

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ОЛЕВИЧ ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 666.942.32:666.9.035

**НАДШВИДКОТВЕРДНУЧІ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНІ КОМПОЗИЦІЇ ТА
МОДИФІКОВАНІ ВИСОКОМІЦНІ БЕТОНИ НА ЇХ ОСНОВІ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис
Робота виконана в Національному університеті „Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, доцент
Марущак Уляна Дмитрівна,
Національний університет „Львівська політехніка”,
доцент кафедри будівельного виробництва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дудар Ігор Никифорович,
Вінницький національний технічний університет,
МОН України
професор кафедри будівництва, міського
господарства та архітектури;

кандидат технічних наук, доцент
Ластівка Олесь Васильович,
Київський національний університет будівництва та
архітектури, МОН України
доцент кафедри технології будівельних конструкцій
і виробів.

Захист відбудеться “23” грудня 2019 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.17 Національного університету “Львівська політехніка” за
адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, навчальний корпус ІІ, ауд. 212.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету
“Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1) та на сайті
<http://lp.edu.ua/research/disscoun/d-3505217>.

Автореферат розісланий “22” листопада 2019 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.17
к.т.н., доцент



П.Ф. Холод

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У сучасному будівництві дедалі частіше впроваджується збірно-монолітний метод, що дає змогу вирішувати завдання масового конкурентоспроможного житла і передбачає використання максимального обсягу збірних залізобетонних конструкцій, найпоширенішими з яких є багатопустотні плити перекриття. Традиційні технології їх виготовлення, зокрема агрегатно-поточковий, конвейєрний базуються на застосуванні тепло-вологої обробки для прискорення тверднення, що призводить до підвищеної витрати в'язучого і енергоресурсів, погіршення структури цементного каменю. Тому для підвищення ефективності виробництва плит перекриття практичний інтерес представляє впровадження прогресивних економічних технологічних ліній безопалубного формування. Разом з тим, до проблем цієї технології відносять необхідність розпалублення виробів у короткі терміни із забезпеченням передавальної і проектної міцностей високоміцного бетону, що зумовлює потребу регулювання та коректування складів, а також режимів тверднення бетонів для одержання необхідних показників властивостей, якості та економічності. Максимальна оптимізація виробничого процесу залізобетонних попередньо напружених виробів пов'язана з підвищенням їх довговічності і якості, економією енергетичних ресурсів і досягається при переході на малопрогрівні і безпрогрівні технології (Zero energy technology), що забезпечується за рахунок використання модифікованих високоміцних бетонів з швидким наростанням міцності.

Узагальнення результатів досліджень в області одержання швидкотвердучих високоміцних бетонів з регламентованими експлуатаційними властивостями свідчать, що інтенсифікація раннього структуроутворення та формування необхідних показників надійності досягається за рахунок комплексного підходу до модифікування композитів на різних структурних рівнях шляхом розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт «Основи технології створення наномодифікованих надшвидкотверднучих портландцементів та високоміцних дисперсно-армованих композитів з підвищеною ударною в'язкістю на їх основі» (номер держреєстрації 0117U004446, термін виконання – 2017-2018 рр.) та «Лужно-сульфатноактивовані композиційні цементні з високою ранньою міцністю та низькоенергоємні бетони на їх основі» (номер держреєстрації 0119U002253, термін виконання – 2019-2021 рр.) відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України, а також в межах НДР «Розробка та дослідження модифікованих бетонів різного функціонального призначення на основі портландцементів ПАТ «Івано-Франківськцемент» відповідно до договору № 0532 (номер держреєстрації 0116U006710). У зазначених роботах автор був виконавцем.

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій і високоміцних бетонів на їх основі, оптимізація їх складів, дослідження процесів структуроутворення та будівельно-технічних властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити критерії оцінки добавок-модифікаторів для одержання надшвидкотверднучих портландцементних композицій;
- оптимізувати склади надшвидкотверднучих портландцементних композицій з врахуванням внутрішнього джерела теплоти, обумовленого реакціями гідратації цементу;
- встановити закономірності структуроутворення та фізико-хімічні особливості гідратації розроблених композицій у різних температурних умовах;
- встановити раціональні параметри режимів теплової обробки бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій;
- розробити ефективні склади модифікованих високоміцних бетонів для безпропарувальних та малопрогрівних технологій багатопустотних плит перекриття безопалубного формування та дослідити їх будівельно-технічні властивості;
- запроєктувати ефективні склади високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, що працюють при підвищених температурах;
- провести практичну апробацію модифікованих високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій та обґрунтувати їх техніко-економічну ефективність.

Об'єкт дослідження: процеси направленої регулювання раннього структуроутворення надшвидкотверднучих портландцементних композицій та керування властивостями високоміцного бетону на різних структурних рівнях.

Предмет дослідження: надшвидкотверднучі портландцементні композиції і високоміцні бетони на їх основі з покращеними будівельно-технічними та експлуатаційними властивостями для попередньо напружених плит перекриття за низькотемпературними режимами теплової обробки.

Методи досліджень. Виконання експериментальних результатів проведено із застосуванням комплексу сучасних методів фізико-хімічного аналізу, зокрема лазерної гранулометрії, рентгенівської дифрактометрії, растрової електронної мікроскопії та ін. Визначення фізичних, фізико-механічних та будівельно-технічних властивостей надшвидкотверднучих портландцементних композицій і високоміцних бетонів на їх основі проведено згідно з діючими нормативними документами та загальноприйнятими методиками. Оптимізацію складів надшвидкотверднучих портландцементних композицій та модифікованих високоміцних бетонів на їх основі проведено із застосуванням експериментально-статистичних методів планування експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні наукові результати, представлені на захист, полягають в тому, що:

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання надшвидкотверднучих портландцементних композицій та високоміцних бетонів на їх основі з передавальною міцністю не менше 80% від нормативної після низькоізотермічних режимів тепловологої обробки шляхом системного поєднання

суперпластифікатора полікарбоксилатного типу та інноваційного прискорювача тверднення на основі наночастинок гідросилікатів кальцію;

- виявлено особливості направлено керування кінетикою раннього структуроутворення цементного каменю при введенні комплексного модифікатора, які полягають у реалізації механізму гетерогенного зародкоутворення в присутності нанорозмірних гідросилікатів кальцію в обмеженому міжзерновому просторі з прискоренням внутрішнього тепловиділення на 2-3 год, а також створення умов для рівномірного розподілення C-S-H(I) фаз, що забезпечує зростання ранньої міцності цементних систем через 18 год до 38,4 МПа при нормально-вологісних умовах тверднення;

- розкрито закономірності, що покладені в основу мало- та безпрогрівних технологій виготовлення залізобетонних виробів, суть яких полягає у використанні надшвидкотверднучих портландцементних композицій для модифікованих високоміцних бетонів оптимізованої структури, що забезпечує інтенсифікацію тверднення з одержанням необхідної передавальної та проектної міцності, а також підвищених будівельно-технічних властивостей;

- подальший розвиток отримали принципи керування структуроутворенням ефективних високоміцних бетонів класу за міцністю С 60/75 покращеної зносостійкості та стійких до дії підвищених температур до 400 °С на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, що ґрунтуються на багаторівневому модифікуванні їх структури органо-мінеральними добавками, які забезпечують прискорення процесів гідролізу силікатних фаз, направлене формування щільної структури цементного каменю за рахунок зв'язування портландиту в гідросилікати кальцію, визначаючи стабільність цементного каменю при нагріванні.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено ефективні склади модифікованих високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, впровадження яких при вирішенні завдань досягнення необхідної передавальної міцності за низькотемпературних режимів теплової обробки, забезпечить перехід на мало- та безпрогрівні технології попередньо напружених збірних залізобетонних виробів;

- результати дисертаційної роботи використані при розробленні складів високоміцних бетонів для багатопустотних попередньо напружених плит перекриття, виготовлених методом екструзійного безперервного формування, які тверднули в умовах низькоізотермічного прогріву за скороченим режимом, на ДП «Спецзалізобетон»;

- за результатами досліджень розроблено проект технічних умов ТУ У 23.5-02071010-174:2018 «Наномодифіковані надшвидкотверднучі портландцементи». Укладено ліцензійний договір з ТзОВ «Вестбудбетон» на передачу патенту України №121367 на корисну модель;

- здійснено апробацію високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій на ТзОВ «Волинська мостобудівельна компанія» для ремонту мостів з вирішенням завдання одержання необхідних темпів набору ранньої міцності та проектної міцності бетону;

- отримані в дисертаційній роботі теоретичні положення і практичні результати щодо особливостей проектування складів високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій впроваджено в навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисциплін «Енерго- та ресурсощадні технології у будівництві» та «Інноваційні технології виготовлення сучасних будівельних матеріалів і виробів» для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні експериментальних досліджень, обробленні одержаних даних, впровадженні результатів роботи у виробництво. Особистий внесок автора у публікаціях відображено у списку опублікованих праць. Постановка завдання та формулювання основних положень та висновків проводились під керівництвом наукового керівника д.т.н., доц. Марущак У.Д. та при науковому консультуванні д.т.н., проф. Саницького М.А.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції “Ефективні технологічні рішення в будівництві з використанням бетонів нового покоління” (Харків, 2015); Міжнародній науково-технічній конференції “Еко-комфорт” (Львів, 2016); XIII Міжнародній науково-практичній конференції “Budownictwo o zoptymalizowanym potenciale energetycznym” (Ченстохова, Польща, 2016); VI Міжнародній конференції “Геодезія, архітектура та будівництво 2016” (GAC-2016) (Львів, 2016); 6-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті” (Харків, 2017); VI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій” (Тернопіль, 2017); Міжнародній конференції “Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій” (Одеса, 2018); Міжнародній науково-практичній конференції “Наноматеріали і нанотехнології у виробництві будівельних матеріалів” (Київ, 2018); 20 Internationale Baustofftagung (Веймар, Німеччина, 2018) та на конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету “Львівська політехніка” 2015-2019 рр.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, з яких 3 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз (Scopus, Index Copernicus, Baz Tech), 8 – у матеріалах і тезах конференцій, 1 патент.

Структура та обсяг роботи. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 128 сторінках друкованого тексту і складається із анотації, вступу, п’яти розділів та загальних висновків. Повний обсяг дисертації становить 186 сторінок і включає 32 таблиці, 54 рисунки, список використаних джерел із 165 найменувань на 17 сторінках та 5 додатків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, зазначено найбільш важливі положення, що отримані автором і мають наукову новизну та практичну цінність.

У першому розділі зроблено аналітичний огляд літературних джерел, присвячених проблемам удосконалення технології збірних залізобетонних виробів, зокрема багатопустотних плит безопалубного формування, отримання високоміцних бетонів з покращеними експлуатаційними характеристиками для мало- та безпрогрівних технологій, розглянуто питання, пов'язані з принципами модифікування портландцементів на мікро- та наноструктурному рівнях, а також визначено теоретичні передумови досліджень.

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що проблеми технології збірних залізобетонних виробів пов'язані з підвищеною витратою портландцементу та енергоресурсів для забезпечення розпалублення виробів у короткі терміни із досягненням необхідної розпалубної, передавальної та проектної міцностей. Теоретична витрата пари на теплову обробку залізобетонних виробів при ізотермічній витримці за температури 80-90 °С становить 220-250 кг/м³, з врахуванням невикористаних витрат пари може досягати 1 т/м³. Перспективним напрямком зниження потреби в первинних паливно-енергетичних ресурсах при тепловій обробці бетону є застосування відновних джерел енергії, зокрема сонячної (І.Н. Дудар, М.І. Підгорнов, В.П. Сопов, В.В. Шульгін). Разом з тим, цей напрям потребує розроблення ефективних геліосистем та використання традиційного палива в холодний період, крім того зміни температурно-вологісних градієнтів при високотемпературних режимах прискореного тверднення обумовлюють значні коливання в фазовому складі та структурі цементного каменю, знижуючи характеристики міцності, стійкості та довговічності. Значною мірою вирішення даних проблем досягається при переході на малопрогрівні і безпрогрівні технології (Zero energy technology) збірного залізобетону, що забезпечується за рахунок використання швидкотверднучих високоміцних бетонів (Ю.М. Баженов, J. Martí, В. Min), модифікування бетонів комплексними органо-мінеральними добавками (К.К. Пушкарьова), врахування теплоти гідратації портландцементу (О.В. Ущеров-Маршак). У технології будівельного виробництва одержання високоміцних бетонів з швидким наростанням міцності ґрунтується на застосуванні спеціальних цементів, добавок-прискорювачів тверднення, механоактивації цементу, забезпеченні щільної упаковки компонентів (В.Г. Батраков, І.В. Барабаш, В.М. Вировой, В.І. Гоц, Л.Й. Дворкін, І.Н. Дудар, Т.В. Кузнецова, П.В. Кривенко, А.А. Пługін, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницький, Х.С. Соболев, М.В. Шпирько, J. Malolepszy, J. Stark та ін.). Разом з тим, використання спеціальних цементів, зокрема лужних, безгіпсових, галогенвмісних, глиноземного, спричиняє зростання собівартості бетонів та обмежує широке впровадження при виготовленні швидкотверднучих бетонів.

Досягнення високої міцності бетону у нормальних умовах тверднення на портландцементних загальнобудівельного призначення стало можливим за рахунок

модифікування ефективними суперпластифікаторами, що дозволяють значно зменшити водоцементне відношення і величину капілярної пористості цементного каменю. Разом з тим, блокуюча дія суперпластифікаторів на ранній стадії гідратації портландцементу зумовлює сповільнення набору ранньої міцності бетону (J. Plank).

Перспективним методом регулювання процесами прискореного тверднення цементуючої матриці із забезпеченням високих експлуатаційних властивостей бетону є модифікування їх структури шляхом введення в цементну композицію нанорозмірних частинок нанокремнезему, вуглецевих нанотрубок та ін. (В.М. Дерев'янка, Н.В. Кондратьєва, К.К. Пушкарьова, М.В. Суханевич, С.М. Толмачов, Л.О. Шейніч, В.І. Калашніков, О.А. Кучеренко, Л. Чарнецкий, E. John, D. Stephan та ін.). Разом з тим, швидкість тверднення портландцементів значною мірою залежить від рівномірності розподілення наноелементів та їх спорідненості з продуктами гідратації. При цьому в літературі недостатньо висвітлено вплив даних наномодифікаторів на властивості бетонів, що піддаються тепловологій обробці.

Аналіз відомих закономірностей формування структури будівельних матеріалів у різних температурних умовах дозволяє висунути гіпотезу про можливість розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій та високоміцних бетонів з регламентованими будівельно-технічними властивостями на їх основі для мало- та безпрогрівних технологій збірного залізобетону за рахунок комплексного модифікування цементуючої матриці полікарбонатними суперпластифікаторами та нанорозмірними затравками, що містять гідросилікати кальцію.

У заключній частині огляду літератури сформульовано мету дисертаційної роботи, визначені завдання, які необхідно вирішити в ході її виконання.

У **другому розділі** наведено характеристики вихідних матеріалів, описані основні методики досліджень, використані в роботі.

При проведенні експериментальних досліджень застосовано портландцементи загальнобудівельного призначення ПЦ І-500 Р-Н, ПЦ ІІ-А/Ш-500 ПрАТ „Івано-Франківськцемент”. Для розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій застосовано висоководоредуруючу/суперпластифікуючу добавку на основі ефіру полікарбонату з нанопроєктованими ланцюгами (Master Glenium ACE 430 – PCE), а також інноваційний прискорювач тверднення Master X-SEED 100 згідно з концепцією Crystal Speed Hardening, що є суспензією колоїдних частинок гідросилікатів кальцію С-S-H. Як дрібнодисперсні мінеральні компоненти надшвидкотверднучих портландцементних композицій, що працюють в умовах підвищених температур, використано мінеральні добавки – золу-винесення Бурштинської ТЕС, метаколін ТзОВ „Мета Д”, мікрокремнезем (Elkem Microsilica Grade 940-U).

Для виготовлення високоміцних бетонів використовували природні кварцові піски Жовківського, Миколаївського родовищ Львівської та Рогатинського і родовища Побережжя Івано-Франківської області, пісок з відсіву подрібнення фракції 2-5 мм ($M_{кр}=4,97$), крупний заповнювач – гранітний щебінь Віровського та Клесівського родовищ фракції 10-20 та 5-20 мм. Зразки тверднули в нормальних умовах (температура 20 ± 3 °С, відносна вологість $95\pm 5\%$), а також в умовах

низькотемпературної теплової обробки в універсальній пропарювальній камері КПУ-1. Після виготовлення зразки пропарювали за режимом 1+8+1 год. Температура ізотермічного прогріву складала 40 та 60 °С. Розроблені дрібнозернисті бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій випробовували при дії підвищених температур 200, 400 та 600 °С через 1 та 7 діб тверднення згідно з ДСТУ Б.В.2.7-249:2011.

Дослідження фракційного складу і тонины розмелювання портландцементів та мінеральних добавок проводили ситовим аналізом та визначенням питомої поверхні на поверхнемірі ПМЦ-500, розподілення частинок за розмірами – за допомогою лазерних аналізаторів зернистості Mastersizer 3000 та Cilas 990 Liquid з програмним комплексом Size Expert Software. Фізико-механічні властивості та будівельно-технічні характеристики розроблених надшвидкотверднучих портландцементних композицій та високоміцних бетонів на їх основі визначали згідно з діючими стандартами та загальноприйнятими методиками. Оптимізацію рецептурних та технологічних параметрів надшвидкотверднучих портландцементних композицій проводили за допомогою методів експериментально-статистичного моделювання з використанням дисоціативно-крокового методу оптимізації.

Вивчення фазового складу продуктів гідратації надшвидкотверднучих портландцементних композицій проводили за допомогою комплексу фізико-хімічних методів аналізу: рентгенофазового, диференційно-термічного та ін. Хімічні склади портландцементів та мінеральних добавок визначали рентгеноспектрометром ARL 9800 XP. Для дослідження морфології поверхні каменю на основі цементних композицій та високоміцних бетонів використано растровий електронний мікроскоп PEM-106И.

У третьому розділі наведено результати розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій, визначення їх фізико-механічних властивостей, дослідження особливостей структуроутворення.

Для розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій проведено комплексну оцінку модифікуючих добавок за критеріями водоредукуючого та прискорюючого ефектів. Модифікування портландцементу ПЦ І-500Р-Н полікарбоксилатним суперпластифікаром дозволяє знизити водопотребу на 32,6% при досягненні однакової консистенції, тоді як при введенні добавки на основі ЛСТ – на 6,3%. Введення добавок пластифікуючої групи сповільнює набір ранньої міцності портландцементів до 8 год. Синтетичні наночастинки С-S-H сприяють однорідному зародкоутворенню в поровому просторі, що призводить до швидкого формування структури та набору міцності. Так, через 8 год міцність каменю, модифікованого добавкою X-SEED, у 2,2 рази перевищує міцність каменю без добавок. Через 24 год тверднення показник питомої міцності наномодифікованого каменю (R_{c1}/R_{c28}) становить 0,57; а через 2 доби (R_{c2}/R_{c28}) – 0,85. При використанні комплексного модифікатора PCE+X-SEED портландцементна композиція характеризується показником питомої міцності через 2 доби $R_{c2}/R_{c28} = 0,90$. Значення показників ефективності добавок міцнісного K_c і комплексного K_e , що враховує водоредукуючу дію та приріст міцності в ранньому віці, представлені на рис. 1. Коефіцієнт ефективності K_e характеризується

найбільшими значеннями для зразків з комплексною добавкою PCE+X-SEED, що вказує на визначальний вплив цієї добавки на реологічні та міцнісні властивості цементних композицій ($K_{e12}=2,59$ та $K_{e24}=3,62$).

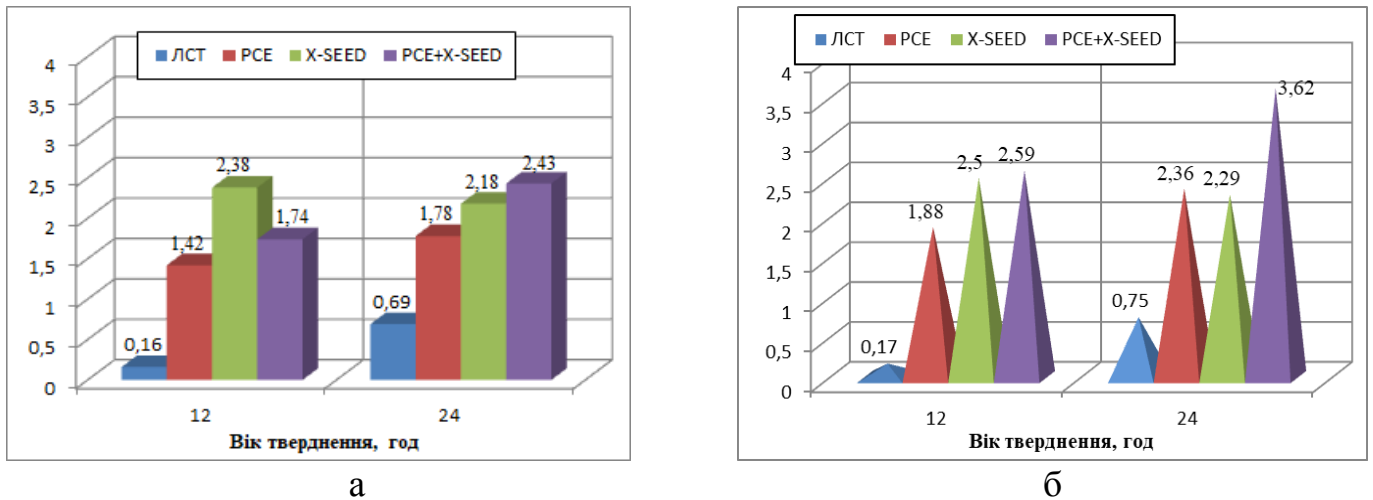
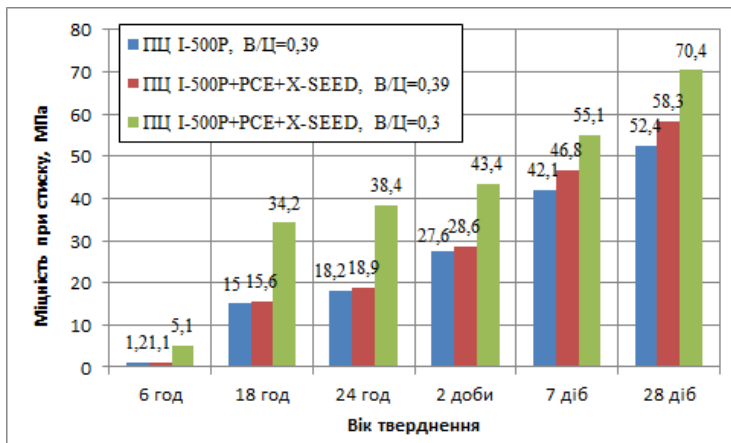


Рисунок 1 – Коефіцієнти ефективності добавок: міцнісний K_c (а) та комплексний K_e (б)

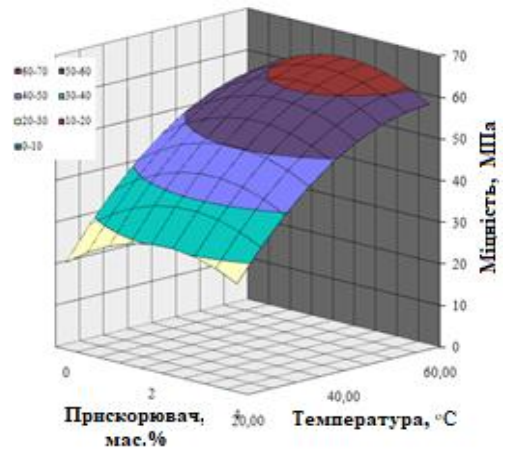
При проектуванні надшвидкотверднучих портландцементних композицій для низькотемпературних технологій прискорення тверднення бетону необхідно враховувати вплив модифікаторів на внутрішнє тепловиділення портландцементу. Калориметричними дослідженнями портландцементу ПЦ І-500Р-Н встановлено, що перший екзоефект досягається через 6 хв і становить 11,6 мВт/г. Другий екзоефект 4,8 мВт/г спостерігається через 9,2 год. Повнота тепловиділення через 24 год досягає значення 229 Дж/г, через 48 год – 294 Дж/г. Аналіз термодинамічних кривих портландцементних систем з полікарбоксилатним суперпластифікатором свідчить про відтягування досягнення температурного максимуму на 1,75 год порівняно з бездобавочним портландцементом, що спричинене адсорбцією пластифікатора на зернах в'язучого. Введення модифікатора на основі нанорозмірних частинок С-S-Н зумовлює прискорення гідратаційних процесів, що виявляється у зміщенні температурного максимуму до 6,2 год за рахунок реалізації ефекту нуклеації з швидшим формуванням наномасштабних гідросилікатів С-S-Н(І). Температурний максимум цементуючої композиції, модифікованої комплексною добавкою PCE+X-SEED, досягається через 7 год, що свідчить про прискорення гідратаційних процесів у нормальних умовах.

За результатами стандартних випробувань портландцементної композиції «ПЦ І-500Р-Н–PCE–X-SEED» при В/Ц=0,39 (ДСТУ Б В.2.7-187:2009) встановлено, що із забезпеченням пластифікуючого ефекту ($\Delta PK=41\%$) рання міцність до однієї доби зростає в 1,6-2,2 рази порівняно з ПЦ І-500Р-Н, а стандартна міцність становить $R_{c28}=58,3$ МПа. За рахунок водоредукуючого ефекту міцність через 28 діб для «ПЦ І-500Р-Н–PCE–X-SEED» досягає показника 70,4 МПа. Розроблена портландцементна композиція характеризується високими темпами набору ранньої міцності ($R_{c1}/R_{c28}=54,5\%$; $R_{c2}/R_{c28}=61,6\%$), а за показниками стандартної міцності

відноситься до надшвидкотверднучих та високоміцних згідно ДСТУ Б В.2.7-281:2011.



а



б

Рисунок 2 – Міцність на стиск надшвидкотверднучих композицій в нормальних умовах (а) та ізопараметрична поверхня міцності на стиск (б) дрібнозернистих бетонів на основі надшвидкотверднучих композицій

Для визначення ефективності дії добавок різної природи та використання надшвидкотверднучої композиції в умовах теплової обробки за низькотемпературними режимами вивчено їх вплив на міцнісні показники дрібнозернистих бетонів. Міцність дрібнозернистого бетону на основі ПЦ I-500P-Н після обробки при введенні добавки ЛСТ (0,7 мас.%) підвищується на 11,4-26,3% порівняно з контрольним складом. У той же час, використання 0,8 мас.% PCE забезпечує зростання міцності дрібнозернистого бетону на 68,3% при $T_{із.} = 20^{\circ}\text{C}$ і на 32,5% при $t_{із.} = 60^{\circ}\text{C}$. Дрібнозернистий бетон на основі надшвидкотверднучої композиції ПЦ I-500P-Н-PCE-X-SEED характеризується зростанням міцності в 2,5 рази порівняно з контрольним складом при $t_{із.} = 20^{\circ}\text{C}$, в 1,73 і 1,5 рази при $t_{із.} = 40^{\circ}\text{C}$ та $t_{із.} = 60^{\circ}\text{C}$ відповідно.

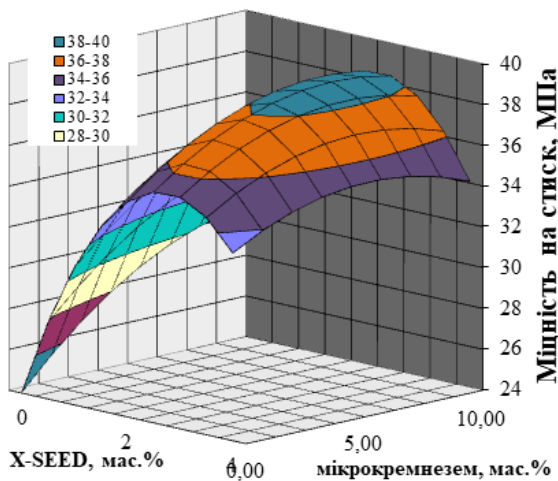
Одержано експериментально-статистичні моделі показників міцності портландцементних композицій на основі ПЦ I-500P-Н (Ц:П=1:2) залежно від рецептурно-технологічних параметрів: кількості прискорювача тверднення X-SEED ($X_1 = 0; 2,0; 4,0$ мас.%) та температури ізотермічного витримування ($X_2 = 20; 40; 60^{\circ}\text{C}$) при стабілізації кількості полікарбоксилатного суперпластифікатора на рівні 0,8 мас.% (рис. 2, б). Аналізом впливу даної факторної моделі на міцність після теплової обробки та через 28 діб дрібнозернистого бетону на основі поліноміальних регресійних рівнянь і експериментально-статистичних моделей дрібнозернистих бетонів встановлено, що введення максимальної кількості прискорювача тверднення та витримування при температурі 60°C призводить до зниження границі міцності на стиск після теплової обробки та через 28 діб.

В результаті проведених випробувань та за графічними залежностями визначено оптимальну кількість добавки-прискорювача, що відповідає основному рівню варіювання, у складі надшвидкотверднучої композиції, яка піддається дії

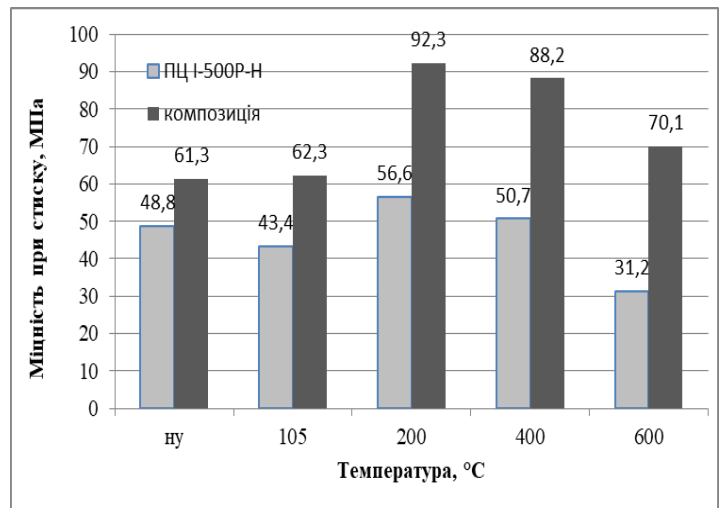
теплого впливу за низькотемпературним режимом (температура ізотермічного витримування становить 40 °С).

При дослідженні особливостей гідратації модифікованих портландцементів, які піддавали тепловій обробці за низькотемпературним режимом (температура ізотермічного прогріву складала 40 °С), встановлено, що з підвищенням температури інтенсифікуються процеси гідратації портландцементу. Ступінь гідратації портландцементу ПЦ І-500Р-Н після теплової обробки зростає в 1,39 рази порівняно з портландцементом, що тверднув 1 добу в нормальних умовах. Ступінь гідратації надшвидкотверднучої цементної композиції зростає в 1,49 рази. У присутності комплексного модифікатора PCE+X-SEED знижується інтенсивність ліній портландиту, що свідчить про утворення рентгеноаморфних гідросилікатів кальцію із зростанням кількості контактів та підвищенням міцності модифікованої цементуючої матриці.

Розроблено надшвидкотверднучі портландцементні композиції, які містять полікарбоксилатний суперпластифікатор, мікрокремнезем, колоїдні частинки гідросилікатів кальцію, для бетонів, що піддаються дії підвищених температур. Для оптимізації їх складу проведено математичне планування експерименту з використанням матричного підходу до регресивного аналізу і знаходження коефіцієнтів рівнянь регресії. На основі експериментальних даних у заданому інтервалі зміни кількісного співвідношення компонентів мікрокремнезему (0; 5,0; 10,0 мас.%) і колоїдних частинок С-S-Н (0; 2,0; 4,0 мас.%) одержані регресійні рівняння міцності цементного каменю та математичні моделі міцності (рис. 3, а).



а



б

Рисунок 3 – Ізопараметрична поверхня міцності на стиск через 1 добу надшвидкотверднучих композицій (Ц:П=1:2) (а) та міцність портландцементної композиції при різних температурах (б)

Показано, що міцність через 2 доби тверднення в нормальних умовах для каменю на основі ПЦ І-500Р-Н становить 48,8 МПа, у той час, як міцність модифікованого каменю зростає до 61,3 МПа (технічний ефект становить $R_{c2}=25,6\%$). Після сушіння та нагрівання до 200 °С міцність модифікованого

цементного каменю підвищується до 92,3 МПа за рахунок ефекту самозапарювання. Після 600 °С міцність каменю на основі цементної композиції знижується на 24 % порівняно з міцністю після 200 °С, у той час як міцність бездобавочного каменю знижується на 45 % (рис. 3, б).

На основі результатів рентгенофазового аналізу показано, що інтенсифікація тверднення та зростання міцності портландцементної композиції у нормальних умовах відбувається за рахунок прискорення процесів гідратації та пуцоланізації модифікованої цементної матриці, про що свідчить зниження інтенсивності ліній C_3S та $Ca(OH)_2$. Після нагрівання до температури 200°C міцність каменю на основі портландцементу ПЦ І-500Р-Н без добавок зростає за рахунок прискорення процесів гідратації при підвищеній температурі з утворенням портландиту. У той же, час міцність каменю на основі портландцементної композиції з органо-мінеральними компонентами зростає за рахунок інтенсивного проходження пуцоланової реакції, в результаті цього інтенсивність ліній C_3S та $Ca(OH)_2$ зменшується порівняно з модифікованим каменем, що тверднув у нормальних умовах. Гелеподібні продукти гідратації ущільнюють міжзерновий простір, що зумовлює зростання міцності каменю.

Комплекс проведених досліджень дозволив обґрунтувати доцільність комплексного модифікування ультра- та нанодисперсними мінеральними компонентами та полікарбоксилатними суперпластифікаторами нової генерації для направленої формування фазового складу та мікроструктури каменю портландцементних композицій з високою ранньою та стандартною міцностями.

Четвертий розділ присвячено розробленню високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, проектуванню їх складів та вивченню будівельно-технічних властивостей.

Для виготовлення бетонів круглопустотних плит перекриття безопалубним методом, найважливішими критеріями для яких є забезпечення необхідної жорсткості бетонної суміші та швидкий набір міцності бетону, здійснено підбір гранулометричного складу заповнювачів відповідно до нормативних кривих розподілу частинок згідно з ДСТУ Б В.2.7-299:2013. З використанням оптимізованого складу заповнювачів на основі результатів математичного планування експерименту одержано регресійні рівняння міцності високоміцних бетонів після теплової обробки з температурою ізотермічної витримки 40 °С, а також через 28 діб залежно від кількості полікарбоксилатного суперпластифікатора та витрати портландцементу:

$$f_{cm\text{тво}}=65,889+2,917X_1 + 3,65X_2-8,483X_2^2+4,375X_1X_2$$

$$f_{cm28}=86,711+1,60X_1 + 2,40X_2-1,267X_1^2-7,167X_2^2$$

Для визначення ефективності використання надшвидкотверднучих портландцементних композицій запроєктовано важкі бетони марки за легковкладальністю бетонної суміші Ж2 класу за міцністю С 30/35 на їх основі номінального складу 1:2,08:3,24 (витрата в'язучого 370 кг/м³). Результати випробувань бетонів у нормальних умовах тверднення показали, що міцнісні показники композитів на основі надшвидкотверднучої композиції «ПЦ І-500Р-Н-РСЕ-Х-SEED» у ранні терміни (через 1 добу) є вищими на 42,6 та

14,5% порівняно з бетоном, модифікованим монодобавками ЛСТ та PCE відповідно. Слід відзначити, що значення міцності бетонів на основі надшвидкотверднучих композицій через 1 добу ($f_{cm1}=37,1-42,2$ МПа) відповідають передавальній міцності для класу С 30/35, у той час як при модифікуванні добавкою ЛСТ цей показник не досягається. Через 28 діб тверднення значення міцності відповідають показникам для класів С35/45 для бетону, модифікованого добавкою ЛСТ, та С50/60 для бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій. Показники питомої міцності для бетонів, модифікованих пластифікуючими монодобавками, становлять $f_{cm1}/f_{cm28}=0,43-0,47$; у той час як бетону на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції ПЦ I-500P-H-PCE-X-SEED – $f_{cm1}/f_{cm28}=0,51$, що відповідає вимогам для швидкотверднучих бетонів.

Як видно з рис. 4, найвищою міцністю після теплової обробки за режимом 1+8+1 год з температурою ізотермічного прогріву 40 °С характеризується бетон на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції – 48,5 МПа, що становить 107,8% від проектної міцності. У той час, як міцність бетону, модифікованого добавкою ЛСТ, після теплової обробки становить 36,4 МПа, що відповідає 80,8% проектної і забезпечує нормовані показники передавальної міцності.

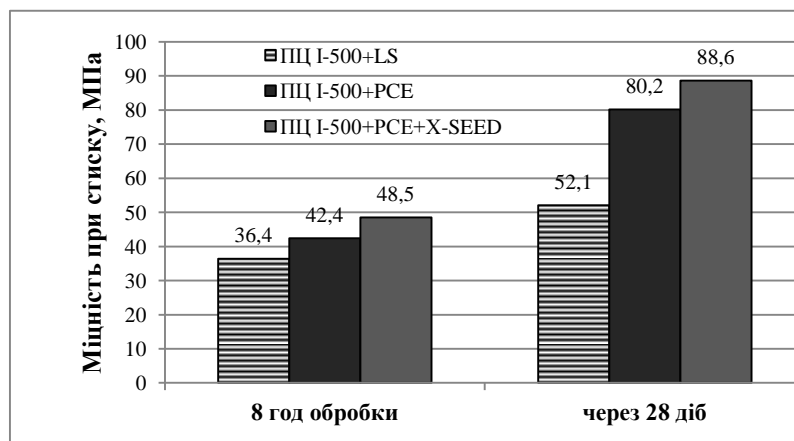


Рисунок 4 – Міцність бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементів після теплової обробки

Будівельно-технічні властивості високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій та модифікованого добавкою на основі ЛСТ наведено в табл. 1. Звідси видно, що за показниками ранньої та проектної міцності розроблені бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій відносяться до високоміцних з швидким наростанням міцності. Розроблені бетони характеризуються середньою густиною 2420-2430 кг/м³, водопоглинанням за масою 1,1 мас.%, підвищеними значеннями водонепроникності (W20) та корозійної стійкості ($KC_6=1,1$). Дослідженнями деформативних властивостей високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих композицій встановлено, що їх модуль пружності складає 52,6 ГПа, а коефіцієнт Пуассона – 0,19. Деформації усадки швидкотверднучих високоміцних бетонів у повітряно-сухих умовах зберігання становлять 0,12 мм/м.

Будівельно-технічні властивості високоміцних бетонів

Показник	Одиниці вимірювання	Значення показника для високоміцного бетону	
		модифікованого ЛСТ	на основі надшвидкотверднучої композиції
Показник конструктивності бетонної суміші (витрата портландцементу), Ц	кг/м ³	370	370
Марка суміші за легкоукладальністю		Ж2	Ж2
Середня густина бетонної суміші, $\rho_{\text{сер}}$	кг/м ³	2400	2430
Пористість бетону, П	%	7,7	6,5
Міцність на стиск, f_{cm} , через, діб	МПа		
1		31,0	42,2
2		42,8	62,6
7		56,4	73,2
28	61,4	83,0	
Клас за міцністю		C35/45	C50/60
Оцінка питомої міцності, $f_{\text{cm1}}/f_{\text{cm28}}$		0,43	0,51
$f_{\text{cm2}}/f_{\text{cm28}}$		0,60	0,75
Міцність на стиск, f_{cm} , після ТВО ($T_{\text{із}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)	МПа	36,4	48,5
Призмova міцність, $f_{\text{ck, prism}}$	МПа	56,1	76,5
Модуль пружності, E_{cm}	ГПа	46,8	52,6
Коефіцієнт Пуассона, ν		0,18	0,19
Усадка бетону, ε_y	мм/м	0,18	0,12
Коефіцієнт інтенсивності напружень, K_c^*	МПа·м ^{0,5}	0,71	1,36
Водопоглинання за масою, W_m	%	3,20	1,10
Капілярне підсмоктування – індекс сорбції, SI	мм/год ^{0,5}	0,12	0,07
Марка за водонепроникністю		W 18	W 20
Корозійна стійкість, K_c		1,0	1,1
Коефіцієнт конструктивної якості, ККЯ	МПа	29,4	34,2
Питома витрата портландцементу на одиницю проектної міцності	кг/МПа	6,02	4,46

Закономірності поширення тріщин в бетонах під навантаженням вивчені методами механіки руйнувань за рівнем критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_c^* при нерівноважних випробуваннях до дефрагментації зразків через 28 діб тверднення в нормальних умовах. При цьому встановлено, що дрібнозернисті

бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій характеризуються підвищенням коефіцієнта інтенсивності в 1,9 рази ($K_c^* = 1,36 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$) порівняно з бетоном на основі ПЦ I-500P-H ($K_c^* = 0,71 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$).

Запроектовано бетони номінального складу 1:2,08:3,24 ($\rho = 370 \text{ кг/м}^3$) маркою за легковкладальністю бетонної суміші Ж2 на основі надшвидкотверднучих композицій з використанням портландцементів ПЦ I-500P-H, ПЦ II/A-B-500 та ПЦ II/A-П-500. При використанні портландцементу ПЦ II/A-B-500 водопотреба суміші знижується на 4,5%. Використання портландцементів з мінеральними добавками у складі надшвидкотверднучих портландцементних композицій характеризуються інтенсивним темпом набору ранньої міцності $f_{\text{cm16год}}/f_{\text{cm28}} = 0,33-0,35$ та $f_{\text{cm24 год}}/f_{\text{cm28}} = 0,44-0,50$ з досягненням проектної міцності 84,8 МПа (C50/60), що відповідає вимогам щодо швидкотверднучих високоміцних бетонів.

Дослідженнями мікроструктури контактної зони «дрібний заповнювач-модифікована цементна матриця» (рис. 5, а) та модифікованої цементної матриці (рис. 5, б) високоміцного бетону на основі ПЦ II/A-B-500 через 1 добу тверднення показано формування однорідної дрібнокристалічної структури, що не обмежує набір міцності в подальші терміни тверднення. Згідно з даними мікрозондового аналізу, основними гідратними фазами цементного каменю у початковий період є гідросилікати кальцію C-S-H, які ущільнюють контактну зону та омонолічують структуру високоміцного бетону, що забезпечує зростання його міцності.

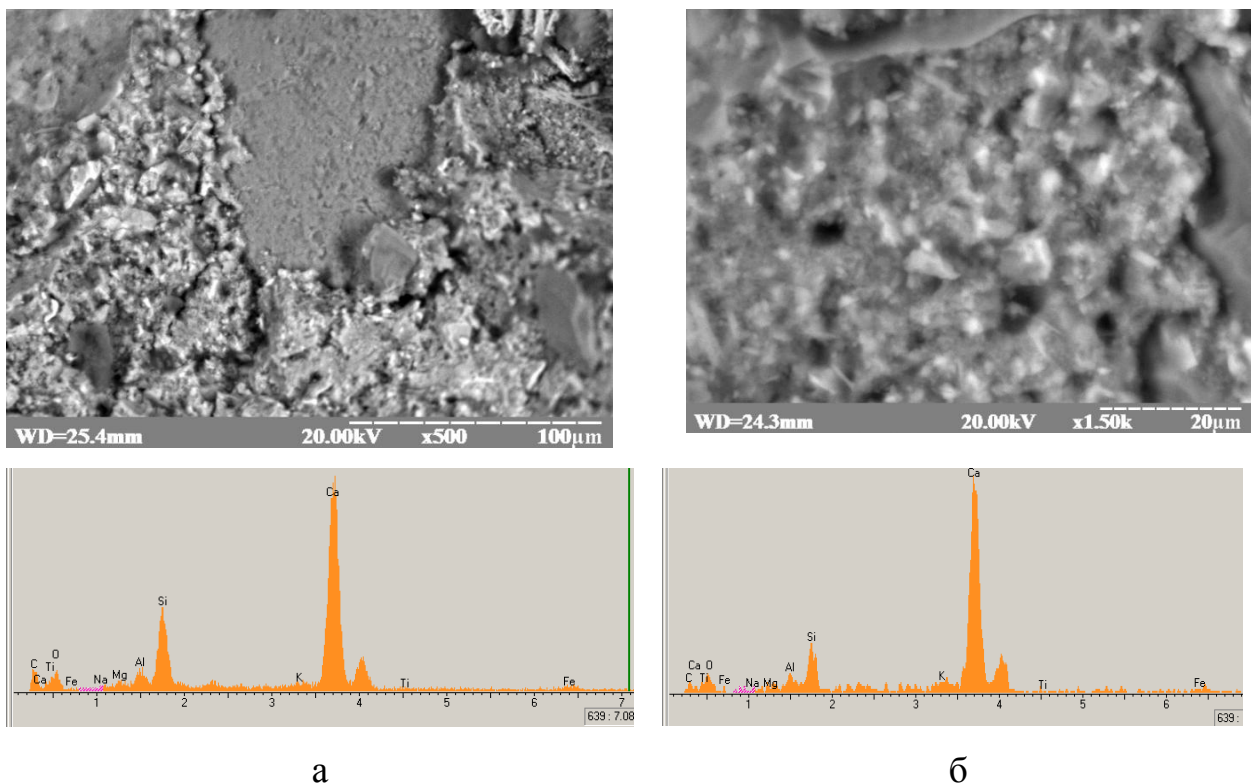


Рисунок 5 – Мікроструктура і мікрозондовий аналіз контактної зони (а) та модифікованої цементуючої матриці (б) високоміцного бетону

Дрібнозернисті бетони на основі наномодифікованих надшвидкотверднучих портландцементних композицій «ПЦ I-500P-H – мікрокремнезем – PCE – X-SEED»

характеризуються міцністю на стиск через 28 діб 110,8 МПа, що відповідає класу міцності С 70/85 з швидким наростанням ранньої міцності в нормальних умовах тверднення ($f_{cm1}/f_{cm28} = 0,31-0,32$; $f_{cm2}/f_{cm28} = 0,55-0,56$). Міцність бетону контрольного складу, який піддавали впливу підвищених температур через 1 добу тверднення в нормальних умовах, після сушіння ($t=105\pm 5$ °С) зростає на 60,9% і на 77,6% при витримуванні за температури 200 °С. Після витримування при температурі 600 °С міцність бетону знижується на 25% порівняно з міцністю при температурі 400 °С. Міцність на стиск бетонів на основі надшвидкотверднучих композицій, які через 7 діб тверднення в нормальних умовах піддавали дії високих температур до 400 °С, становить 107,4 МПа.

Результати випробувань бетонів, що тверднули 1 добу в нормальних умовах, після сушіння вказують на зростання міцності на згин на 41,1% для бетону контрольного складу та на 42,3-61,1% для наномодифікованих бетонів. Високоміцні бетони після підвищення температури до 400 °С характеризуються водопоглинанням 6,7-7,3%, деформаціями усадки – 0,82-0,89 мм/м. Експериментальні дані випробувань на стиранисть (0,05-0,08 г/см²) свідчать про високу стійкість розроблених високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих композицій до абразивної дії.

У п'ятому розділі представлено результати промислового впровадження високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій.

Промисловий випуск бетонів класу міцності С30/35 з використанням надшвидкотверднучих портландцементних композицій для виготовлення пустотілих плит перекриття ПБ 60-15.22.8 методом безопалубного формування на стендах технологічної лінії італійської фірми "Nordimpianti" здійснено на ДП «Спецзалізобетон» (м. Івано-Франківськ). При цьому вирішено завдання забезпечення необхідних відпускної та проектної міцностей бетонів при низькотемпературних режимах теплової обробки та скороченні часу витримування. Ефективність впровадження бетонів на основі наномодифікованих надшвидкотверднучих портландцементних композицій з врахуванням зниження витрати енергоресурсів, прискорення оборотності технологічних ліній становить 85 грн на 1 м³ бетону. При загальному обсязі випуску бетону 280 м³ реальний економічний ефект становить 23,8 тис. грн. Високоміцний бетон на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій використано для ремонту мостів на автодорозі Львів–Пустомити–Меденичі км 17+200 до км 28+200 (ТзОВ «Волинська мостобудівельна компанія»).

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено наукове завдання із розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій та високоміцних бетонів на їх основі. Внаслідок проведених теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано наступне:

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання надшвидкотверднучих портландцементних композицій та високоміцних бетонів на їх основі для мало- та безпрогрівних технологій збірного залізобетону шляхом модифікування органо-мінеральними добавками, що містять полікарбосилатні суперпластифікатори та нанодисперсні частинки гідросилікатів кальцію, які за рахунок високого водоредукуючого ефекту полікарбосилатів та реалізації механізму гетерогенного зародкоутворення визначають направлене гідратоутворення та інтенсифікацію процесів гідратації у ранній період тверднення, що зумовлює швидке формування структури цементного каменю.

2. Проведено комплексну оцінку впливу пластифікуючих добавок та прискорювача на основі синтетичних гідросилікатів на реологічні, міцнісні та термодинамічні показники портландцементу. Встановлено блокуючу дію добавок пластифікуючої групи на кінетику тепловиділення та набір ранньої міцності портландцементів до 8-12 год. Введення модифікатора на основі нанорозмірних частинок C-S-H зумовлює прискорення гідратаційних процесів, що виявляється у зміщенні температурного максимуму до 6,2 год за рахунок реалізації ефекту нуклеації з швидшим формуванням наномасштабних гідросилікатів C-S-H(I).

3. Показано ефективність використання комплексної добавки пластифікуюче-прискорювальної дії для інтенсифікації набору ранньої міцності в нормальних умовах тверднення. Високий водоредукуючий ефект комплексного модифікатора ($\Delta B/C=23\%$) забезпечує початкову щільність системи, а при підвищених температурах зниження деформацій, пов'язаних з температурним розширенням рідкої фази. Прискорювач тверднення нівелює блокуючу дію пластифікатора, прискорює гідратаційні процеси зі зміщенням максимуму тепловиділення на 2-3 год.

4. Розроблено надшвидкотверднучі портландцементні композиції „ПЦ I-500P-H – суперпластифікатор PCE – наночастинки C-S-H” з високою ранньою $R_{c1}=18,9$ МПа та стандартною ($R_{c28} = 58,3$ МПа) міцністю з високорухливих сумішей ($PK=155$ мм) згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009. За рахунок суттєвого водоредукуючого ефекту ($\Delta B/C=23\%$) міцність такої наномодифікованої портландцементної композиції через 24 год зростає до 38,4 МПа (технічний ефект $\Delta R_{c1}=103,1\%$), а через 28 діб тверднення – до 70,4 МПа. При цьому наномодифікована композиція характеризується значним підвищенням ранньої міцності через 1 добу – $R_{c1}/R_{c28} = 54,5\%$ та через 2 доби – $R_{c2}/R_{c28} = 61,6\%$; за цими показниками вони відносяться до надшвидкотверднучих і високоміцних.

5. Методом математичного планування експерименту здійснено моделювання технологічних параметрів при отриманні високоміцних бетонів для збірних залізобетонних виробів – температура ізотермічного витримування ($X_1 = 20, 40, 60$ °C) та кількість прискорювача в складі модифікованих бетонів ($X_2 = 0; 2,0; 4,0$ мас.%). На основі аналізу результатів математичного планування встановлено оптимальну температуру прогріву – 40 °C при витраті прискорювача тверднення 2,0 мас.%. Коефіцієнт ефективності використання надшвидкотверднучої портландцементної композиції становить при 20 °C – $K=2,51$, при 40 °C – $K=1,73$; при 60 °C – $K=1,52$.

6. Досліджено будівельно-технічні властивості бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій в нормальних умовах та після теплової обробки за низькотемпературним режимом, що визначає їх довговічність. Встановлено, що показник питомої міцності в нормальних умовах $f_{cm1}/f_{cm28}=0,53$, міцність бетонів після теплової обробки становить 107,8% від проектної для класу за міцністю С35/45, водопоглинання за масою - 1,1 мас.%, марка за водонепроникністю W20, модуль пружності 52,6 ГПа, призмova міцність 76,5 МПа.

7. Доведено, що швидке формування структури композицій за рахунок підвищення щільності, прискорення процесу гідратації та пуцоланової реакції в нормальних умовах тверднення забезпечує досягнення високої ранньої міцності ($f_{cm1}/f_{cm28} = 0,31-0,32$; $f_{cm2}/f_{cm28} = 0,55-0,56$), високої стійкості до абразивної дії (стиранність – 0,05-0,08 г/см²), що створює можливість раннього використання бетонів на їх основі в умовах дії підвищених температур до 400 °С. Залишкова міцність розроблених бетонів внаслідок процесів самозапарювання додатково зростає на 20–30%, що відповідає класу ІЗ за граничною температурою застосування.

8. Результати промислового впровадження підтверджують перспективність застосування розроблених наномодифікованих надшвидкотверднучих цементуючих композицій та бетонів на їх основі для низькоенергетичних та безпропарювальних технологій збірного залізобетону, а також для зведення об'єктів, що сприймають дію підвищених температур. Питомий економічний ефект від впровадження розроблених ефективних бетонів для безпропарювальних технологій багатопустотних плит перекриття становить 85 грн на 1 м³ бетону.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Швидкотверднучі бетони на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними добавками / У. Д. Марущак, Б. Г. Русин, Т. А. Мазурак, Ю. В. Олевич // Будівельні матеріали і вироби. 2015. № 3. С. 36–39. ISSN 2413-9890 (*Особистий внесок: досліджено фізико-механічні та будівельно-технічні властивості бетонів на основі наномодифікованих портландцементних композицій*).

2. Саницький М. А., Марущак У. Д., Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції для високофункціональних бетонів // Будівельні матеріали і вироби. 2018. №3–4. С. 36–39. ISSN 2413-9890 (*Особистий внесок: досліджено кінетику набору ранньої міцності дрібнозернистого бетону на основі наномодифікованих портландцементних композицій*).

3. Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції для залізобетонних плит екструзійного безперервного формування // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2019. №74. С. 113–121. ISSN 2415-377X.

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз:

4. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength / U. Marushchak, M. Sanytsky, T. Mazurak, Y. Olevych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. № 6/6 (84). P. 50–57. ISSN 1729-3774. Scopus. *(Особистий внесок: досліджено особливості кінетики набору міцності наномодифікованого цементного каменю).*

5. Nanomodified Portland cement compositions with alkaline activation / U. Marushchak, M. Sanytsky, T. Mazurak, Y. Olevych // Budownictwo o zoptymalizowanym potenciale energetycznym: Praca zbiorowa. 2016. № 2(18). S. 119 – 128. ISSN 2299-8535, Index Copernicus, Baz Tech. *(Особистий внесок: досліджено вплив наномодифікування бетонів на їх міцність у ранньому та проектному віці).*

Патент:

6. Пат. №121367 Україна, Зв'язуюче / М. А. Саницький, У. Д. Марушчак, О. Р. Позняк, І. І. Кіракевич, Ю. В. Олевич. u201612966; заявл. 10.01.2017; опубл. 11.12.2017; №23. *(Особистий внесок: дослідження впливу добавки полікарбонатного типу на властивості зв'язуючого).*

Матеріали і тези міжнародних та всеукраїнських конференцій

7. Ефективні швидкотверднучі бетони для монолітного та дорожнього будівництва / У. Д. Марушчак, М. А. Саницький, Т. А. Мазурак, Ю. В. Олевич // Международная научно-практическая конференция «Эффективные технологические решения в строительстве с использованием бетонов нового поколения». Харків, 2015. С. 78–81 *(Особистий внесок: досліджено кінетику набору міцності швидкотверднучих бетонів на основі наномодифікованих портландцементних композицій).*

8. Marushchak U., Olevych Y. Effective rapid-hardening concretes based on nanomodified cement systems // Міжнародна науково-технічна конференція «Еко-комфорт», Львів. 2016. С. 49-50. *(Особистий внесок: досліджено кінетику набору міцності бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій).*

9. Marushchak U., Sanytsky M., Olevych Y. Effects of elevated temperatures on the properties of nanomodified rapid hardening concretes // MATEC Web of Conference. – 6th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” (Transbud-2017). Volume 116, 2017. - P. 010008 (1-5). (ISBN 978-2-7598-9022-4), Scopus. *(Особистий внесок: досліджено вплив підвищених температур на властивості наномодифікованих швидкотверднучих високоміцних бетонів).*

10. Саницький М. А., Марушчак У. Д., Олевич Ю. В. Вплив підвищених температур на міцність швидкотверднучих бетонів, що містять ультрадисперсні мінеральні добавки // 6-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», 19-21 квітня 2017. Харків. С. 87–88. *(Особистий внесок: визначено міцність швидкотверднучих бетонів при дії підвищених температур).*

11. Марушчак У. Д., Олевич Ю. В. Модифіковані бетони для енергоефективних технологій збірного залізобетону // Актуальні задачі сучасних технологій : збірник

тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, 16-17 листопада 2017, Тернопіль. Т. 1. 2017. С. 138. (*Особистий внесок: досліджено вплив добавок на міцність бетонів при малопрогрівній технології залізобетонних виробів*).

12. Олевич Ю. В. Модифіковані швидкотверднучі бетони для малопрогрівної технології збірного залізобетону // Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій: збірник тез доповідей міжнародної конференції, 11-13 квітня 2018, Одеса. 2018. С. 112.

13. Sanytsky M. A., Marushchak U. D., Olevych Y. V. Nanomodified composites based on the extra rapid hardening Portland cement // International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Nano-2018), 27–30 August 2018. Kyiv. P. 406. (*Особистий внесок: досліджено вплив комплексних наномодифікаторів на фізико-механічні властивості бетонів у ранній період*).

14. Marushchak U., Rusyn B., Olevych Y. The properties of Rapid hardening fiber-reinforced concretes at elevated temperatures // 20. Internationale Baustofftagung. F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. 12–14 September 2018. Bauhaus-Universität Weimar. (Bundesrepublik Deutschland), 2018. P. 905–912. (*Особистий внесок: досліджено міцність дрібнозернистого бетону при різних температурних впливах*).

АНОТАЦІЯ

Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції та модифіковані високоміцні бетони на їх основі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та виробы. Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019.

Дисертаційна робота присвячена питанням розроблення теоретичних основ одержання надшвидкотверднучих портландцементних композицій шляхом системного поєднання полікарбосилатних суперпластифікаторів та інноваційного прискорювача тверднення на основі синтетичних наночастинок гідросилікатів. Встановлено вплив комплексного наномодифікатора на фізико-хімічні особливості процесів гідратації і тверднення наномодифікованих портландцементних композицій, які завдяки направленому формуванню мікроструктури цементуючої матриці в ранній період гідратації дозволяють вирішувати проблему одержання швидкотверднучих бетонів з покращеними експлуатаційними властивостями. Запроектовано склади високоміцних бетонів на основі наномодифікованих надшвидкотверднучих портландцементних композицій для низькотемпературних режимів теплової обробки, досліджено будівельно-технічні властивості, здійснено промислову апробацію та розраховано техніко-економічну ефективність їх використання.

Ключові слова: надшвидкотверднучі портландцементні композиції, високоміцні бетони, теплова обробка, комплексний наномодифікатор, будівельно-технічні властивості.

АННОТАЦИЯ

Олевич Ю. В. Сверхбыстротвердеющие портландцементные композиции и модифицированные высокопрочные бетоны на их основе. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. Национальный университет “Львівська політехніка” Министерства образования и науки Украины, Львов, 2019.

Диссертация посвящена вопросам разработки теоретических основ получения сверхбыстротвердеющих портландцементных композиций путем системного сочетания поликарбоксилатных суперпластификаторов и инновационного ускорителя твердения на основе синтетических наночастиц гидросиликатов кальция. Установлено влияние комплексного наномодификатора на физико-химические особенности процессов гидратации и твердения наномодифицированных портландцементных композиций, благодаря направленному формированию микроструктуры цементирующей матрицы в ранний период гидратации позволяют решать проблему получения быстротвердеющих бетонов с улучшенными эксплуатационными свойствами для низкотемпературной и безопарочной технологий сборного железобетона. Приведены результаты промышленной апробации разработанных сверхбыстротвердеющих портландцементных композиций и высокопрочных бетонов на их основе при изготовлении предварительно напряженных железобетонных плит перекрытия безопалубочного формирования по низкотемпературным режимам тепловой обработки, также показана технико-экономическая эффективность их применения.

Ключевые слова: сверхбыстротвердеющие портландцементные композиции, высокопрочные бетоны, тепловая обработка, комплексный наномодификатор, строительно-технические свойства.

SUMMARY

Olevych Y. V. Ultrarapid hardening Portland cement compositions and modified high strength concretes on their bases. – On rights for a manuscript.

Thesis for candidate degree of engineering science in speciality 05.23.05 – building materials and products. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The thesis is devoted to the development of theoretical bases of obtaining of nanomodified ultrarapid hardening Portland cement compositions for high strength concrete on their basis with improved building and technical properties. The possibility of development of such compositions on the basis of ordinary Portland cement for high strength concrete with using nanotechnological methods of the modification of cementitious matrix by introduction of nanoscale particles of C-S-H phase and polycarboxylate type superplasticizer is shown. The complex nanomodifier results in high water reduced effect with decreased interparticles distance, accelerated formation of

hydrosilicate gel with a more homogeneous distribution of hydrates in a limited intergranular space. Nano-modified Portland cement compositions reaches 54.5 % of standard strength after 24 hours. It allows to categorize them as ultra-rapid hardening. According to the indicator of standard strength ($R_{c28}=70.4$ MPa), they refer to high strength binder. Effectiveness of nano-modified ultra-rapid hardening Portland cement compositions for high strength concrete under different curing conditions is confirmed. The physical and chemical peculiarities of the processes of hydration and hardening of nanomodified cementitious systems, which consist in the directed formation of the microstructure of a cement matrix with accelerated formation of a hydrosilicate gel due to seeding effect with formation of a homogeneous fine-crystalline structure of cement paste, are studied.

The compositions of the high strength concretes based on the nano-modified ultrarapid hardening Portland cement compositions were designed, their building and technical properties were investigated. Concretes based on ultra-rapid hardening Portland cement compositions are characterized by increased rate of early strength development (after 1 day of hardening f_{cm1}/f_{cm28} is 0.51), which meets the requirements for ultra-rapid hardening concrete. The strength of designed concrete on the basis of ultra-rapid hardening Portland cement compositions is 83.0 MPa after 28 days and meets the requirements for high strength concrete. It was shown that concretes based on ultra-rapid hardening Portland cement compositions allowed to provide development of low and zero energy technologies of precast concrete.

High strength concrete on the basis of ultrarapid hardening Portland cement composition, which is resistance at the elevated temperatures up to 400 °C, is developed. The strength of such concretes at early time under normal condition increase due to the increased density of cement paste, accelerated the hydration process and pozzolanic reaction; under the elevated temperatures up to 400 °C their strength further increases by 20–30%.

The reliability of the results is confirmed using standard methods of physical and mechanical tests, physical and chemical analysis methods (X-ray diffraction, scanning electron microscopy, infrared spectroscopy, determination of granulometric composition), proven methodologies, use of calibrated measuring instruments and equipment and the reproducibility of experimental results. Effective formulations of high-strength and high-strength concrete have been developed on the basis of ultra-high-strength Portland cement compositions, the implementation of which, at low-temperature treatment of floor slabs, solves the problem of providing the required transfer strength. In the production conditions of SE “Spetszalizobeton” high-strength concrete on the basis of ultra-rapid hardening Portland cement compositions for the manufacture of round-hollow slabs of overlap was produced. Technical and economic efficiency of their use was calculated.

Key words: ultrarapid hardening Portland cement compositions, high strength concretes, heat curing, complex nanomodifier, building and technical properties.