексагональні блоки портландиту. У зв'язку з цим при



перемішуванні виникає притягання між миттєво виникаючими блоками (бугорками зростання за Л.Г. Шпиноюю) і глобулами дуже високоосновних гідросилікатів кальцію частинок цементу, що контактують з заповнювачем (рис. 10, а). Відповідно, збільшується в'язкість бетонної суміші. Ці ЕГК зникають при збільшенні вмісту С-3 понад оптимального для ЦВС від 0,35 до 0,45 %, які адсорбуються на поверхневих блоках портландиту (рис. 10, б), після чого бетонна суміш проявляє такий же характер зміни реологічних властивостей, і в цементному камені формується первинний каркас з міцними ЕГК.

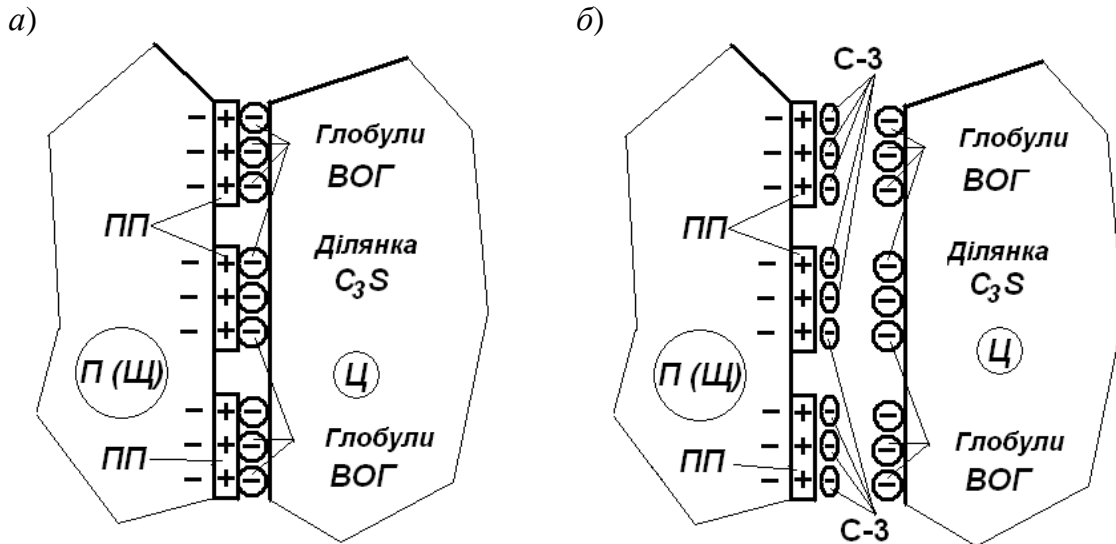


Рис.10. Додаткові ЕГК між поверхневими блоками портландиту *ПП* на поверхні зерен піску *П* (щебеню *Щ*) і глобулами ОВГ на поверхні частинок цементу: *а* – бетон без добавки; *б* – бетон з С-3

У зв'язку з викладеним, в остаточному складі бетону прийняли оптимальний вміст С-3 – 0,45 %, ХК – 1 %. Для цього складу досліджували кінетику набору міцності протягом 24 годин твердіння при температурі 30 °С (рис. 11). З рис. 11 видно, що міцність бетону через 12 годин склала 32 МПа, що відповідає необхідній передатній міцності бетону залізобетонних шпал, а через 16 годин збільшилася до 38 МПа. Це дозволяє забезпечувати передаточну міцність за рахунок простих технологічних прийомів, наприклад, більш тривалої витримки в камері або пізнішого обрізання арматури.



Рис. 11. Залежність міцності на стиск особливошвидкотверднучого бетону від тривалості безпропарювального твердіння

Розроблений склад бетону з оптимальними значеннями коефіцієнтів розсунення зерен заповнювачів  $\alpha_{\text{опт}}$  і  $\mu_{\text{опт}}$ , водоцементним відношенням  $(\text{В/Ц})_{\text{опт}} = 0,32$ , добавками С-3 – 0,45 % і ХК – 1 %, що забезпечує отримання необхідної передатної міцності через 12–16 годин при температурі до 30 °С без пропарювання, названий «особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон». Бетон такого складу досліджували на відповідність експлуатаційним показникам, зокрема зчепленню з арматурою, електроопору, порівнюючи їх з показниками заводського складу бетону. Величина зчеплення бетону розробленого складу з арматурою перевищили таку для заводського складу на 9,5 %. Добавка С-3 збільшила на 32 % електроопір залізобетонної шпали між металевою підкладкою і подошвою шпали. Добавка ХК зменшила його незначно – на 17 %. Отже, добавка С-3 у поєднанні з 1 % ХК може використовуватися на ділянках залізничної колії з автоблокуванням.

Фізико-хімічні дослідження цементного каменю з добавками 0,35 % від маси цементу С-3 і 1 % ХК, зокрема рентгенофазовий аналіз та аналіз інфрачервоних спектрів поглинання, підтвердили правильність розроблених положень механізму дії добавок С-3 і ХК на формування первинного каркаса цементного каменю за 12 годин твердіння при температурі до 30 °С.

Скануюча електронна мікроскопія відколів цементного каменю при збільшенні  $\times 2000$ – $3000$  показала, що структура цементного каменю з добавкою С-3+ ХК більш щільна, ніж структура бездобавочного цементного каменю, і складається з більш дрібних частинок. Електронно-мікроскопічне дослідження мікро- і субмікроструктури цементного каменю бездобавочного (рис.12, а) і з добавкою С-3+ХК (рис. 12, б-г) підтвердило розроблені уявлення про формування первинного каркаса в цементному камені з  $\text{В/Ц} = 0,32$  і добавкою С-3+ХК (0,35+ 1% від витрати цементу, відповідно) до раннього терміну твердіння 12–16 год.

**Розділ 5** присвячений виробничій перевірці і впровадженню результатів досліджень. Виконана перевірка розробленого особливошвидкотверднучого безпропарювального бетону і технології виготовлення залізобетонних шпал без тепловологісної обробки в умовах, максимально наближених до заводських. Відпрацьовано технологічні параметри приготування бетонної суміші для виготовлення шпал. При приготуванні бетонної суміші рекомендовано використовувати охолоджений розчин ХК і вводити добавки в порядку: розчин С-3, через 1 хвилину – розчин ХК. Розроблено методику розрахунку складу бетону. Виконана перевірка показала придатність розробленого особливошвидкотверднучого безпропарювального бетону для виготовлення залізобетонних шпал.

Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон впроваджений при виготовленні дослідно-промислової партії залізобетонних шпал на підприємстві ТД «Україна Промресурс» (Кременчуцький ЗЗБШ). Результати досліджень у вигляді складів особливошвидкотверднучого бетону і ЦВС впроваджені також при розробленні проектів та капітальному ремонті водопропускних труб на 111 км ділянки Харків – Куп'янськ, 365 км ділянки Основа – Букіне, 19 км ділянки Харків – Люботин Південної залізниці, стояків залізобетонного шляхопроводу № 26 на перегоні Сартана – Північна ВАТ «МК»Азовсталь»; при розробленні проектів: перевлаштування залізобетонного мосту в трубу на 6 км ділянки

Гребениківка – Низи, підсилення існуючих конструкцій автодорожнього шляхопроводу на ст. Лозова Південної залізниці; при розробці проектних рішень капітального ремонту будівель вокзалу і поста ЕЦ ст. Кислівка, поста ЕЦ ст. Кагамлицька, службово-технічної будівлі ст. Череднички Південної залізниці.

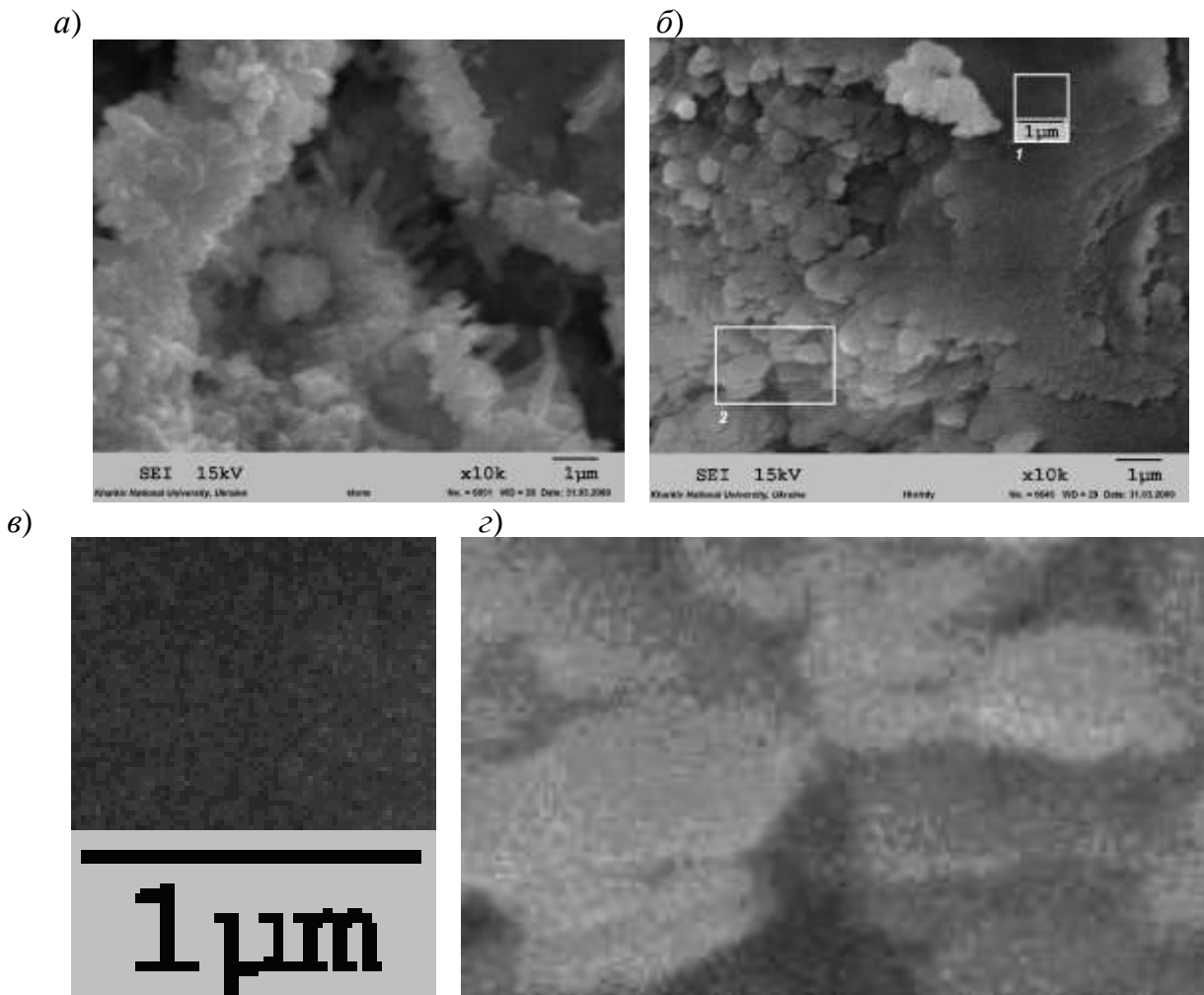


Рис. 12. Електронно-мікроскопічні знімки відколу цементного каменю: *a* – без добавок; *b* – з добавкою С-3 + ХК,  $\times 10000$ ; *в*, *г* – збільшені фрагменти 1 (*в*) і 2 (*г*) знімка рис. 12, *b*

При особистій участі здобувача розроблено інструктивні документи Укрзалізниці: ЦП 0224 «Рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит безбаластного мостового полотна»; «Рекомендації для застосування пластифікаторів та прискорювачів твердіння при виготовленні залізобетонних шпал і плит безбаластного мостового полотна»; «Рекомендації із захисту від корозії елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях»; «Рекомендації із захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів, на яких закріплена контактна мережа»; «Рекомендації із захисту та підсилення конструкцій пасажирських платформ на електрифікованих ділянках залізниць».

Матеріали дисертації використовуються в УкрДАЗТ у навчальному процесі в лекційних курсах, на лабораторних і практичних заняттях, у курсовому і дипломному проектуванні.

Економічний ефект від впровадження результатів досліджень здобувача склав 1206,402 тис. грн. Соціальний ефект від впровадження полягає в підвищенні безпеки руху поїздів на ділянках з відремонтованими спорудами.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Як залізобетонні підрейкові основи на залізницях України використовуються шпали, плити безбаластного мостового полотна, мостові шпали, бруси стрілочних переводів, що виготовляються з тепловологісною обробкою парою, вироблюваною газовими котельними. Складова газу в собівартості залізобетонних шпал в останніми роками збільшується, що визначило актуальність теми і мету роботи. Найважливішими вимогами до шпал є забезпечення необхідних передатної міцності бетону 32 МПа, тріщиностійкості шпал і електричного опору бетону і шпал.

2. На основі критичного аналізу літературних даних сформульована наукова гіпотеза: скорочення режиму тепловологісної обробки або повна відмова від неї при виробництві залізобетонних шпал можуть бути забезпечені за рахунок застосування бетону оптимального складу з оптимальними значеннями коефіцієнтів розсунення зерен крупного та дрібного заповнювача  $\alpha_{\text{опт}}$  і  $\mu_{\text{опт}}$  і водоцементного відношення  $(В/Ц)_{\text{опт}}$ , а також введення оптимальної кількості комплексної добавки суперпластифікатора та прискорювача твердіння.

3. Розвинуто теоретичні уявлення про кінетику твердіння цементу і бетону і про первинний каркас цементного каменю на ранніх стадіях твердіння при невисоких температурах. Показано, що тривалість формування первинної структури (1-го періоду твердіння) становить при температурі твердіння 20 °С близько 26 годин, при 30 °С – близько 18 годин.

4. Удосконалено механізм вибіркової адсорбції добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння на поверхні часток цементу. Відповідно до цього механізму відразу при контакті з водою різко збільшується рН рідкої фази цементного тіста і бетону, в результаті чого рівноважний електроповерхневий потенціал  $C_3S$  стає негативним (при  $pH=10$ ), а потенціал  $C_3A$  залишається позитивним і найбільшим за величиною. Не маючи доступу до позитивно зарядженої поверхні  $C_3A$ , двовалентний катіон  $Ca^{2+}$  у складі добавки-електроліту, добудовуючи решітку  $C_3S$ , ще більше збільшує його позитивний потенціал і швидкість розчинення.

5. Показано, що добавка С-3 виконує не тільки суперпластифікуючу і водоредукуючу функції, але й структуроутворюючу, легко вбудовуючись у загальну структуру продуктів гідратації, а хлорид кальцію не тільки прискорюючу, а також структуроутворюючу функцію, зміцнюючи електрогетерогенні контакти ЕГК.

6. Експериментальними дослідженнями реологічних властивостей цементно-водної системи ЦВС підтверджено, що первинний каркас бездобавочної ЦВС, а також з добавкою С-3, формується вже на стадії закінчення перемішування суміші. При цьому первинний каркас бездобавочної ЦВС формується за рахунок міцних ЕГК між первинними блоками еtringіту на поверхні  $C_3A$  і глобулами реакційного шару на поверхні  $C_3S$ . Він має незначну міцність через малий вміст  $C_3A$  на поверхні цементу. Первинний каркас ЦВС з С-3 формується за рахунок блоків первинного портландиту на поверхні  $C_3S$  і завершується при накопиченні між ними в достатній кількості глобул гідросилікатного гелю, що утворюють з блоками міцні ЕГК. Значно більша

міцність первинного каркаса ЦВС з С-3 обумовлена великим вмістом  $C_3S$  на поверхні частинок цементу.

7. В результаті фізико-хімічних досліджень фазового складу бездобавочного цементного каменю і з добавками С-3 і хлориду кальцію незалежними методами рентгенофазового аналізу, інфрачервоної спектроскопії, скануючої електронної мікроскопії підтверджено правильність розробленого механізму дії добавок С-3 і хлориду кальцію на формування первинного каркаса цементного каменю за 12–16 годин твердіння при температурі до 30 °С.

8. Розроблено оптимальний склад бетону з оптимальними коефіцієнтами розсунення зерен щебеню  $\alpha_{\text{опт}}$ , піску  $\mu_{\text{опт}}$ , водоцементним відношенням  $(В/Ц)_{\text{опт}} \approx 0,32$ , вмістом С-3 0,45 % і хлориду кальцію 1 %, що забезпечує отримання необхідної передатної міцності бетону через 12–16 годин твердіння при температурі до 30 °С без пропарювання, який було названо «особливошвидкотверднучим безпропарювальним бетоном».

9. Успішно виконана перевірка розроблених особливошвидкотверднучого безпропарювального бетону і технології виготовлення залізобетонних шпал без тепловологісної обробки в умовах, максимально наближених до заводських. Результати досліджень впроваджено при виготовленні дослідно-промислової партії залізобетонних шпал на підприємстві ТД «Україна Промресурс», а також при розробленні проектів капітального ремонту і ремонті споруд і будівель Південної залізниці: двох водопропускних труб, стояків залізобетонного шляхопроводу, чотирьох будівель. При особистій участі автора розроблено 5 інструктивних та рекомендаційних документів Укрзалізниці. Матеріали дисертації використовуються в УкрДАЗТ у навчальному процесі в лекційних курсах, на лабораторних і практичних заняттях, у курсовому і дипломному проектуванні. Економічний ефект від впровадження результатів досліджень здобувача склав 1206,402 тис. грн. Соціальний ефект від впровадження полягає в підвищенні безпеки руху поїздів на ділянках з відремонтованими спорудами.

#### **Основні результати досліджень опубліковані в таких роботах:**

1. Плугин А.Н. Механизм электрокоррозии бетонных конструкций пульсирующим однонаправленным блуждающим током или током утечки / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, С.В. Мирошниченко, О.С. Борзяк, А.В. Романенко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2007. – Вип.42. – С.106–111.

*Особистий внесок:* виконаний аналіз ролі добавок прискорювачів в електрокорозії залізобетонних конструкцій.

2. Плугін А.А. Дослідження можливості виробництва залізобетонних шпал за безпропарювальною технологією / А.А. Плугін, А.М. Плугін, О.В. Романенко, В.О. Яковлев, О.С. Борзяк, О.А. Плугін, О.А. Дудін // Удосконалення конструкції залізничної колії та системи ведення колійного господарства: Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип.91. – С.211–224.

*Особистий внесок:* виконаний критичний аналіз даних про особливості технології виготовлення залізобетонних шпал і плит безбаластного мостового полотна, способів прискорення твердіння бетону.

3. Романенко О.В. Розробка комплексної добавки для виробництва залізобетонних шпал без тепловологісної обробки / О.В. Романенко, Д.П. Войтко, О.Б. Ружицький, С.О. Пилипенко // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2008. – Вип.103. – С.235–243.

*Особистий внесок:* запланований експеримент і виконаний аналіз його результатів.

4. Плугін А.А. Обґрунтування скорочення енерговитрат при тепловологісній обробці залізобетонних шпал / А.А. Плугін, О.В. Романенко, В.О. Яковлев // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип.109. – С.38–56.

*Особистий внесок:* виконано експериментальні дослідження та аналіз їх результатів.

5. Плугин А.А. Бетоны и растворы для восстановления эксплуатационных свойств транспортных сооружений / А.А. Плугин, А.Н. Плугин, О.А. Калинин, А.В. Романенко, А.А. Забияка // Будівельні конструкції: Міжвідомчий наук.-техн. збірник наук. праць. – К.: ДП НДІБК, 2009. – Вип.72. – С.357–370.

*Особистий внесок:* визначений склад особливошвидкотверднучого бетону і розчину для влаштування залізобетонних сорочок і металоін'єкційних обойм.

6. Романенко О.В. Уточнення оптимальної витрати добавки суперпластифікатора при виробництві залізобетонних шпал без тепловологісної обробки / О.В. Романенко, А.А. Плугін, В.О. Яковлев // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. - Вип.115. - С.97-103.

*Особистий внесок:* виконано уточнюючі експериментальні дослідження та аналіз їх результатів.

7. Романенко О.В. Фізико-хімічні дослідження цементного каменю з добавками суперпластифікатора та прискорювача твердіння / О.В. Романенко // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. - Харків: УкрДАЗТ, 2012. - Вип.130. – С.40–49.

8. Романенко А.В. 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 // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – Харьков: ЕЕJET, 2012. – №5/10(59). – С.28–32.

*Особистий внесок:* розроблено схеми контактів у первинній структурі цементного каменю з добавками

9. Пат.99426 UA МПК (2012.01) G01N 33/38 (206.01) C04B 28/00 Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон / УкрДАЗТ; Плугін А.А., Плугін А.М., Романенко О.В., Плугін О.А., Калінін О.А., Плугін Д.А., Мірошніченко С.В. – Заявл.14.12.2011. – Заявка № а 2011 14838. – Опубл.10.08.2002. – Бюл.№15.

*Особистий внесок:* виконано експериментальні дослідження, за результатами яких уточнені розрахункові формули для визначення складу бетону.

## АНОТАЦІЯ

Романенко О.В. Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон для виготовлення залізобетонних шпал без тепловологісної обробки.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироб. – Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2012.

Дисертацію присвячено теоретичному обґрунтуванню та розробленню особливошвидкотверднучого бетону з добавками суперпластифікатором і

прискорювачем твердіння для виготовлення залізобетонних шпал, плит безбаластного мостового полотна та інших виробів без тепловологісної обробки. В роботі висунута і шляхом теоретичних та експериментальних досліджень доведена гіпотеза про отримання особливошвидкотверднучого бетону для виготовлення залізобетонних шпал без тепловологісної обробки шляхом поєднання оптимального складу бетону із застосуванням суперпластифікуючої і прискорюючої добавок в оптимальних кількостях.

Розвинуто теоретичні уявлення про кінетику твердіння цементу і бетону і про первинний каркас цементного каменю на ранніх стадіях твердіння при невисоких температурах. Удосконалено механізм вибіркової адсорбції добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння на поверхні часток цементу.

На основі виконаних досліджень розроблено і впроваджено оптимальний склад бетону, який було названо «особливошвидкотверднучим безпропарювальним бетоном». Результати досліджень пройшли виробничо-експлуатаційну перевірку, впроваджені при виробництві дослідної партії залізобетонних шпал, в ряді інструктивних та рекомендаційних документів Укрзалізниці.

**Ключові слова:** залізобетонна шпала, склад бетону, суперпластифікатор, прискорювач твердіння, природне твердіння, продукти гідратації, передатна міцність, тріщиностійкість.

## АННОТАЦИЯ

Романенко А.В. Особобыстротвердеющий беспропарочный бетон для изготовления железобетонных шпал без тепловлажностной обработки.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 Строительные материалы и изделия. – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2012.

Диссертация посвящена теоретическому обоснованию и разработке особобыстротвердеющего бетона с добавками суперпластификатором и ускорителем твердения для изготовления железобетонных шпал, плит безбалластного мостового полотна и других изделий без тепловлажностной обработки. В работе выдвинута и путем теоретических и экспериментальных исследований доказана гипотеза о получении особобыстротвердеющего бетона для изготовления железобетонных шпал без тепловлажностной обработки путем сочетания оптимального состава бетона с применением суперпластифицирующей и ускоряющей добавок в оптимальных количествах.

Развиты теоретические представления о кинетике твердения цемента и бетона и о первичном каркасе цементного камня на ранних стадиях твердения при невысоких температурах. Усовершенствован механизм избирательной адсорбции добавок суперпластификаторов и ускорителей твердения на поверхности частиц цемента. Доказано, что добавка сульфонафталинформальдегид С-3 выполняет не только суперпластифицирующую и водоредуцирующую функции, но и структурообразующую, легко встраиваясь в общую структуру продуктов

гидратации, а хлорид кальция не только ускоряющую, а также структурообразующую функцию, упрочняя электрогетерогенные контакты ЭГК.

На основе выполненных исследований разработан и внедрен оптимальный состав бетона, названный «особобыстротвердеющим беспропарочным бетоном», с оптимальными коэффициентами раздвижки зерен щебня  $\alpha_{\text{опт}}$ , песка  $\mu_{\text{опт}}$ , водоцементного отношения  $(В/Ц)_{\text{опт}} \approx 0,32$ , содержанием С-3 0,45 % и хлорида кальция 1 %, обеспечивающий получение требуемой передаточной прочности бетона через 12–16 ч твердения при температуре до 30 °С без пропаривания, а также требуемые трещиностойкость и электрическое сопротивление железобетонных шпал. Результаты исследований прошли производственно-эксплуатационную проверку, внедрены при производстве опытной партии железобетонных шпал, в ряде инструктивных и рекомендательных документов Укрзалізниці.

**Ключевые слова:** железобетонная шпала, состав бетона, суперпластификатор, ускоритель твердения, естественное твердение, продукты гидратации, передаточная прочность, трещиностойкость.

### ABSTRACT

Romanenko O. Very fast hardening without steaming concrete for manufacturing concrete sleepers without heat and humidity treatment.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.05 Building materials and products. – Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkov, 2012.

On the basis of the fundamental positions of colloid chemistry and physical and chemical mechanics of disperse systems the theoretical substantiation of increase of early strength of concrete using the optimal composition with addition of superplasticizer and complex accelerator of hardening was done. The analysis of influence of the complex additive to a primary structure of the cement stone and nature of the contacts between products of cement hydration was done. That was also found out that superplasticizer selectively adsorbed on the surfaces of C3A of cement particles, provides water-reducing effect, on the initial stage of hardening prevents the formation of ettringite and increases the number of contacts between electroheterogeneous contacts between crystallohydrates of portlandite and hydrosilicate gel. In a result of the research it was developed concrete composition that provides the producing of concrete sleepers without steaming with obtaining transfer strength of 32 MPa in 12–16 hours of hardening in natural conditions.

**Keywords:** concrete, cement stone, the early strength, superplasticizer, structure



# А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

## ОСОБЛИВОШВИДКОТВЕРДНУЧИЙ БЕЗПРОПАРЮВАЛЬНИЙ БЕТОН ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ БЕЗ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ

Романенко Олександр Валерійович

Відповідальний за випуск

Партала Н.М.

---

Підписано до друку \_\_\_\_\_ 2012 р.

Формат аркуша 60x84 1/16. Папір для копіювальних апаратів.

Друк офсетний. Умовн. - друк. арк. 0,9. Обл. - вид арк. 1,0.

Замовлення № \_\_\_\_ . тираж 100. Безкоштовно

---

Видавництво УкрДАЗТ, свідоцтво ДК № 2874 від 12.06.12.

Друкарня УкрДАЗТ:61050, Харків - 50, пл. Фейсрбаха 7