

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

Сова Надія Олександрівна



УДК 691.32

МОДИФІКОВАНІ КОРОЗІЙНОСТІЙКІ БЕТОНИ
ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ШПАЛ

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Троян Вячеслав Васильович,
Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Костюк Тетяна Олександрівна,
Харківський національний університет будівництва та архітектури, завідувач кафедри будівельних матеріалів і виробів

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Гузій Сергій Григорович,
заступник директора з наукової роботи та інноваційного розвитку ТОВ «Геофіп», м. Кропивницький

Захист відбудеться 03 липня 2020 р. о 10⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.05 Київського національного університету будівництва і архітектури, 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, ауд. 319.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури, 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31 та на сайті університету за адресою www.knuba.edu.ua.

Автореферат розісланий 03 червня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.П. Бондаренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Передчасне руйнування залізобетонних шпал, частина з яких не відпрацьовує і 5% експлуатаційного ресурсу, призводить до значних державних витрат та потребує вирішення комплексної задачі покращення макро- та мікроструктури бетону шпал з метою забезпечення їх проектною довговічністю. Аналіз дефектів свідчить, що більше половини з них виникає через недостатні фізико-механічні характеристики бетону, які зумовлюються його макро- та мікроструктурою. Макроструктурна недосконалість насамперед зумовлена невідповідністю нормативним вимогам геометрії та розмірів крупного заповнювача. Мікроструктурна недосконалість пов'язана із застосуванням неякісних заповнювачів забруднених включеннями глинозему, слюди, та мінералів, що містять активний кремнезем разом з підвищеною кількістю сполук лужних металів в складі цементу. Однією з ймовірних причин передчасного руйнування бетону шпал є мікротріщини, що утворюються після термовологої обробки внаслідок утворення пізнього етtringіту. До утворення мікротріщин також може призводити лужна корозія, після чого в них може кристалізуватися пізній етtringіт, що сприяє їх подальшому розкриттю. Бетон шпал характеризуються підвищеною кількістю пор, та наявністю пустот внаслідок неякісного віброуцільнення при перевищенні жорсткості бетонної суміші, що призводить до прискорення зовнішньої корозії бетону.

Вирішення проблеми передчасного руйнування залізобетонних шпал передбачається за рахунок удосконалення технології виробництва (забезпечення стійкості до внутрішньої корозії та електрокорозії від струмів витоку, удосконалення режимів тепловологої обробки) з оптимізацією макро- та мікроструктурних характеристик бетону, перш за все шляхом пластифікації бетонної суміш. Між тим, існуючими нормативними документами не передбачалося використання хімічних добавок в бетоні.

Введення в дію ДСТУ Б В.2.6-209:2016, що розроблявся на підставі досліджень, виконаних за участю автора, дозволяє використання добавок модифікаторів і відкриває нові можливості контролювати внутрішні корозійні процеси в бетоні. Введення добавок модифікаторів дозволяє покращувати реологічні характеристики бетонної суміші з метою підвищення досконалості мікроструктури бетону, зменшувати температуру тепловологої обробки та витрату цементу, що дозволяє зменшити потенційну кількість небезпечних новоутворень в поровому просторі бетону тим самим зменшуючи його можливе розширення та тріщиноутворення. При цьому відповідно до ДСТУ Б В.2.6-209:2016 з метою запобігання електрокорозії бетону, електричний опір бетону шпал з добавками, що є електролітами не повинен бути меншим електричного опору бетону без добавок. Таким чином, наразі актуальним є дослідження шляхів підвищення стійкості бетону шпал до внутрішньої корозії внаслідок рекристалізації етtringіту, лужної корозії та електрокорозії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в межах держбюджетної науково-дослідної роботи “Розробка лужних цементів з регульованими власними деформаціями в системі $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$, модифікованої аніономішуючими добавками, вибраними з групи: сульфатів, нітратів, хлоридів, фторидів, фосфатів, і бетонів на їх основі” (номер держреєстрації 0118U002017) та за договором № НР-2014 (34-14) від 23.01.2014 з Українським державним університетом залізничного транспорту. Результати виконання науково-дослідних робіт з безпосередньою участю автора в якості виконавця, використано при розробці ДСТУ Б В.2.6-209:2016 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови».

Мета роботи і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення корозійної стійкості бетону залізничних шпал до внутрішньої корозії шляхом комплексної модифікації пластифікуючими та мінеральними добавками.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- провести аналіз літературних джерел щодо можливості отримання стійкого до внутрішньої корозії пластифікованого бетону залізничних шпал шляхом його комплексної модифікації органічними та мінеральними добавками;

- дослідити роль активних мінеральних добавок у зв'язуванні іонів лужних металів Na^+/K^+ для підвищення стабільності етtringіту в умовах тепловологої обробки;

- визначити можливість зменшення ймовірності виникнення корозійних процесів від перекристалізації етtringіту і дії лугів шляхом обґрунтованого вибору і витрати органічних і мінеральних добавок;

- дослідити стійкість пластифікованого бетону шпал до електрокорозії від струмів витоку за критерієм електричного опору залежно від типу мінеральних добавок і пластифікаторів;

- дослідити можливість підвищення стійкості бетону шпал до внутрішньої корозії на технологічному рівні шляхом зниження температури тепловологої обробки та зменшення витрати цементу при використанні суперпластифікаторів та активних мінеральних добавок;

- провести дослідно-промислове впровадження розроблених бетонів у виробництво та здійснити техніко-економічне обґрунтування розроблених модифікованих бетонів для залізничних шпал.

Об'єкт дослідження -закономірності формування структури модифікованого бетону для попередньо напружених залізничних шпал, що характеризується підвищеними показниками корозійної стійкості.

Предмет дослідження-модифіковані бетони підвищеної корозійної стійкості для попередньо напружених залізничних шпал.

У роботі використано методи випробування в'язучих композицій, бетонних сумішей та бетонів за державними стандартами.

Наукова новизна одержаних результатів:

- теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість отримання стійкого до внутрішньої корозії пластифікованого бетону за залізничних шпал шляхом його комплексної модифікації органічними та мінеральними добавками, які зв'язуючи іони лужних металів Na^+/K^+ , присутніх в цементі та добавках, сприяють зменшенню ймовірності виникнення небезпечних процесів рекристалізації етtringіту, а також попередженню виникнення лужної корозії бетону;

- визначена роль таких складових мінеральних добавок, як оксиди Al_2O_3 і SiO_2 у зв'язуванні іонів лужних металів Na^+/K^+ , що забезпечує умови існування стабільного етtringіту при підвищенні температури, зменшує ймовірність рекристалізації етtringіту та утворення пізнього етtringіту;

- доведено, що в результаті зв'язування іонів лужних металів в лужні гідроалюмосилікати та гідросилікати кальцію створюється додатковий резерв підвищення експлуатаційних властивостей бетону і запропоновано розглядати комплексно вирішення проблеми зменшення ймовірності виникнення корозійних процесів від перекристалізації етtringіту і дії лугів шляхом обґрунтованого вибору і витрати органічних і мінеральних добавок;

- встановлено залежність формування стійкості бетону до електрокорозії за критерієм його електричного опору від типу мінеральних добавок і пластифікаторів.

Практичне значення одержаних результатів:

- запропоновано шляхи мінімізації небезпеки внутрішньої корозії бетону шпал внаслідок перекристалізації етtringіту при використанні пластифікаторів та мінеральних добавок, що вміщують активні алюмосилікати;

- запропоновано рецептури модифікованих бетонів для залізобетонних попередньо напружених шпал, що за 8-10 годин тверднення за температур 35-40 °C досягають передаточної міцності 32 МПа та класу міцності B40 у проектному віці. Рецептури характеризуються зменшеною витратою цементу (400-380 kg/m^3) у порівнянні з витратою цементу на виробництві (480-440 kg/m^3), підвищеною стійкістю до лужної корозії, корозії внаслідок кристалізації пізнього та вторинного етtringіту та електрокорозії;

- в промислових умовах підтверджена відповідність запропонованих рецептур модифікованих бетонів вимогам щодо міцності, морозостійкості, водонепроникності та електричного опору, економічний ефект від їх застосування склав 703,12 грн.; результати дисертаційних досліджень були використані при розробці ДСТУ Б В.2.6-209:2016 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови».

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних досліджень, обробці одержаних результатів та їх аналізі, впровадженні розроблених матеріалів у виробництво і відображений у наукових роботах:

- встановлено можливість блокування корозії «луг-кремнієва кислота» заповнювачів бетону залізничних шпал за рахунок застосування активних мінеральних добавок [1, 3, 4, 6, 7];

- досліджено вплив комплексних органо-мінеральних добавок, які містять суперпластифікатор полікарбоксилатного типу, метакаолін і прискорювачі тверднення на ранню міцність бетону залізобетонних шпал. Встановлено залежності ранньої і проектної міцності бетону від вмісту цементу і добавок за різних температур тверднення[2];

- визначено корозійну стійкість модифікованого бетону для залізобетонних шпал за критеріями електричний опору [6, 7], ці дослідження враховано при розробці ДСТУ Б В.2.6-209:2016 [5];

- вивчено вплив мінеральних добавок на корозійну стійкість бетону шпал за критеріями сульфатостійкості [3] та за критеріями стійкості до внутрішньої корозії внаслідок кристалізації пізнього та вторинного етtringіту [7].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи були висвітлені в доповідях на 5-ї Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (Харків, ДУЗТ, 2015р.), та на 6-й Міжнародній науково-технічній конференції по будівельним матеріалам, конструкціям і спорудам «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (Харків, ДУЗТ, 2017р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 9 робіт, з них 6 статей у фахових виданнях України, з яких 2 статті у науково-періодичному виданні, що входить до наукометричних баз (Scopus, Index Copernicus), ДСТУ Б В.2.6-209:2016 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови», 1 стаття у науковому виданні України та 2 публікації у матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 108 сторінках друкованого тексту основної частини, яка складається зі вступу, п'яти розділів та висновків. Повний обсяг дисертації становить 154 сторінки і включає 43 рисунки, 14 таблиць, список використаних джерел з 127 найменувань на 16 сторінках та 5 додатків на 13 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульована мета досліджень, наукова новизна, практичне значення та основні задачі роботи, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, апробація результатів дисертації, публікації.

У **першому** розділі представлено огляд сучасного стану наукової проблеми та визначені теоретичні передумови досліджень.

За результатами аналізу світового досвіду руйнування залізобетонних шпал встановлено, що його ймовірними причинами можуть бути корозія внаслідок кристалізації пізнього і вторинного етtringіту та лужна корозія бетону. Мікроструктурна недосконалість бетону шпал вітчизняного виробництва зумовлена застосуванням неякісних заповнювачів забруднених включеннями слюди, реакційноздатних і луговмісних мінералів та підвищеним вмістом лугів у цементі, що може призводити до проходження реакції «луг-кремнієва кислота» і спричиняти утворення мікротріщин в яких потім може кристалізуватися пізній (вторинний) етtringіт з подальшим їх розкриттям. Теоретична температура перетворення етtringіту в гідромоноссульфоалюмінат кальцію становить близько 90 °С, однак підвищений вміст в системі лугів (Na^+/K^+) знижує температуру розкладання етtringіту до 50–60 °С, що підвищує ймовірність рекристалізації пізнього (вторинного) етtringіту навіть внаслідок тепловології обробки (ТВО). Внаслідок рекристалізації пізнього (вторинного) етtringіту пошкоджуються в першу чергу високоякісні бетони з високою міцністю і щільністю, що характеризуються низьким загальним об'ємом пор, і відповідно, зменшеним простором для новоутворень.

За результатами огляду літератури встановлено можливість контролювати лужну корозію та внутрішню корозію внаслідок рекристалізації етtringіту шляхом модифікації бетону шпал пуцолановими добавками, що вміщують активні алюмосилікати. Відомі дослідження з використання пуцоланових добавок різняться постанововою задач, найчастіше спрямованих на зменшення клінкерної складової в цементі та ущільнення бетону. Водночас такі роботи свідчать про суттєвий вплив речовинного складу добавки, перш за все наявність Al_2O_3 на розвиток процесів гідратації. Наприклад відомо, що метакаолін, як алюмосилікатна пуцоланова добавка взаємодіє з портландітом цементу з утворенням гідросилікатів і гідроалюмінатів кальцію та гідрогеленіту. В той же час, активний алюмосилікат метакаоліну взаємодіє з водорозчинними лугами зв'язуючи їх в аморфізовані лужні гідроалюмосилікати, тим самим виводячи луги з корозійних реакцій. В контексті останнього ефекту, потребує дослідження ефективність алюмосилікатних добавок щодо блокування фазового переходу етtringіт-гідромоноссульфоалюмінат кальцію в умовах ТВО з метою уникнення подальшого тріщиноутворення. Крім того, участь таких добавок в пуцолановій реакції теж здатна змістити перетворення в системі гідросульфалюмінатів кальцію.

Звертається увага на те, що з огляду на внутрішню корозію бетону слід враховувати, що відомі добавки з груп пластифікаторів та прискорювачів тверднення містять іони Na^+ та K^+ і можуть впливати на процеси кристалізації та рекристалізації новоутворень, які можуть бути деструктивними для бетону. Дослідження свідчать, що цей фактор слід враховувати і з огляду впливу на можливий розвиток процесу електрокорозії бетону шпал. В літературі висвіт-

люється відомий позитивний вплив поверхнево активних речовин щодо утворення повітряних пор, які виконують демпфуючу роль, акумулюючи новоутворення та зменшуючи небезпечні розширення бетону. Показано, що використання суперпластифікаторів(СП) дозволяє значно зменшувати витрату в складі бетону цементу, вміст якого визначає потенційну кількість в бетоні новоутворень, здатних до кристалізації та перекристалізації етtringіту та участі в реакції «луг-кремнієва кислота».

Аналіз і узагальнення літературних джерел дозволяє висунути наукову гіпотезу про можливість підвищення ефективності технології виробництва залізничних шпал при одночасному регулюванні процесами структуроутворення бетону в умовах ТВО для уникнення внутрішніх корозійних процесів, що супроводжуються тріщиноутворенням, шляхом комплексної модифікації пластифікуючими та пудолановими добавками, які містять Al_2O_3 і здатні зв'язувати з порового розчину іони Na^+/K^+ , при зменшенні яких підвищується температура стабільного існування етtringіту і мінімізується ризик фазових переходів етtringіт-гідромоносульфоалюмінат кальцію.

У **другому** розділі наведено характеристики сировинних матеріалів та методів досліджень.

В якості в'язучих матеріалів використовували портландцементи ПЦ-І 500 та ПЦ ІІ/А ІІІ-400, згідно ДСТУ Б EN 197-1:2015, виробництва ВАТ «Волинь-Цемент» (м. Здолбунів, Україна), що є середньоалюмінатними цементами, виготовленим на основі клінкеру нормованого складу з вмістом трикальцієвого алюмінату (C_3A) не більше 8%. Основні показники цементів ПЦ І 500 та ПЦ ІІ/А ІІІ-400 виробництва ВАТ «Волинь-Цемент»: питома поверхня, за Блейном ≥ 350 м²/кг для ПЦ І 500 та 280-350 м²/кг для ПЦ ІІ/А ІІІ-400; вміст лугів в перерахунку на $Na_2O \leq 1,0\%$; вміст трикальцієвого алюмінату $C_3A - 6,0-8,0\%$; вміст $SO_3 - 1,0-3,5\%$.

В якості заповнювачів використовували: дніпровський кварцовий пісок, згідно ДСТУ Б.В.2.7-32-95, з $M_{кр} = 1,23-1,29$ (м. Київ, Україна); гранітний щебінь фракції 5-20мм, згідно ДСТУ Б В.2.7-75-98, виробництва ТОВ «Гніванський гранітний кар'єр» (м. Гнівань, Україна) та відсів дроблення гірських порід фракції 0,63-2,5 мм ДСТУ Б В.2.7-76-98, того ж виробника.

В якості активних мінеральних добавок використовували: золу-виносу Ладизинської ТЕС (м.Ладизин, Україна) та Добротвірської ТЕС(смт. Добротвір, Україна) згідно ДСТУ Б В.2.7-205:2009; мікрокремнезем (OFZ, Словаччина), метакаолін ВМК (ТОВ «Західна Каолінова Компанія», Україна), метакаолін МК-40 (ПАТ «Ватутінський комбінат вогнетривів», Україна), алюмосилікатний модифікатор Centrlit NC ІІ (МС-Vauchemie, Німеччина) згідно ДСТУ Б В.2.7-171:2008.

В якості пластифікаторів використовували добавки різної хімічної природи згідно ДСТУ Б В.2.7-171:2008 різних виробників: «Sika», «МС-

Vauchemie», «Марей», «Містім», «Реатекс». Для приготування бетонної суміші використовувалась питна вода, згідно ДСТУ Б В.2.7-273:2011.

Фізико-механічні дослідження здійснювали у відповідності з діючими нормативними документами: бетонні суміші за ДСТУ Б В.2.7-96-2000 та ДСТУ Б В.2.7-114-2002; міцність бетонів на стиск визначали на зразках $100 \times 100 \times 100$ мм за ДСТУ Б В.2.7-176:2008, ДСТУ Б В.2.7-214:2009, ДСТУ Б В.2.7-224:2009; морозостійкість бетонів за ДСТУ Б В.2.7-49-96, середню густину і водонепроникність за ДСТУ Б В.2.7-170:2008.

Вплив модифікуючих добавок на стійкість бетону залізобетонних шпал до електрокорозії за критерієм питомого електричного опору, досліджували за методикою ДСТУ Б В.2.6-209:2016. Методика передбачає порівняння питомого електричного опору базового складу з опором модифікованих складів бетонів.

Дослідження стійкості бетону залізобетонних шпал до корозії, що обумовлена реакцією кремнезему заповнювачів з лугами здійснювали за ДСТУ Б В.2.7-71 (п. 4.22.3). Методика ДСТУ Б В.2.7-71 передбачає вимірювання розширення призм бетону в гарячому (80 ± 1 °C) 1М розчині NaOH протягом 11 діб. Критерієм оцінки стійкості бетону до лужної корозії є показник деформації бетонів контрольного та основних складів, що для корозійностійкого бетону не повинні перевищувати 0,1 %.

Утворення пізнього етtringіту в бетоні розглядається як форма внутрішньої сульфатної корозії, викликаной тепловологою обробкою бетону в ранньому віці за температур, що перевищують межу стабільності етtringіту. В світовій практиці методики дослідження утворення пізнього етtringіту передбачають випробування протягом 12 місяців розширення, міцності, модуля пружності та пористості термічно оброблених цементних розчинів та бетонів.

В даній роботі дослідження стійкості в'язучих композицій до внутрішньої сульфатної корозії внаслідок рекристалізації етtringіту здійснювали з використанням модифікованої методики SVA (пропоновано експертним комітетом з «технології бетону» Deutsches Institut für Bautechnik), яка передбачала визначення розширення зразків $1 \times 4 \times 16$ см, що не повинно перевищувати 0,5 мм/м при витримуванні в 4,4 % розчині сульфату натрію. Для прискореної оцінки стійкості в'язучих речовин до утворення пізнього етtringіту методика SVA в даній роботі передбачала дослідження впливу на зразки, що спочатку піддавались циклу ТВО з температурою понад 60 °C, розчину сульфату натрію на ранніх термінах випробування (до 56 діб). Стійкість до рекристалізації вторинного етtringіту досліджували шляхом циклічного занурення зразків в гарячий розчин сульфату натрію (температура понад 60 °C) з наступним їх витримуванням в цьому ж розчині при 20 °C.

Склад новоутворень у модельних композиціях вивчали за допомогою рентгенофазового аналізу на дифрактометрі ДРОН-3М з мідною трубкою. Диференційно-термічний аналіз модельних композицій виконували на дериватографі системи Р. Паулік, І. Паулік, Л. Ердей фірми „МОМ” (Угорщина). Дослідження мікроструктури модельних композицій здійснювали за допомогою растрового - електронного мікроскопу - мікроаналізатору РЕММА – 102 – 02.

У **третьому** розділі наведено результати дослідження можливості підвищення стійкості бетону шпал до внутрішньої корозії внаслідок утворення пізнього і вторинного етtringіту, реакції луг-кремнієва кислота та електрокорозії.

За даними огляду літератури найбільшу небезпеку з огляду внутрішніх корозійних процесів в бетоні шпал становить рекристалізація гідросульфаталюмінатів кальцію внаслідок змінних температурних впливів та лужна корозія бетону. При цьому, наявні в поровому розчині бетону іони Na^+ та K^+ не сприяють стабільному існуванню етtringіту та приймають участь в реакції «луг-кремнієва кислота» заповнювача. Крім наявності в цементі, іони Na^+/K^+ містяться в добавках з групи пластифікаторів та прискорювачів тверднення і можуть спричиняти деструктивні для бетону процеси рекристалізації новоутворень. Отже підвищення стійкості бетону шпал до внутрішньої корозії можливо забезпечити шляхом мінімізації вмісту іонів лужних металів в поровому розчині бетону, що становило задачу наведених далі досліджень, яка вирішувалася при використанні пуцоланових добавок різного складу, для зв'язування іонів Na^+/K^+ в лужні гідроалюмосилікати та гідросилікати кальцію.

Для перевірки ефективності щодо блокування розширення внаслідок утворення пізнього етtringіту мінімальних дозувань алюмосилікатної добавки у вигляді метакаоолінів та Centrilit NCII, які відрізняються питомою поверхнею 10000-11500 $\text{см}^2/\text{г}$, були реалізовані експерименти при їх витраті 5 % на заміну цементу. Водночас випробовували ефективність щодо блокування утворення пізнього етtringіту 10% зол виносу вітчизняних ТЕС, що мають співставну з цементом дисперсність, але містять алюмосилікат в іншій формі.

Оскільки за звичайних умов рекристалізація пізнього етtringіту може відбуватися протягом декількох років, для прискореної оцінки стійкості до утворення пізнього етtringіту випробування проводили (після циклу ТВО з температурою понад 60 °С) за методикою SVA в розчині сульфату натрію протягом 60 діб. Як видно з рис. 1, а, введення 5 % метакаооліну ВМК та алюмосилікатної добавки Centrilit NCII дозволяє зменшити розширення зразків на ранніх термінах дослідження. При цьому, слід відзначити неоднакові ефекти при використанні метакаоолінів різних виробників, що характеризуються різною питомою поверхнею та технологічними умовами отримання. Найменше розширення на ранніх термінах випробування спостерігається при використанні Centrilit NCII (питома поверхня 10000 $\text{см}^2/\text{г}$), дещо поступається цій добавці МТК ВМК (питома поверхня 10400 $\text{см}^2/\text{г}$). Розширення на рівні контрольного

показує склад з МТК МК-40 (питома поверхня 11500 см²/г). Хоча перші 60 діб розширення всіх зразків не перевищує критичного значення 0,5 мм/м слід враховувати, що випробування проводилися при В/Ц=0,5, в той час як в бетоні шпал робочі значення В/Ц становлять 0,3-0,32, що є більш небезпечним з точки зору тріщиноутворення внаслідок кристалізації новоутворень.

На відміну від метаксаоліну введення 10% золи виносу (питома поверхня ~ 3000 см²/г) дозволяє зменшити розширення зразків як на початкових так і на віддалених термінах випробування (рис. 1, б). Наведене може бути пояснене більш інтенсивним реагуванням на початкових термінах випробувань алюмосилікатів з більшою питомою поверхнею, в той час як зола виносу з меншою дисперсністю реагує повільніше але протягом довшого часу. Враховуючи найвищу ефективність МТК ВМК серед досліджених вітчизняних метаксаолінів в подальших дослідженнях модифікованих бетонів використовували саме цю модифікуючу добавку.

Зразки з 10% золи виносу Ладижинської та Добровірської ТЕС співставної питомої поверхні, показують фактично однакові ефекти щодо зменшення розширення в умовах впливу розчину Na₂SO₄ протягом перших 60 діб випробування (рис. 1, б). Зразки з ПЦ ІІ/А-ІІІ-400 в умовах впливу розчину Na₂SO₄ протягом перших 30 діб показують розширення на рівні контрольного складу з ПЦ І-500, після чого розширення складу з ПЦ ІІ/А ІІІ-400 відповідає рівню зразків з 10% золи виносу (рис. 1, б).

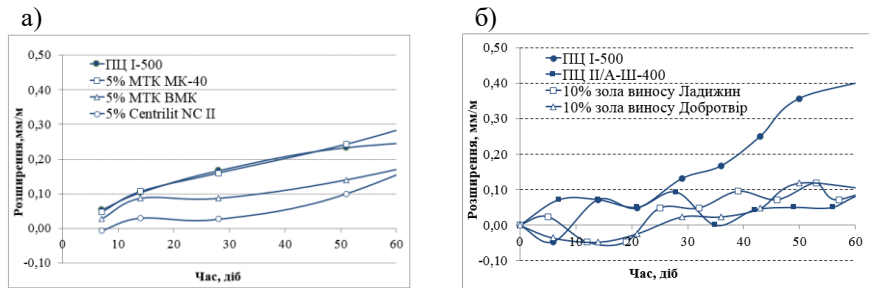


Рисунок 1 - Розширення зразків з вмістом в складі метаксаоліну (а), золи виносу та шлаку (б) у 4,4%-ному розчині Na₂SO₄

Для прискореного дослідження стійкості до рекристалізації вторинного етtringіту зразки піддавали сумісному впливу сульфату та циклів зміни температури. Зважаючи на жорсткі умови випробування вміст золи виносу був збільшений до 20, 30 та 40% на заміну цементу відповідно. Результати циклічного занурення зразків (кожні сім діб) в гарячий розчин сульфату натрію (температура більше 60 °С) з наступним їх витриманням в цьому ж розчині при 20 °С наведено на рис. 2. За наведеними даними спостерігається значне прискорення розширення контрольних зразків (в ~10 разів) порівняно з

витримуванням при 20 °С (рис. 1). Вміст понад 20 % золи виносу призводить до істотного зменшення розширення зразків на початкових термінах циклічних випробувань (рис. 2). Проте стабілізація розширення зразків досягається лише при вмісті понад 30 % золи виносу.

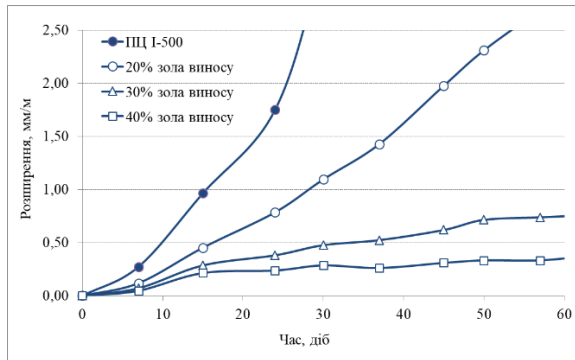


Рисунок 2 - Розширення зразків у 4,4% розчині Na_2SO_4 при циклічному впливі температури понад 60 °С

Ефективність золи виносу та метакеоліну пояснюється зв'язуванням активними алюмосилікатами іонів лужних металів з порового розчину в аморфні лужні гідроалюмосилікати. Це призводить до зменшення вмісту іонів Na^+/K^+ у поровому розчині і, як наслідок, підвищення температури фазового переходу $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

(еттрингіт-гідромоноссульфоалюмінат кальцію), що зменшує потенційну кількість циклів рекристалізації вторинного еттрингіту та імовірність утворення пізнього еттрингіту.

Одержані дані кореспондують з результатами дослідження модельних композицій: бездобавочного середньоалюмінатного португандцементу (рис.3), португандцементу з добавкою 2% Na_2SO_4 (рис.4) та португандцементу з добавкою 2% Na_2SO_4 і 10% метакеоліну (рис.5). Умовні позначення на рис.3-5: А – C_3A , Р – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Е – еттрингіт, М – гідромоноссульфоалюмінат кальцію (далі моносольфат), G – $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$.

З рис. 3а видно, що C_3A , інтенсивні рефлекси якого фіксуються на 1 добу тверднення, практично повністю реагує до 7 доби, у цей же термін стабілізується інтенсивність рефлексів еттрингіту, які до 28 доби збільшуються незначно. Рефлекси характерні для моносольфату, фактично без зміни їх інтенсивності спостерігаються на 1, 7 та 28 добу. На знімках зразків цієї системи (рис.3, б), зроблених за допомогою растрового електронного мікроскопу, ідентифікуються включення крупних кристалів голчастого еттрингіту поряд з кристалами моносольфату, португандіту та гіпсу.

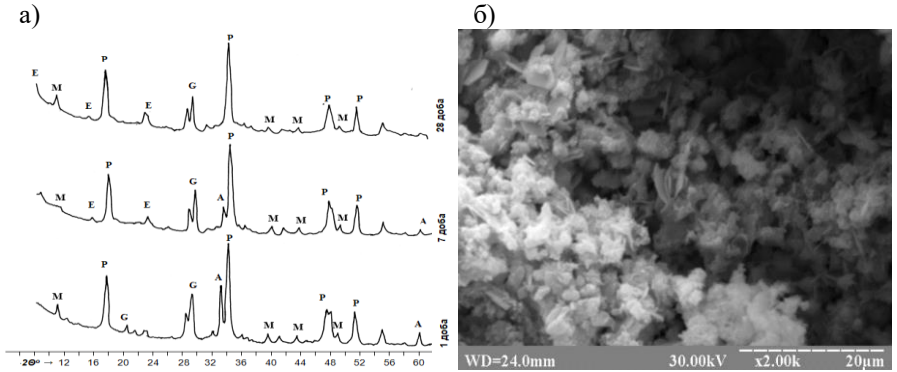


Рисунок 3 – Рентгенограми (а) та електронні знімки (б) продуктів гідратації в моделі бездобавочного портландцементу

В моделі портландцементу з добавкою 2% Na_2SO_4 (рис.4, а) підвищений вміст Na_2SO_4 прискорює перетворення C_3A , інтенсивність рефлексів якого (порівняно з бездобавочною моделлю на рис. 3, а) помітно зменшується вже на 1 та 7 добу. При цьому, з 1 по 7 добу і особливо на 28 добу спостерігається збільшення інтенсивності рефлексів гіпсу, що пояснюється проходженням реакції за участю Na_2SO_4 та $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рефлекси якого зменшуються) з утворенням $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Інтенсивність рефлексів етtringіту на рис.4, а порівняно з рис. 3, а фактично не змінюється, проте на 28 добу збільшуються рефлекси характерні для моносульфату.

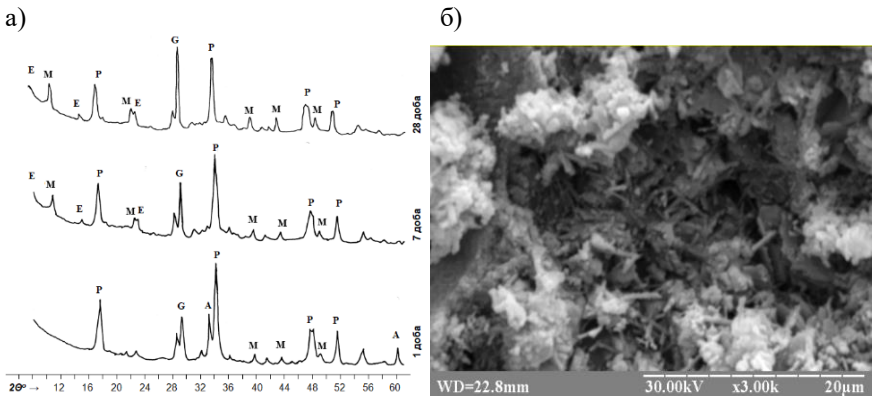


Рисунок 4 – Рентгенограми (а) та електронні знімки (б) продуктів гідратації в моделі портландцементу з добавкою 2% Na_2SO_4

Електронні знімки зразків цієї системи дозволяють ідентифікувати вміст крупних кристалів голчастого етtringіту (рис.4, б).

Вміст в модельній системі метакаоліну (рис.5, а) призводить до істотного зростання інтенсивності рефлексів етtringіту (порівняно з рис. 3, а та рис. 4, а) як на 7 так і на 28 добу, при цьому значно зменшується інтенсивність рефлексів $\text{Ca}(\text{OH})_2$, що активно поглинається метакаоліном. Рефлекси, характерні для моносульфату на 1, 7 та 28 добу залишаються фактично незмінними. На знімках (рис.5, б) етtringіт ідентифікується у вигляді дрібних кристалів.

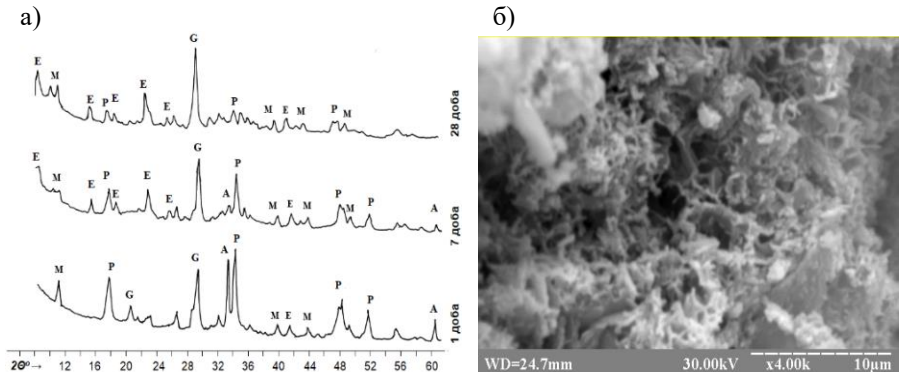


Рисунок 5 – Рентгенограми (а) та електронні знімки (б) продуктів гідратації в моделі портландцементу з добавкою 2% Na_2SO_4 та 10% метакаоліну

Дослідження балансу моносульфату та етtringіту методом диференційно-термічного аналізу свідчить, що бездобавочний портландцемент на 7 та 28 добу тверднення має рівноважний вміст цих продуктів. Підвищений вміст в моделі сульфату натрію зміщує рівновагу в напрямку моносульфату як на 7 так і на 28 добу. Введення в модель сульфату натрію і метакаоліну відновлює рівноважний вміст етtringіту і моносульфату на 7 добу та зміщує рівновагу в напрямку етtringіту на 28 добу.

Таким чином, підвищений вміст сульфату натрію сприяє утворенню моносульфату навіть за нормальних температурних умов, а з підвищенням температури цей ефект посилюється. При цьому 70-80% лугів вміщуються в складі цементу саме у вигляді сульфатів. Введення до системи метакаоліну дозволяє вже на початкових термінах структуроутворення змістити баланс в напрямку утворення етtringіту, що виключає подальшу кристалізацію пізнього та вторинного етtringіту

Ефективність мінімальних дозувань активних мінеральних добавок щодо зв'язування іонів Na^+ та K^+ може бути опосередковано підтверджено за критерієм блокування розширення бетону внаслідок реакції кремнезему заповнювачів з лугами цементу. Враховуючи, що в рецептурах бетону шпал на

підприємствах використовують відсів дроблення інертних гірських порід, реакційна здатність яких внаслідок подрібнення може підвищуватися, досліджували їх потенційний вплив на лужну корозію бетону з порівнянням ефективності дії добавок алюмосилікатного та силікатного складу.

Наведені на рис.6, а) результати свідчать, що досліджувані відсів дроблення гірських порід мають певну реакційну здатність, що призводить до розширення зразків при нагріванні у лужному розчині, проте розширення не перевищує допустиму межу 0,1 %. Слід врахувати, що збільшення вмісту у відсівах пиловидної складової може призводити до перевищення допустимих значень розширення. При додаванні 5 % та 10 % метаксаоліну від маси цементу розширення досліджуваних зразків значно зменшується (рис.6, а), що свідчить про зв'язування лужних іонів в нерозчинні гідроалюмосилікати. З врахуванням практично однакового ефекту при додаванні 5 та 10 % метаксаоліну можна вважати, що 5 % метаксаоліну достатньо для мінімізації лужної корозії бетону шпал.

При введенні 5 % мікрокремнезему розширення зразків дещо зменшується, але, введення до системи 10% мікрокремнезему призводить до збільшення розширення досліджуваних зразків вище рівня контрольних зразків без пуцолани хоча і не перевищує допустиму межу 0,1% (рис. 6, б). Таким чином, досліджуваний мікрокремнезем при дозуванні 5% менш ефективно ніж метаксаолін блокує лужну корозію заповнювачів, а при дозуванні 10% розширення навіть перевищує розширення контрольних зразків. Аналізуючи отримані результати, слід зазначити, що використання активної добавки алюмосилікатного складу, перш за все у вигляді метаксаоліну, більш ефективно, оскільки здійснює одночасний позитивний вплив на уникнення лужної корозії і небезпечних процесів перекристалізації еттрингіту при зв'язуванні іонів лужних металів.

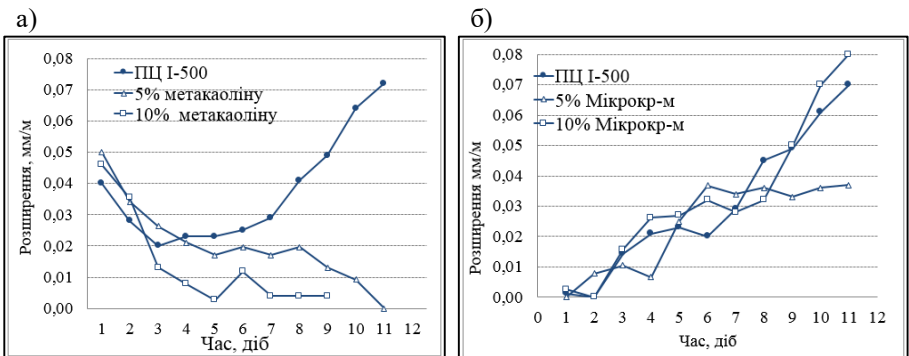


Рисунок 6 - Розширення зразків з метаксаоліном (а) та мікрокремнеземом (б) в гарячому ($80 \pm 1^\circ\text{C}$) розчині NaOH (1М)

Для зменшення агломерації тонкодисперсних мінеральних добавок та покращення однорідності бетонної суміші і бетону зі зменшенням витрати цементу використовуються добавки пластифікатори.

Встановлено, що модифікуючий комплекс у складі мінеральної добавки і пластифікатора дозволив отримати бетон практично однакової міцності при зменшенні витрати цементу з 450 до 350 кг/м³ та зміні В/Ц з 0,38 до 0,30. Такий бетон при використанні суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу, дозволяє забезпечити питомий електричний опір модифікованого бетону шпал вище електричного опору контрольного складу бетону без добавок. Позитивний ефект щодо збільшення електричного опору при введенні 5 % метакаоліну пояснюється зв'язуванням активними алюмосилікатами іонів лужних металів з порового розчину—електроліту та ущільненням бетону.

У **четвертому** розділі наведено дослідження технологічних факторів, що визначають стійкість бетону шпал до внутрішньої корозії. До основних технологічних факторів, що визначають стійкість бетону шпал до внутрішньої корозії та підлягають керуванню при їх виробництві, можна віднести вміст цементу і модифікуючих добавок в складі бетону та режим його тепловологої обробки.

Метою досліджень було вивчення можливості зменшення витрати цементу в складі бетону за рахунок комплексної модифікації суперпластифікаторами і метакаоліном, та мінімізація температури ТВО при забезпеченні регламентованої міцності для передачі напруження арматури на бетон (понад 32 МПа) та проектної міцності бетону на 28 добу (В40).

За результатами досліджень в складах бетону без метакаоліну, що характеризуються меншою витратою СП характер кривої кінетики зростання міцності при ТВО (Т=40 °С) наближується до кривої контрольного складу. Дані свідчать про ефективність використання практично всіх добавок в досліджуваних складах бетону після 8 годин ТВО за режимом (2+2+4+2) при Т=40°, оскільки бетон має достатню міцність для передачі напруження арматури та забезпечує проектний клас міцності В40 на 28 добу після ТВО.

Склади пластифікованих бетонів з 5% метакаоліну також піддавали ТВО за пом'якшеним режимом (2+2+4+2) при Т=40°С. За результатами випробувань, кінетика набору міцності контрольного складу бетону, прийнятого на виробництві, без добавок (з витратою цементу 450 кг/м³) більш інтенсивна, ніж пластифікованих бетонів з витратою цементу 400 кг/м³ та 5% метакаоліну, хоча проектна міцність бетону В40 досягається всіма складами.

Бетони зі зменшеною до 350 кг/м³ витратою цементу (В/Ц=0.3) піддавали ТВО за режимом (2+2+4+2). Для порівняння впливу температури ТВО на інтенсивність набору міцності бетону з добавкою MC PowerFlow 3100тепловологу обробку цього складу проводили при температурах Т=40°С та Т=60°С. При витраті цементу 350 кг/м³ інтенсивність набору міцності модифікованих

бетонів поступається міцності контрольного складу без добавок (з вмістом цементу 450 кг/м^3). Проте склади з добавками ЖК-04 ПП та MC PowerFlow 3100 вже після 9 годин ТВО за режимом (2+2+4+2) при $T=40^\circ$ мають достатню міцність для передачі напруження арматури.

При зменшенні витрати цементу до 350 кг/м^3 виникає потреба збільшення витрати пластифікаторів, внаслідок чого інтенсивність набору міцності модифікованих бетонів пропарених при $T=60^\circ\text{C}$ поступається контрольному складу без добавок, пропареному при $T=40^\circ\text{C}$. Проте, рецептури бетонів з добавками SikaVisco Crete-20 HE та MC PowerFlow 3100 вже після 8 годин ТВО при $T=60^\circ$ мають достатню міцність для передачі напруження арматури.

В ряді випадків зменшення температури ТВО може досягатися шляхом використання добавок прискорювачів, що може бути ефективним рішенням у випадку підвищеної витрати СП. Так, використання пластифікатора з одночасним прискоренням гідратації цементу за рахунок введення $1\% \text{ Ca}(\text{NO}_3)_2$ дозволило після 8 годин ТВО (1+3+3+1 при $T=40^\circ\text{C}$) отримати міцність на стиск модифікованого бетону вище міцності виробничого складу (з 450 кг/м^3 цементу) при зменшеній до $380\text{-}400 \text{ кг/м}^3$ витраті цементу та вмісті 5% метакаоліну. Міцність на стиск модифікованого бетону на 1добу відповідала класу за міцністю B50, а на 28 добу перевищувала B60.

Отже, отримані результати відповідають вирішенню задачі пошуку шляхів уникнення внутрішньої корозії бетону шпал для забезпечення їх тріщиностійкості

У п'ятому розділі наведено результати впровадження розроблених складів модифікованих бетонів зі зменшеною витратою цементу в промислових умовах ПрАТ "Гніванський завод спецзалізобетону", ПрАТ "Коростенський завод залізобетонних шпал" та ПрАТ "Староконстантинівський завод залізобетонних шпал". Необхідність впровадження на декількох діючих підприємствах зумовлена тим, що одним з основних факторів, який визначає відмінності в мікроструктурі бетону шпал різних заводів є стан обладнання на окремих підприємствах. Внаслідок відмінностей у режимах віброущільнення та тепловологої обробки бетони лабораторних зразків та шпал характеризуються різною мікроструктурою. Найбільш проблемною є мікроструктура бетону шпал ПрАТ «Коростенський завод залізобетонних шпал» та ПрАТ "Гніванський завод спецзалізобетону", що характеризуються значним вмістом в мікротріщинах та порах модифікованих кристалів еттрингіту. Макроструктурна неоднорідність бетону шпал «Староконстантинівського заводу ЗБШ» зумовлена неякісним віброущільненням внаслідок застосування щебню з неправильними геометричними розмірами. Отже, метою дослідно-промислового впровадження було відтворення лабораторних складів модифікованих бетонів на технологічному обладнанні вказаних заводів.

За результатами дослідно-промислового впровадження рекомендовані склади пластифікованих бетонів з витратою цементу $400\text{-}380 \text{ кг/м}^3$

та 5% метакаоліну, що показали кінетику набору міцності для передачі напруження арматури на рівні бездобавочних бетонів з витратою цементу 450 кг/м^3 . На 28 добу тверднення міцність бетонів всіх модифікованих складів перевищувала проектний клас В40. В умовах ПрАТ "Коростенський завод залізобетонних шпал" міцність на стиск для передачі напруження арматури модифікованих бетонів і контрольного складу без добавок досягалась через 8 годин ТВО з температурою ізотермічного прогріву $35 \text{ }^\circ\text{C}$. В умовах ПрАТ "Гніванський завод спецзалізобетону" вироби з модифікованого бетону і контрольного складу бетону без добавок не піддавались ТВО. Додаткова міцність всіх бетонів була достатньою для передачі напруження арматури. Шпали з модифікованих бетонів витримали випробування на тріщиностійкість без розкриття тріщин, їх питомий електричний опір перевищував опір контрольного складу. В умовах ПрАТ "Староконстантинівський завод залізобетонних шпал" вироби піддавались протягом 7 годин ТВО з температурою ізотермічного прогріву $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Міцність модифікованого бетону на 13 годину після ТВО була достатньою для передачі напруження арматури, а на 28 добу тверднення досягала проектного класу В40. Економічна ефективність виготовлення 1 м^3 модифікованого бетону шпал порівняно з існуючим аналогом, враховуючи, що існуючий аналог бетону шпал не відробляє половини експлуатаційного ресурсу, а склад бетону шпал, який пропонується буде відробляти повний ресурс становить 703,12 грн.

ВИСНОВКИ

1. Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість отримання стійкого до внутрішньої корозії пластифікованого бетону залізничних шпал шляхом комплексної модифікації органічними та мінеральними добавками, які зв'язуючи іони лужних металів Na^+/K^+ , присутніх в цементі та добавках, сприяють підвищенню температури стабільного існування етtringіту і зменшенню ймовірності виникнення небезпечних процесів його рекристалізації та попередженню виникнення лужної корозії та електрокорозії бетону.

2. Доведено можливість блокування розширення та тріщиноутворення модифікованого бетону після тепловологої обробки шляхом забезпечення умов стабільного існування етtringіту при температурі $50\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$ за рахунок участі мінеральної добавки у вигляді метакаоліну, який сприяє зміщенню рівноваги в системі етtringіт-гідромоноссульфоалюмінат кальцію в напрямку утворення етtringіту та зменшує потенційну кількість циклів рекристалізації та ймовірність утворення пізнього етtringіту.

3. Показано, що мінеральна складова модифікуючих комплексних добавок в бетоні, яка вміщує активний алюмосилікат, в порівнянні з силікатною складовою найбільш ефективного одночасно усуває загрозу як перекристалізації етtringіту в гідромоноссульфоалюмінат кальцію, так і лужної корозії: при

введенні 5% метакаоліну від витрати цементу досягається зв'язування іонів Na^+ та K^+ з уникненням розширення зразків бетону.

4. Встановлено закономірне збільшення електричного опору пластифікованого бетону зі зменшенням вмісту цементу від прийнятого на виробництві 450 кг/м^3 до запропонованого 350 кг/м^3 та зменшенням В/Ц від 0,38 до 0,30. Позитивний ефект щодо підвищення електричного опору спостерігається при введенні 5 % метакаоліну, від маси цементу.

5. Доведено ефективність підвищення стійкості бетону шпал до внутрішньої корозії на технологічному рівні шляхом зменшення температури тепловологої обробки нижче $60 \text{ }^\circ\text{C}$ та зменшення витрати цементу при використанні суперпластифікаторів та алюмосилікатних добавок. Розроблено рецептури модифікованих бетонів зі зменшеною до $400\text{-}380 \text{ кг/м}^3$ витратою цементу, що наближає вміст активних лугів у складі бетону до безпечного рівня з огляду на внутрішню корозію. Показана можливість зменшення температури тепловологої обробки модифікованих бетонів до $40 \text{ }^\circ\text{C}$ при використанні добавок-прискорювачів тверднення.

6. Результати експериментальних досліджень підтверджено в умовах діючих промислових виробництв: в умовах ПрАТ "Гніванський завод спецзалізобетону", ПрАТ "Коростенський завод залізобетонних шпал" та ПрАТ "Староконстантинівський завод залізобетонних шпал" були виготовлені стійкі за результатами випробувань на тріщиностійкість шпали з модифікованих бетонів зі зменшеною до $400\text{-}380 \text{ кг/м}^3$ витратою цементу, що характеризуються кінетикою набору міцності для передачі напруження арматури як і прийнятий на виробництві бетон з витратою цементу 450 кг/м^3 . На 28 добу тверднення міцність запропонованих бетонів досягала проектного класу В40, питомий електричний опір шпал з модифікованих бетонів перевищував опір шпал з бетону контрольного складу.

7. Техніко-економічними розрахунками підтверджено економічну ефективність розроблених складів модифікованих бетонів. Економічна ефективність виготовлення 1 м^3 модифікованого бетону шпал порівняно з існуючим аналогом становить 703,12 грн.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПРАЦЯХ:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Троян В.В. Модифіковані корозійностійкі бетони для залізничних шпал/ Троян В.В., Сова Н.О. //Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. - 2015. - Вип. 57. - С. 413-417.

2. Троян В.В. Модифіковані бетони підвищеної довговічності для транспортних споруд/Троян В.В., Сова Н.О.// Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка.-Київ, 2016, № 57. С. 175 – 179.

3. Троян В.В. Модифіковані бетони для залізничних шпал підвищеної довговічності/ Троян В.В., Сова Н.О., Стеценко О.О. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. - 2016. - Вип. 62. - С. 182-184.

4. Троян В.В. Корозійна стійкість модифікованих бетонів для залізобетонних шпал/Троян В.В., Сова Н.О.// Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка.- Київ, 2017, № 58. С. 164 – 170.

Публікації у наукових фахових виданнях, що включені до наукометричних баз:

5. V.Troyan. Improving the resistance of concrete for sleepers to the formation of delayed and secondary ettringite, the alkali-silica reaction, and electric corrosion/ V.Troyan, N.Sova// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 2019.№6/6 (102).- p.13-19. (*Scopus, Index Copernicus, PIИЦ, World Cat, DRIVER та ін.*).

6. Рунова Р.Ф. Склади бетону з хімічними та мінеральними добавками зі зменшеними витратами цементу для виробництва залізобетонних шпал / Рунова Р.Ф., Троян В.В., Сова Н.О. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. - 2015. - Вип. 155. - С. 73-77.(*Index Copernicus*).

Публікації апробаційного характеру у матеріалах конференцій:

7. Матеріали 5-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», Харків, 23-24 квітня 2015р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, 2015, с.13.

8. Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», Харків, 19-21 квітня 2017р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, 2017, с.33.

Технічні умови:

9. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.6-209:2016. - [Чинний від 2017-01-01]. - Київ, Держспоживстандарт України, 2016. - 37 с. – (Національний стандарт України).

АНОТАЦІЯ

Сова Н.О. Модифіковані корозійностійкі бетони для залізничних шпал.- На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та виробництво. – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.– Київ, 2020.

В дисертаційній роботі теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість отримання стійкого до внутрішньої корозії пластифікованого бетону залізничних шпал шляхом комплексної модифікації органічними та мінеральними добавками, які зв'язуючи іони лужних металів, присутніх в цементі та добавках, сприяють підвищенню температури стабільного існування етtringіту і зменшенню ймовірності виникнення небезпечних процесів його рекристалізації та попередженню виникнення лужної корозії та електрокорозії бетону.

Розроблено склади модифікованих бетонів зі зменшеною до 400-380 кг/м³ витратою цементу, що дозволяє наблизити вміст активних лугів у складі бетону до безпечного з огляду на внутрішню корозію рівня. Використання добавок прискорювачів дозволяє зменшити температуру ТВО модифікованих бетонів до 40 °С, що є безпечною з точки зору стабільного існування етtringіту.

Ключові слова: реакція «луг-кремнієва кислота», пізній етtringіт, вторинний етtringіт, електричний опір, метакаолін, зола виносу, мікрокремнезем, пластифікатор.

АННОТАЦИЯ

Сова Н.А. Модифицированные коррозионностойкие бетоны для железнодорожных шпал. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 - строительные материалы и изделия. - Киевский национальный университет строительства и архитектуры Министерства образования и науки Украины. -Киев, 2020.

В диссертационной работе теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения стойкого к внутренней коррозии пластифицированного бетона железнодорожных шпал путем комплексной модификации органическими и минеральными добавками, которые связывая ионы щелочных металлов, присутствующих в цементе и добавках, способствуют повышению температуры стабильного существования этtringита, уменьшению вероятности возникновения опасных процессов его рекристаллизации и предупреждению возникновения щелочной коррозии и электрокоррозии бетона.

Разработаны составы модифицированных бетонов с уменьшенным до 400-380 кг/м³ расходом цемента, что позволяет приблизить содержание активных щелочей в составе бетона к безопасному с точки зрения внутренней коррозии уровню. Использование добавок ускорителей позволяет уменьшить температуру тепловлажностной обработки модифицированных бетонов до 40 °С.

Ключевые слова: реакция «щелочь-кремниевая кислота», поздний этtringит, вторичный этtringит, электрическое сопротивление, метакаолин, зола уноса, микрокремнезем, пластификатор.

ABSTRACT

Sova N.O. Modified corrosion-resistant concrete for railway sleepers. – On the rights of the manuscript.

The thesis for obtaining the scientific degree Ph.D on the specialty 05.23.05 - building materials and products. - Kyiv National University of Construction and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine. - Kyiv, 2020.

In the thesis experimentally proves the possibility of obtaining railway sleepers that is resistant to internal corrosion by complex modification by organic and mineral admixtures, which by binding the alkaline metal ions contribute to an increase the temperature of stable existence of ettringite, reduce the likelihood of dangerous processes of its recrystallization and prevent the occurrence of alkaline corrosion and electrocorrosion of concrete.

The possibility of blocking the expansion and cracking of concrete after heat moisture treatment by providing conditions for the stable existence of ettringite at increasing temperature due to modification with additives containing active aluminosilicates has been proved. It was found that the addition of metakaolin shifts the balance in the ettringite-monosulfate system towards the formation of ettringite, which reduces the potential number of ettringite recrystallization cycles and the likelihood of late ettringite formation.

The minimum effective dosages of pozzolan with respect to blocking the expansion and cracking of concrete due to alkaline corrosion have been investigated. The same effect was established at the addition of 5 and 10% metakaolin, which confirms the effectiveness of the minimum dosages of pozzolanic additives with respect to the binding of Na^+ and K^+ ions. It was found that the microsilica less effectively eliminates the risk of alkaline corrosion at a content of 5%, and at a content of 10%, the expansion of the samples increases.

The resistance of concrete sleepers to corrosion from leakage currents by the criterion of electrical resistance was investigated. A increase in the electrical resistance of plasticized concrete with a reduction in cement content from 450 to 350 kg/m^3 and a decrease W/C from 0.38 to 0.30 was established. A positive effect on increasing electrical resistance is observed with the introduction of 5% metakaolin.

It has been found that increasing the resistance of concrete sleepers to internal corrosion at the technological level can be achieved by reducing the temperature of heat treatment below 60 °C and reducing the cement content by using superplasticizers and mineral additives and providing required strength of concrete. The use of superplasticizers and metakaolin allows, at the temperature of 40-60 °C, to reduce the content of cement in the concrete up to 350 kg/m^3 , which reduce the content of active alkalis in the composition of concrete to a safe level.

The use of 5% metakaolin at the content of cement 400-380 kg/m^3 causes the need to increase the content of superplasticizers, which leads to a retarding of curing and the need to increase the temperature of heat-treating of concrete to 60 °C.

Reducing the temperature of the heat treatment of plasticized concrete to 40 °C at a content of 400-380 kg/m³ cement and 5% metakaolin is achieved through the use of admixtures-accelerators. Formulations of concrete with reduced cement content 400-380 kg/m³ were proposed for industrial reproduction. The frost resistance the developed formulations of concrete exceeds 200 cycles, a water resistance of more than W12.

In industrial conditions were repeated of compositions of concrete with a reduced to 400-380 kg/m³ cement content and 5% metakaolin, which after 8 hours of heat treatment at temperature of 40 °C provided a compressive strength at the level the production composition of concrete with a content of 450 kg/m³ cement. On the 28th day of hardening, the strength of all concretes exceeded the strength class C40.

Keywords: alkali-silicareaction, delayed ettringite, secondary ettringite, electrical resistance, metakaolin, fly ash, microsilica, plasticizer.