

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОЛЕВИЧ ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 666.942.32:666.9.035

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.23.05 - будівельні матеріали та вироби

19 - архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Ю.В. Олевич

Науковий керівник Марущак Уляна Дмитрівна,
доктор технічних наук, доцент

Львів 2019

АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.05 - будівельні матеріали та виробы (19 - Архітектура та будівництво). - Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019.

Основний зміст дисертаційної роботи.

Дисертація присвячена розробленню теоретичних основ отримання надшвидкотверднучих портландцементних композицій для високоміцних бетонів на їх основі з покращеними будівельно-технічними властивостями. Показана можливість одержання надшвидкотверднучих композицій на основі портландцементів загальнобудівельного призначення шляхом використання нанотехнологічних методів модифікування цементної матриці за рахунок введення нанорозмірних частинок С-S-H фаз та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу. Комплексний наномодифікатор зумовлює реалізацію високого водоредукуючого ефекту зі зменшенням відстані між частинками, пришвидшення гідратаційних процесів з прискоренням внутрішнього тепловиділення та утворенням гідросилікатного гелю з більш однорідним розподілом гідратів в обмеженому міжзерновому просторі. Розроблені портландцементні композиції досягають 54,5% від стандартної міцності через 24 год, що дозволяє віднести їх до надшвидкотверднучих в'язучих згідно з ДСТУ Б В.2.7-281:2011. За показником стандартної міцності ($R_{c28} = 70,4$ МПа) розроблені композиції відносяться до високоміцних в'язучих. Вивчено фізико-хімічні особливості процесів гідратації та тверднення надшвидкотверднучих портландцементних композицій, які полягають у направленому формуванні мікроструктури цементної матриці з прискореним утворенням гідросилікатного гелю за

рахунок ефекту нуклеації з утворенням однорідної дрібнокристалічної структури цементного каменю.

Підтверджена ефективність надшвидкотверднучих портландцементних композицій для високоміцних бетонів з підвищеними будівельно-технічними властивостями у різних умовах тверднення. Бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій характеризуються підвищеною кінетикою набору ранньої міцності (через 1 добу показник питомої міцності f_{cm1}/f_{cm28} становить 0,51), що відповідає вимогам щодо надшвидкотверднучих бетонів. Міцність розроблених бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій становить 83,0 МПа через 28 діб і відповідає вимогам щодо високоміцних бетонів. Показано, що бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій досягають передаточної міцності при низькотемпературних режимах теплової обробки, що забезпечує розвиток низькоенергетичних технологій збірного бетону.

Розроблено ефективні високоміцні бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, що характеризуються стійкістю при підвищених температурах до 400 °С. Міцність високоміцних бетонів у ранній період у нормальних умовах зростає за рахунок збільшення щільності цементного каменю, прискореного процесу гідратації та пуцоланової реакції; при підвищеній температурі до 400 °С їх міцність зростає на 20–30% за рахунок ефекту самозапарювання.

Розроблено ефективні склади модифікованих високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, впровадження яких при низькотемпературній обробці плит перекриття вирішує завдання забезпечення необхідної передавальної міцності. У виробничих умовах ДП «Спецзалізобетон» випущено високоміцний бетон на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій для виготовлення плит перекриття безперервного формування за скороченим низькотемпературним режимом теплової обробки.

Отримані в роботі теоретичні і практичні результати щодо особливостей проектування складів швидкотверднучих бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій впроваджено в навчальний процес при викладанні дисциплін “Енерго- та ресурсощадні технології у будівництві”, “Інноваційні технології виготовлення сучасних будівельних матеріалів і виробів” для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

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

Список публікацій здобувача:

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.

2. Саницький М. А., Марущак У. Д., Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції для високофункціональних бетонів // Будівельні матеріали і вироби. 2018. №3–4. С. 24-27. ISSN 2413-9890.

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.

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.

Патент:

6. Пат. №121367 Україна, Зв'язуюче / М. А. Саницький, У. Д. Марущак, О. Р. Позняк, І. І. Кіракевич, Ю. В. Олевич. u201612966; заявл. 10.01.2017; опубл. 11.12.2017; №23.

Матеріали і тези міжнародних та всеукраїнських конференцій:

7. Ефективні швидкотверднучі бетони для монолітного та дорожнього будівництва / У. Д. Марущак, 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.

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.

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.

10. Саницький М. А., Марущак 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.

11. Марущак 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.

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.

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.

ABSTRACT

Olevych Y. V. Ultrarapid hardening Portland cement compositions and modified high strength concretes on their bases. Qualification scientific work on the manuscript.

The thesis for candidate degree of engineering science (PhD) in the specialty 05.23.05 “Building materials and products” (19 – Architecture and construction). - Lviv Politechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The main content of the thesis.

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 in different conditions. 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 binder. 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

increases 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, physico-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 modified high strength concretes have been developed on the basis of ultrarapid hardening 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 “Spetszalezobeton” 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.

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	18
1.1 Сучасні тенденції у практиці будівельного виробництва.	18
1.2. Способи прискорення тверднення бетонів.....	26
1.3. Фізико-хімічні особливості структуроутворення високоміцних бетонів в умовах підвищених температур.....	36
1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза.....	42
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	44
2.1. Характеристика матеріалів	44
2.2. Фізико-механічні випробування.....	55
2.3. Фізико-хімічні методи досліджень.....	57
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ НАДШВИДКОТВЕРДНУЧИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ	59
3.1. Оцінка впливу хімічних та мінеральних модифікаторів на кінетику тверднення портландцементів.....	59
3.2. Дослідження впливу технологічних факторів на процеси раннього структуроутворення портландцементних композицій.....	71
3.3. Оптимізація складів надшвидкотверднучих портландцементних композицій.....	79
3.4. Фізико-хімічні особливості гідратації надшвидкотверднучих портландцементних композицій	93
Висновки до розділу.....	103
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ МОДИФІКОВАНИХ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ	

НАДШВИДКОТВЕРДНУЧИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ.....	106
4.1. Принципи проектування складів модифікованих високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій для низькотемпературних режимів теплової обробки.....	106
4.2. Дослідження будівельно-технічних властивостей бетонів, одержаних за низькотемпературними режимами теплової обробки.....	118
4.3. Розроблення модифікованих високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, що працюють в умовах підвищених температур	126
Висновки до розділу.....	134
РОЗДІЛ 5. ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ МОДИФІКОВАНИХ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ НАДШВИДКОТВЕРДНУЧИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ.....	137
5.1. Промислова апробація розроблених високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих композицій.....	137
5.2. Техніко-економічні показники модифікованих високоміцних бетонів.....	142
Висновки до розділу	146
ВИСНОВКИ.....	147
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	150
ДОДАТКИ.....	167

ВСТУП

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-влагої 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 та проектної міцностей високоміцного бетону, що зумовлює потребу регулювання та коректування складів та 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 цементи 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 та високоміцних бетонів, оптимізація їх складів, дослідження процесів структуроутворення та будівельно-технічних властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити критерії оцінки добавок-модифікаторів для одержання надшвидкотверднучих портландцементних композицій;
- провести оцінку впливу внутрішнього тепловиділення в присутності модифікаторів у загальний енергетичний баланс процесів тверднення;
- оптимізувати склади надшвидкотверднучих портландцементних композицій, а також встановити закономірності їх структуроутворення та фізико-хімічні особливості гідратації у різних температурних умовах;

- встановити раціональні параметри режимів теплової обробки бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій;
- розробити оптимальні склади модифікованих високоміцних бетонів для теплової обробки при зниженні температури ізотермічного витримування 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 направленого регулювання раннього структуроутворення надшвидкотверднучих портландцементних композицій та керування властивостями високоміцного бетону на різних структурних рівнях.

Предмет дослідження: надшвидкотверднучі портландцементні композиції та 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 та високоміцних бетонів на їх основі проведено згідно з діючими нормативними документами і загальноприйнятими методиками. Оптимізацію складів модифікованих високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій 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 направленого 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 37,4 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 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 ресурсоощадні 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. 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.

У роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1, 2, 13] – вивчення міцнісних характеристик високоміцних швидкотверднучих бетонів на основі наномодифікованих портландцементних композицій; [3, 11, 12] – розроблення високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих композицій для малопрогрівних технологій залізобетонних виробів; [4, 5] – виявлення особливостей кінетики набору міцності наномодифікованого цементного каменю; [6] – патентний пошук, дослідження впливу добавки полікарбоксилатного типу на властивості зв’язуючого; [7, 8] – дослідження технологічних та міцнісних характеристик модифікованих високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій; [9, 10, 14] – дослідження впливу підвищених температур на властивості наномодифікованих швидкотверднучих високоміцних бетонів.

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 (Беймар, Німеччина, 2018) та на конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету “Львівська політехніка” 2011-2018 рр.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, з них 3 статті у фахових у наукових фахових виданнях України, 2 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus, Index Copernicus, Baz Tech), 8 публікацій у матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій (одна з яких входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus), 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації: Основна частина дисертаційної роботи викладена на 128 сторінках друкованого тексту і складається із 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 на 21 сторінці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Сучасні тенденції у практиці будівельного виробництва

За останні роки зростання ринку є переважаючим трендом у будівельній галузі Європи і світу [4, 24, 142]. Будівельний сектор має стратегічне значення для світової економіки і генерує майже 9% валового внутрішнього продукту в Європейському Союзі. Основне глобальне дослідження «Загальні перспективи будівництва» вказує середній приріст світового будівництва на 3,9% річних до 2030 року.

Сучасна будівельна галузь є однією з найбільш швидкозростаючих серед усіх галузей народного господарства й в Україні, що пов'язано з розвитком інфраструктури і підвищенням інвестиційної привабливості [39]. За даними Державної служби статистики України, у січні-грудні 2018 р. обсяги будівництва зросли на 4,4% порівняно із січнем-груднем 2017 р. Нове будівництво, реконструкція та технічна реновація становили 72,8% від загального обсягу виконаних будівельних робіт, а капітальний і поточний ремонти - 18,6% та 8,6% відповідно. Обсяги будівництва у квітні 2019 р. зросли на 30,2% порівняно з аналогічним періодом 2018 р. Найвищі темпи зростання спостерігалися в будівництві нежитлових (торгівельний, готельний, офісний сектори) та інженерних споруд. Разом з тим, значна швидкість старіння житлового фонду в Україні, переходу його до аварійного і старого (3,5 млн м² на рік), зношеність доріг у дорожньому секторі (97 %) потребує загального оновлення та створення нового і сучасного житла, комерційної нерухомості, інфраструктури [9, 35].

Кожен з проєктів на нове будівництво, реконструкцію вимагає інноваційних, найсучасніших рішень з використанням ефективних та екологічних будівельних матеріалів. Найвикористовуванішим будівельним матеріалом у світі є бетон. За даними [35] випуск товарного бетону в Україні у 2018 р. становив 18,2 млн. т (79,5%), а збірних залізобетонних конструкцій 4,7 млн. т., що відповідає 20,5 %. Попри зростання популярності монолітного способу будівництва при зведенні житлових та громадських будинків з метою оптимізації будівництва дедалі частіше впроваджується збірно-монолітний метод, який передбачає використання збірних залізобетонних конструкцій [108]. Така технологія об'єднує переваги монолітного та панельного будівництва і є прогресивним напрямком у житловому будівництві, який дозволяє зводити будівлі із залізобетонним каркасом за мінімальних витрат часу і зусиль. До переваг збірно-монолітного будівництва відносять високу швидкість будівництва за рахунок використання готових виробів, оптимальні трудовитрати через відсутність необхідності влаштування опалубки для колон і перекриттів. Така технологія дає можливість реалізації унікальних проєктів, не обмежуючись типовими проєктними рішеннями [92].

На відміну від монолітного каркасу в цьому випадку для перекриттів використовують не суцільну, а багатопустотні залізобетонні плити, що знижує вагу конструкції та масивність фундаменту [44, 65, 133]. У напрямку оптимального застосування бетону в будівельних конструкціях, будівлях та спорудах у світовій практиці будівництва запропоновано індекс використання бетону (concrete usage index – CUI), який підвищений для пустотілих плит перекриття [162].

Зростаюча потреба у виробництві бетонних і залізобетонних будівельних виробів та конструкцій потребує все більшої витрати природних сировинних та енергетичних ресурсів. Подальший розвиток в технології бетону можливий шляхом впровадження концепцій сталого розвитку, які

зокрема передбачають зниження витрат природних ресурсів та підвищення довговічності виробів та конструкцій [122, 129, 149, 163].

Понад 85% збірного бетону та залізобетону виготовляється за технологією, яка базується на тепловій обробці виробів при температурі близько 60-80 ° С, що дозволяє забезпечити швидкий набір міцності бетону в ранньому віці. Тепловолога обробка (ТВО) бетонних та залізобетонних виробів є одним з найбільш тривалих і відповідальних процесів в технології їх виробництва і пов'язана з значним споживанням пари. Витрата пари на підприємствах збірного залізобетону коливалася в межах 230-270 кг/м³, а з врахуванням невиробничих втрат могла досягати 1 т/м³ [84].

Аналіз структури енерговитрат підприємств показує, що основна їх частка (до 80-90%) припадає на виробництво пари для теплової обробки залізобетонних виробів, прогріву інертних матеріалів (щебінь та відсів, пісок, керамзит), нагрівання води для технологічних і побутових потреб. Зважаючи на високу вартість енергоносіїв, низьку ефективність їх використання на всіх етапах, включаючи генерацію, ТВО стає одним з основних чинників енергозаощадження. В умовах постійного зростання цін на паливо питання зменшення витрат на виробництво пари набуває особливої важливості для зниження собівартості продукції і, як наслідок, підвищення її конкурентоспроможності [111].

Основний недолік ТВО висока енергоємність, зокрема, витрата газу газовими котельнями, найбільш розповсюдженими на заводах. Витрати газу можуть бути скорочені на декілька десятків відсотків за рахунок застосування інтенсивної циркуляції пароповітряної суміші в пропарювальних камерах компактних парогенераторів, розташованих безпосередньо біля камер. Проте, враховуючи подорожчання газу останніми роками в декілька разів, ці заходи хоча і є доцільними, не можуть істотно знизити собівартість виробів [46, 51].

Під час теплової обробки в бетоні спостерігаються складні фізичні та фізико-хімічні процеси, що зумовлюють виникнення деформацій,

спричиняють утворення тріщин. На етапі піднімання температури на початку ізотермічного прогріву температура і тиск пари у виробі є нижчими, ніж параметри довкілля, тому нагрітіші його зовнішні шари збільшуються в об'ємі істотніше, ніж внутрішні. Крім цього, різниця температури в шарах бетону зумовлює в них різницю парціальних тисків. Це викликає переміщення вологи із зовнішніх шарів у внутрішні і розширення в порах пароповітряної суміші, що створює усередині бетону надлишковий тиск. У цей період, особливо при швидкому підніманні температури, в бетоні виникають значні напруження і утворюються тріщини, порушується контакт між цементним каменем і заповнювачем [84, 142].

При ізотермічному прогріванні затверділий бетон збільшується в об'ємі внаслідок різниці коефіцієнтів лінійного температурного розширення його компонентів. За рахунок цього вода і повітря розсувають тверді компоненти, створюючи внутрішній тиск, який перевищує міцність відформованого бетонного виробу [51]. При цьому спостерігаються необоротні руйнування структури бетону, такі як зменшення міцності, поява мікротріщин і капілярних каналів [149]. Крім того, нерівномірності розподілу температури по об'єму виробу, що виникають в процесі нагрівання, викликають нерівномірні температурні розширення різних ділянок і зон виробу, температурні напруження і деформації [24, 84].

Не менш важливий вплив на процес формування структури і тверднення бетону має і вологісний режим теплової обробки, що викликає усадку і набухання виробів. Усадка системи цемент - вода (контракція) інтенсивно починається на стадії тужавіння цементу, коли вода витрачається на протікання процесів гідратації. У цей період маломіцний і пластичний цементний камінь сприймає деформації без розвитку внутрішніх напружень; усадка в цей період необоротна [42].

По мірі тверднення цементного каменю і зменшення в ньому вільно зв'язаної води усадка зменшується. На стадії тверднення цементного каменю, що вже має значну міцність і незначні пластичні деформації, усадка викликає

внутрішні напруження - стиску в заповнювачі і арматурі і розтягу в цементному камені. Якщо напруження розтягу перевищать допустиму межу, виникають усадочні тріщини, що знижують технічні властивості бетону. У залежності від ступеня температурного впливу і впливу деструктивних процесів руйнування структури бетону порівняно з бетоном нормального тверднення характеризується погіршенням його основних фізико-механічних властивостей (міцності, довговічності, морозостійкості) [44, 66].

Тобто в бетоні в період теплової обробки спостерігаються залишкові об'ємні деформації, що виникають на початковій стадії тверднення при нагріванні виробів з ще недостатньо міцного бетону, утворення направленої капілярної пористості, в зв'язку з переміщенням води і пароповітряної суміші, зниженої щільності цементного каменю в бетоні, викликаній недостатнім ступенем гідратації і утворенням більших кристалогідратів, що призводять до появи численних дефектів і викликають зниження експлуатаційних характеристик виробів і конструкцій. Вирішення завдання послаблення або виключення впливу негативних факторів здійснюється за рахунок оптимізації режимів теплової обробки [84, 68].

Попередній підігрів бетонної суміші і води для приготування бетонних сумішей дозволяє досягти прискорення термінів тверднення. Застосування пропарювання конструкцій або окремих елементів (залізобетонні плити, блоки, балки) збільшують не тільки швидкість тверднення, одночасно збільшуючи продуктивність, але і підвищують міцнісні характеристики елементів [5]. Проте такий спосіб пов'язаний із застосуванням енергоресурсів.

Одними із найбільш поширених збірних залізобетонних виробів є багатопустотні попередньо напружені плити перекриття, частка яких становить 35% на ринку збірних залізобетонних конструкцій [35]. Інноваційним методом їх виробництва є метод стандового екструзійного безперервного формування [17]. Плити перекриття безопалубного формування можуть застосовуватися для облаштування несучих

конструктивних елементів перекриття і покриття будівель та споруд різного призначення [111, 133].

Виготовлення попередньо-напружених залізобетонних конструкцій на довгих настилах включає послідовні технологічні операції: очищення, в т.ч. вакуумне, змащування формувальних настилів, розкладання та попереднє напруження арматури, формування, укриття виробів, низькотемпературний прогрів, розпилювання на необхідні розміри, зняття і складування виробів [17].

Одностадійні бетоноукладчики мають просту конструкцію, надійні та енергоекономічні в роботі, їх просто переналагоджувати, обслуговувати та ремонтувати. Хороша якість нижньої поверхні таких виробів досягається в процесі їх вібраційного формування, а верхня поверхня потребує додаткового загладжування після початку процесів гідратації та структуроутворення портландцементу і набору бетоном структурної міцності. Екструдери здійснюють ущільнення бетонної суміші під тиском та вібрації шнеків, що обертаються, витісняючи бетонну суміш через отвори формоутворюючої оснастки. Формування здійснюється в горизонтальній площині, а рух формувальної машини відбувається за рахунок її відштовхування від готового виробу. В той же час, для таких машин необхідне використання високоякісних заповнювачів та цементу, для них характерні підвищені витрати на придбання та заміну шнеків [80, 111].

Використання таких формувальних машин дозволяє економно використовувати цемент та формувати пустотілі плити з високою якістю поверхні та інтенсивним набором міцності бетону при низькотемпературному прогріві. Можливість застосування плит перекриття для великопрольотних будівель створює необхідність використання високоміцних бетонів для їх виготовлення [21, 25, 149].

Наступним, особливо важливим чинником якості нижньої поверхні багатопустотних плит є якість поверхні формуючого настилу, який підігрівається до температури 50 °С, якість мастил та змащення. Частіше

формуючі настили монтують із секцій заводського виробництва, що включають рами, рейки, ефективні утеплювачі системи підігріву та металеві листи товщиною 12 – 14 мм [80].

Використання формувальних машин, які здатні ущільнювати жорсткі бетонні суміші, дає змогу виготовляти високоефективні, економічні залізобетонні конструкції за рахунок зменшення витрат цементу, терміну прогріву та збільшення продуктивності технологічних ліній [80, 84]. Однак, нижня поверхня конструкцій із таких сумішей недостатньо гладка і в окремих випадках потребує шпаклювання. Конструкції із рухливих сумішей мають гладку нижню поверхню, але при їх формуванні спостерігається витікання через щілини між формувальною машиною та поверхнею настилу цементного молочка та незначної кількості розчину, що обумовлює не щільну структуру бетону в нижніх шарах виробів. Виготовлені вироби із рухливих бетонних сумішей мають низьку міцність, тому в них можливі деформації вертикальних стінок та деформації і руйнування верхніх полицок. Розопалублення виробів у короткі терміни, забезпечення необхідної передавальної та проектної міцностей зумовлює значні витрати портландцементу і застосування прогріву [3].

Аналіз проблем виготовлення багатопустотних плит перекриття методом безопалубного формування свідчить про необхідність забезпечення високої якості вихідних матеріалів з врахуванням точності дозування компонентів, вологості заповнювачів; необхідність підвищення витрати піску до 0,43 від маси заповнювачів та збільшення розчинової складової в бетонній суміші; застосування щебеню фракції 5-10 мм; використання дрібнодисперсних активних мінеральних добавок, зокрема золи-винесення, меленого піску, горілих порід, доменного гранульованого шлаку не менше 15% від маси цементу [111].

Вирішення завдань підвищення ефективності виготовлення залізобетонних виробів та конструкцій спрямоване на оптимізацію технологічних режимів та зменшення енергетичних витрат за рахунок

освоєння енергоощадних технологій. При цьому виникає необхідність оперативного коректування складів та режимів тверднення бетонів для забезпечення регламентованих технічних та економічних показників [5, 7].

Як зазначають автори [51], з метою економії первинних енергоресурсів практичний інтерес представляє використання сонячної енергії для термообробки бетону із застосуванням різних геліотехнічних пристроїв і систем. У роботах [14, 30, 31, 38] показано позитивний вплив термосилової обробки з використанням сонячної енергії на фізико-механічні властивості і довговічність бетону з одержанням економічного ефекту. Разом з тим, цей напрям потребує розроблення ефективних геліосистем та використання традиційного палива в холодний період.

Один з перспективних напрямків зменшення енергоємності збірного залізобетону базується на забезпеченні умов для формування малодефектної структури цементної матриці бетону без теплової обробки [4, 15, 22]. Така технологія вимагає якісно нового підходу, який ґрунтується на можливості реалізації в'язучого потенціалу цементу. Перспективність впровадження безпрогрівної або малопрогрівної технології зумовлюється потребою найменших інвестицій і здатністю швидко дати відчутний економічний ефект за рахунок зменшення споживання енергоресурсів [5, 75].

Аналіз методів освоєння таких підходів вказує на доцільність застосування ефективних хімічних добавок-модифікаторів властивостей бетону в комплексі з фізико-хімічними та термічними впливами на виріб чи конструкцію, що тверднуть в умовах тепловологої обробки [5, 101, 103]. Найважливішими технологічними факторами впливу автори виділяють тривалість тверднення, параметри тепло- та масопереносу, що утворюють температурно-вологісні поля у залізобетонних виробах [80].

Важливе значення в умовах тепловологої обробки відіграє внесок внутрішніх і зовнішніх джерел тепла цементної системи в енергетичний баланс тверднення залежно від тривалості та рівня здійснення теплових впливів для зменшення негативного впливу градієнтів температури та

вологості по об'єму виробу [87, 88]. Для переходу на безпропарювальні технології необхідно розробити програму для підбору та коректування складів бетону з хімічними та мінеральними добавками, а також використання спеціальних в'язучих систем, що забезпечують скорочення витрат енергії та ресурсів у технології залізобетонних виробів, та одержання нормованих властивостей бетону [36, 41, 86, 132]. Тому для одержання швидкотверднучих бетонів виникає гостра необхідність у впровадженні надшвидкотверднучих цементів, для яких згідно з ДСТУ Б В.2.7-281:2011 нормованою міцністю є міцність при стиску у віці однієї доби та менше.

Теоретичні основи отримання ефективних високоміцних бетонів різного функціонального призначення і підвищення їх експлуатаційної надійності базуються на забезпеченні керованого структуроутворення шляхом застосування ефективних в'язучих речовин, модифікованих комплексними хімічними добавками [1, 4, 21, 104].

Отже, вирішення завдань підвищення ефективності виготовлення залізобетонних виробів та конструкцій спрямовані на оптимізацію технологічних режимів, а також зменшення енергетичних витрат за рахунок освоєння енергоощадних технологій. Один з перспективних напрямків зменшення енергоємності збірного залізобетону базується на забезпеченні умов для формування малodefектної структури цементної матриці бетону без теплової обробки. Така технологія вимагає якісно нового підходу, який ґрунтується на можливості якнайповнішої реалізації в'язучого потенціалу цементу і максимальної міцності бетону.

1.2. Способи прискорення тверднення бетонів

Аналіз наукових даних [15, 22, 67, 96] дозволив виділити основні способи прискорення тверднення бетонів при виготовленні залізобетонних

виробів чи проведенні бетонних робіт, що визначають набір бетоном високої ранньої та проектної міцності: застосування портландцементу високих марок з високою міцністю в ранні терміни тверднення і врахування його сумісності з добавками, а також високоякісних заповнювачів; підбір складу бетону з низьким водоцементним відношенням; уведення хімічних та мінеральних добавок, зокрема пластифікуючих, прискорювачів тверднення, активних мінеральних мікронаповнювачів, забезпечення щільної упаковки компонентів суміші [15, 55, 70, 72, 155]. Правильний вибір і поєднання цих факторів дозволяє зменшити тривалість індукційного періоду і сформувати структуру цементного каменю, що забезпечує високу ранню міцність бетону.

Виходячи з фізико-хімічних основ структуроутворення, одержання швидкотверднучих високоміцних бетонів ґрунтується на застосуванні швидкотверднучих і надшвидкотверднучих в'язучих [8, 22, 49]. Згідно ДСТУ Б В.2.7-281:2011, де представлена класифікація в'язучих за швидкістю тверднення, до швидкотверднучих відносяться цементи з нормуванням міцності при стиску через 2 доби, що є підвищеною порівняно з нормальнотверднучим цементом, та у віці 28 діб, а до надшвидкотверднучих – цементи з нормуванням міцності при стиску у віці 1 доби та менше, що підвищена порівняно з нормальнотверднучим цементом, та у віці 28 діб. У той же час, згідно класифікації швидкотверднучих в'язучих (група ТВ2) за ДСТУ Б В.2.7-91-99 встановлено вимогу щодо міцності через 2 доби, яка повинна бути не менше 55% від 28-ми добової міцності.

Згідно з класифікацією портландцементів загальнобудівельного призначення (ДСТУ Б В.2.7-46:2010) портландцемент з високою ранньою міцністю марок 400 і 500 при стандартних випробуваннях повинен характеризуватись границею міцності при стиску через 2 доби відповідно не менше 15 і 20 МПа [34]. Разом з тим, Європейські норми EN 197-1 та ідентичний до них стандарт України ДСТУ Б EN 197-1:2015 встановлюють вимоги щодо показників міцності через 2 доби для портландцементів з

високою ранньою міцністю класів 32,5R, 42,5R, 52,5R відповідно більше 10, 20 чи 30 МПа. При цьому міцність портландцементів визначається відповідно до EN 196-1 при В/Ц=0,5, що більшою мірою відповідає технологіям високофункціональних бетонів [2].

В.Д. Глуховським, П.В. Кривенком, Р.Ф. Руновою, К.К. Пушкарьовою та ін. [70, 98, 128, 157] розроблені особливошвидкотверднучі високоміцні лужні цементы, які одержують при замішуванні меленого шлаку водними розчинами солей лужних металів, а в якості активатора додатково вводять 2-6 мас.% портландцементного клінкеру. Бетони на основі шлаколужних в'язучих характеризуються високою водо- та сульфатостійкістю, водонепроникністю та довговічністю [16, 36, 47, 52].

Л.Г. Шпиновою, М.А. Саницьким та ін. [83] розроблено пластифіковані швидкотверднучі безгіпсові портландцементи на основі портландцементного клінкеру з використанням комплексних хімічних добавок на основі лігносульфонатів технічних та прискорювачів тверднення.

Один з способів отримання швидкотверднучих портландцементів базується на утворенні підвищеної кількості гідросульфоалюмінату кальцію в складі цементного каменю [105]. Такі швидкотверднучі цементы одержуються змішуванням чи розмелюванням портландцементу, алюмініатів кальцію та сульфату кальцію і характеризуються зростанням ранньої міцності на 50-60% [60, 125, 150]. Проте такі в'язучі характеризуються прискореними термінами тужавіння, що обмежує їх використання у високофункціональних бетонах.

Застосування спеціальних цементів дозволяє повністю відмовитися від застосування пропарювання виробів, підігріву суміші і використання добавок. Разом з тим, швидкотверднучі цементы на основі клінкерів спеціального мінералогічного складу та спеціальні швидкотверднучі цементы (глиноземисті, кальційалюмосульфатні, кальційалюмофтористі, алінітовий, лужні, безгіпсові лужноактивовані цементы) характеризуються підвищеною собівартістю, вони можуть спричиняти швидку втрату рухливості бетонних

сумішей, зниження довговічності бетонів на їх основі, а випуск таких в'язучих потребує створення окремих технологічних ліній виробництва, що обмежує широке впровадження [22, 97, 129]. У зв'язку з цим, значний практичний інтерес представляє одержання цементів з високою ранньою міцністю на основі портландцементного клінкеру.

Швидкотверднучий цемент характеризується інтенсивним наростанням міцності в початковий період тверднення [22]. Підвищена механічна міцність у ранньому віці тверднення обумовлюється відповідним мінералогічним складом і мікроструктурою клінкеру, дозуванням добавок і тониною помелу цементу [49]. Висока дисперсність частинок забезпечує швидшу і повну реакцію в'язучої речовини.

Як показали автори [57, 129], із збільшенням питомої поверхні цементу збільшується поверхня реакції гідратації, в результаті чого прискорюється кристалізація новоутворень. Крім того, з підвищенням дисперсності цементу при постійному В/Ц зменшується відстань між ними і в системі раніше утворюються умови, що призводять до утворення коагуляційної та кристалізаційної структур. На цьому принципі ґрунтується отримання швидкотверднучих портландцементів, що характеризуються питомою поверхнею в 1,5-2,0 рази більшою порівняно зі звичайними. Однак більшість заводів виробляють портландцементи рядового помелу, що пов'язано з меншими енергозатратами та тривалішим терміном зберігання таких цементів [142]. Тому часто для створення тонкомолотого цементу доводиться використовувати додаткові механічні пристосування безпосередньо на місці будівництва.

Міцність каменю як у ранній, так пізній період визначається фазовим складом гідратних новоутворень, а стабільність утворених гідратів обумовлює інтенсивність деструкційних процесів у цементуючій матриці. Швидкість гідратації складових цементного клінкеру визначається їх хімічною активністю. Найшвидше протікають реакції гідратації трикальцієвого алюмінату, в той же час гідратація беліту при нормальних

температурах сповільнена [22]. Основну частину цементного каменю представляють продукти гідратації силікатних складових в'язучого, так званий тоберморитоподібний гель, який складається з гідросилікатів кальцію різної основності, будови та ступеня закристалізованості [97]. Показано [91], що в нормальних умовах і при температурі до 100 °C в цементному камені утворюються слабозакристалізовані і аморфні гідросилікатні фази. Для цих гідросилікатних фаз Х.Ф.В. Тейлор запропонував позначення, розділивши С-S-H фазу на складові змінного складу, що відрізняються величиною співвідношення CaO/SiO_2 [82]. Для гідросилікатів кальцію з відношенням CaO/SiO_2 0,8-1,5 використовують позначення С-S-H(I), яка є слабозакристалізованою або аморфною фазою змінного складу і має недосконалу структуру [127]. Формування структури з низькоосновних гідросилікатів кальцію дозволить отримати цементний камінь з високими характеристиками міцності, малою проникністю і підвищеною довговічністю [161].

Другою складовою С-S-H фази є високоосновні гідросилікати кальцію С-S-H(II) з відношенням $\text{CaO/SiO}_2=1,5$. Це також напівкристалічна фаза змінного складу і структури. Морфологічно гідросилікати типу С-S-H(II) можуть бути представлені як плівковими, так волокнистими або голчастими утвореннями [82, 97]. Високоосновні гідросилікати С-S-H(II) характеризуються зниженою міцністю і стійкістю до сульфатної корозії, при $\text{pH} < 11$ вони схильні до перекристалізації [127].

Кристалічна фаза в цементному камені становить до 40% об'єму твердої фази гідратних новоутворень. Половина кристалічної фази представлена гідроксидом кальцію. Його можна спостерігати у вигляді щільних шаруватих пакетів, що заповнюють поровий простір цементного каменю, або у вигляді гексагональних добре сформованих кристалів, що кристалізуються в порах [73, 91]. Великі кристалічні блоки підвищують дефектність, знижують деформативність і накопичують напруження в

структурі, знижуючи однорідність, міцність і корозійну стійкість цементного каменю [24, 129].

Іншу частину кристалічного зростка складають гідрати алюмінатів і алюмоферитів кальцію і їх сульфатні утворення [83]. При гідратації C_3A утворюються гідроалюмінати змінного складу C_4AH_x , які при зміні рН рідкої фази цементного каменю або температури поступово переходять в кубічний більш стабільний C_3AH_6 , що створює напруження в структурі цементного каменю і знижує його міцність [73]. Еtringіт кристалізується у вигляді тонких гексагональних призм або голок, моносульфатна фаза утворює гексагональні пластини [98].

Авторами показано [95, 99], що для забезпечення формування структури цементного каменю з підвищеною міцністю необхідно досягнути оптимального співвідношення кристалічної і гелеподібної фаз в продуктах гідратації шляхом регулювання гідратації цементу. При цьому матриця відіграє роль сполучного і стабілізуючого компонента, що передає навантаження на армуючий компонент.

Більшість розглянутих факторів є незалежними від виконавців. Питома поверхня та фазовий склад в'язучого визначаються технологією виготовлення. Тому найбільш раціональний шлях оптимізації властивостей цементного розчину - це введення добавок-регуляторів тверднення [28].

Фізико-хімічне модифікування здатне суттєво змінити технологічні властивості бетонних сумішей за рахунок синергічного поєднання окремих компонентів і дозволяє направлено регулювати параметри системи на стадії взаємодії цементу з водою, забезпечувати швидкий набір міцності бетону, зменшувати пористість, підвищувати його довговічність, сприяти зниженню витрати цементу, що є обов'язковою умовою створення сучасних будівельних матеріалів із покращеними будівельно-технічними характеристиками та заданими показниками якості [21, 41, 44, 72]. Впровадження високоміцних бетонів нової генерації з використанням комплексних пластифікуюче-прискорюючих хімічних добавок дозволить не

тільки підвищити технологічні властивості сумішей, отримати високоміцні бетони класу C35/45 та вище на основі місцевої сировини, але й суттєво знизити вартість конструкцій [40, 126].

Застосування прискорювачів тверднення бетону давно відомо в будівельній практиці [24, 115, 145]. Однак, прискорюючи тужавіння і тверднення бетону в початковий період, добавки цієї групи практично не впливають на водоцементне відношення і можуть знижувати відносну міцність на більш пізніх етапах тверднення. Як правило, до прискорювачів тверднення відносяться добавки-електроліти [15, 24, 86]. Ефективність їх застосування залежить як від катіонної та аніонної складових, так і від мінералогічного і речовинного складу портландцементу [87]. Слід зазначити, що застосування тільки прискорювачів тверднення не дає можливості забезпечити необхідну високу ранню міцність бетону у віці 12 годин при безпрогрівній технології виробництва бетону та залізобетону на звичайних портландцементях [103].

Поява суперпластифікаторів, а в останнє десятиліття і гіперпластифікаторів, зробило революцію в науці про бетон, дозволило ввести термін «модифікований бетон» [86, 90, 107]. Знижуючи до 30-35% витрату води при забезпеченні рівнорухливих бетонних сумішей, суперпластифікатори істотно підвищують міцність бетону або дозволяють економити витрату цементу. Застосування суперпластифікатора значно зменшує об'єм міжзернового простору та капілярної пористості, яка є визначальним фактором, як для міцності, так і для морозостійкості і корозійної стійкості бетону [83, 100, 114, 120].

Вплив водоцементного відношення на швидкість тверднення досить суттєвий. При постійному фазовому складі клінкеру зменшення вмісту води призводить до більш швидкого утворення необхідного пересичення розчину і виникнення компактних умов, а отже, до прискорення термінів тужавіння розчинів [47]. Цей факт може мати місце лише при низьких водоцементних відношеннях ($B/C=0,3$) [42, 129, 132]. Досягнення таких характеристик

забезпечується оптимальними значеннями коефіцієнтів розсунення зерен щебеню і піску та водоцементного відношення, а також уведенням оптимальної кількості добавки-суперпластифікатора [27, 146].

Підвищення швидкості гідратації в'язучого може досягатися зменшенням енергії активації - потенційної енергії, яка перешкоджає початку хімічної реакції. Енергія активації реакції - це та надлишкова енергія, яку треба докласти, щоб реакція почалася. Збільшення температури забезпечує енергію, необхідну для подолання цього бар'єру. При постійній температурі процесу, коли для подолання бар'єру енергія ззовні не вводиться, процес тверднення може бути прискорений зменшенням бар'єра, для цієї мети використовуються різні види добавок [58, 59].

ПАР змінюють протікання реакції протягом всього процесу тверднення. У початковий період гідратації вони підвищують розчинність вихідних частинок цементу за рахунок їх хімічного диспергування і пептизації. При колоїдизації, коли подальше розчинення частинок в насиченому розчині сповільнюється, ПАР, утворюючи адсорбційні плівки на поверхні вихідного матеріалу, уповільнює їх гідратацію, а на поверхні новоутворень змінює величину сили взаємодії між частинками новоутворень і тим самим змінює в ту або іншу сторону швидкість утворення кристалізаційної структури [107, 114].

У багатьох роботах показано [18, 87, 146], що добавки ПАР істотно подовжують індукційний період. Дія ПАР залежить від їх поверхневої активності і фізико-хімічних властивостей. Відомо, що суперпластифікатори нафталін- і меламінформальдегідного типу добре поєднуються з електролітами [15, 29]. При цьому автори відзначають, що якщо електроліт, будучи поверхнево-інактивною речовиною, підвищує поверхневий натяг, а органічні ПАР знижують його, то в присутності електроліту поверхнева активність ПАР зростає. Проведені дослідження з добавкою-прискорювачем -тіосульфатом натрію - показали, що прискорення структуро- і гідратуутворення в його присутності пов'язане з роллю алюмінатних

складових в цементі, руйнуванням еtringітової фази і можливим утворенням твердих розчинів заміщення, в структуру яких замість катіона вбудовуються катіони, розміри радіусів яких є близькі і не відрізняються більше, ніж на 10% [15, 73]. Plank та ін. [124, 127] продемонстрували, що кристалізація C-S-H у присутності суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу проходить за неklasичним механізмом зародження. Дослідженнями [116, 118] підтверджено, що в присутності полімерів нуклеація C-S-H фази йде неklasичним двоступеневим шляхом через сферичні аморфні зародки, які є місцями кристалізації.

При розробленні високоміцних матеріалів на основі портландцементу автори [32, 71, 96, 110] звертають увагу на необхідність застосування принципів формування надщільної упаковки. Така концепція реалізується шляхом використання мінеральних добавок, зокрема золи-виношення, метаклаоліну та мікрокремнезему, при введенні яких до складу портландцементу відбувається самоущільнення на мікрорівні і значне підвищення характеристик портландцементу [53, 77, 79, 155].

Інноваційним напрямком в технології швидкотверднучих високоміцних бетонів є впровадження нанотехнологічних прийомів [119, 138, 141, 153, 156]. Ці методи базуються на направленому формуванні структури матеріалу як гетерогенної, багатофазної системи складної ієрархії від нано- до макроструктурного рівня шляхом модифікування нанорозмірними частинками в поєднанні з високоефективними полікарбоксилатними пластифікаторами [68, 114, 160].

Введення наночастинок в цементну систему прискорює гідратацію цементу за механізмом прискорення процесів зародкоутворення [43]. Прискорювачі наночастинок поділяються на дві групи, виходячи із загальних механізмів їх дії. Перша група включає оксиди, такі як TiO_2 [139], ZrO_2 [137] та Fe_2O_3 [159, 163], або наночастинок вуглецевих нанотрубок [81, 85, 147], які в основному прискорюють гідратацію фізично. Дрібнодисперсні частинки можуть забезпечити неоднорідні ділянки нуклеації, на яких можуть

наростати продукти гідратації [130]. Авторами показано [89, 93], що агрегати, які характеризуються незначними поверхнями для росту продуктів гідратації, створюють умови для розподілення цементних частинок, що призводить до утворення більшої кількості центрів кристалізації на цементних зернах.

Друга група містить реактивні добавки, які здійснюють вплив на поровий розчин, за рахунок пуцоланових реакцій [109, 138]. Пуцоланові добавки типу кремнезему утворюють продукти гідратації зі зміною концентрації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в поровому розчині [106, 125]. Введення ультрадисперсного гідроксиду кальцію значно прискорює гідратацію цементу. Крім створення центрів кристалізації, він створює швидке насичення порового розчину щодо іонів кальцію та гідроксиду [115]. Показано, що карбонат кальцію прискорює утворення C-S-H, за рахунок високої кристалографічної спорідненості [73, 153]. Крім того, завдяки хімічній взаємодії з фазами, багатими глиноземом, CaCO_3 утворює карбоалюмінати та стабілізує еtringіт, що позитивно впливає на властивості бетонів [77]. Обидві групи добавок можуть додатково адсорбувати іони з порового розчину та впливати на ріст гідратів на добавці замість на клінкерній поверхні, а також можуть створювати локальні градієнти концентрації, які можуть змінювати механізми гідратації в цементних системах [131, 147].

Значно прискорити гідратацію портландцементу можна за рахунок використання синтетично отриманої добавки на основі C-S-H кристалів. Однією з таких добавок є продукт серії X-SEED, який забезпечує суттєве зростання набору міцності бетону в період від перших дванадцяти годин після приготування бетонної суміші завдяки унікальній технології, утворює додаткові центри кристалізації гідросилікатів кальцію між зернами цементу, що значно прискорює розвиток ранньої міцності [117, 123, 124]. Гідрати силікату кальцію, що входять до складу цементного тіста, різко прискорюють гідратацію цементу [54, 143, 165]. Показано [130], що частинки C-S-H

безпосередньо впливають на вторинне зародження або ріст продуктів гідратації, відводячи процес утворення продукту від частинок клінкеру. Виявлено, що зростання на зародках, а не на частинках клінкеру, зменшує сповільнення гідратації C_3S [116]. Крім того, зародження в поровому просторі видаляє з розчину іони кальцію та гідроксиду, створюючи локальний градієнт концентрації від частинок клінкеру, що може прискорити гідратацію аліту C_3S [165].

Отже, принципи розроблення високоміцних бетонів з інтенсивними темпами набору ранньої міцності для мало- та безпрогрівних технологій збірного залізобетону ґрунтуються на взаємозв'язку між структурою, компонентним складом та властивостями в'язучих і вимагають використання направленого синтезу міцності штучного каменю шляхом розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій.

1.3. Фізико-хімічні особливості структуроутворення високоміцних бетонів в умовах підвищених температур

Вирішення завдань, пов'язаних з підвищенням надійності будівельних конструкцій в умовах тепловогневого впливу та дії підвищених температур, забезпечує їх безпечну і довготривалу експлуатацію, що значною мірою досягається за рахунок розроблення вогнестійких високоміцних бетонів. Особливо це стосується будівельних конструкцій, які піддаються дії як механічних, так і теплових навантажень, зокрема під час пожеж після землетрусів. Підвищення стійкості бетонів до дії підвищених температур пов'язане з його широким застосуванням у конструкціях для споруд житлового та громадського призначення, тунелів, бурових майданчиків, а також для ядерних споруд (мають як задовільні теплові, так і екрануючі властивості), а також створення ефективного футерування

високотемпературного обладнання на промислових підприємствах та об'єктах комунальної власності [112].

Бетон є вогнестійким матеріалом і забезпечує перешкоджання поширенню вогню у будівлі. Він успішно застосовується в різних інженерних спорудах, забезпечуючи задовільну стійкість конструкцій у випадках дії вогню [144]. Разом з тим, його властивості погіршуються при впливі підвищених температур, що пов'язано з деструктивними процесами в цементному тісті. При цьому відбувається порушення цілісності бетонного шару в конструкціях, а також зменшення їх жорсткості та стійкості.

Зміни мікроструктури композицій на основі цементу виникають в процесі нагрівання вже після нагрівання до 105 °С [152]. Однак дія температур до 200–400 °С не викликає суттєвих змін для стійкості цементних композитів. У той же час перевищення температур вище 400 °С, а також час впливу підвищених температур може спричинити незворотні зміни в бетоні та руйнування конструкцій. При підвищенні температури вище 400 °С виникають теплові несумісності між заповнювачем і цементною матрицею, що призводить до поширення мікротріщин в контактній зоні «цементний камінь-заповнювач» [159], і є однією з причин втрати міцності. За цих температур відбувається розкладання гідроксиду кальцію [129]. У результаті швидкого процесу регідrataції вапна (при охолодженні конструкцій водою або коли вони піддаються впливу вологості), відбувається утворення портландиту, що призводить до розширення, появи тріщин та втрати міцності [142]. Подальше підвищення температури призводить до другої фази розкладання гелю C–S–H при 560 °С та утворення β -C₂S при 600–800 °С, а також до розкладання слабокристалізованого CaCO₃ до CaO та CO₂. Температура 600 °С є критичною для бетону, що призводить до істотного збільшення тріщин, зростання пористості, значних втрат міцності, в результаті чого бетон втрачає свою несучу здатність [149].

При дії підвищених температур на конструкції з високоміцного бетону може спостерігатися вибухове розщеплення, що пов'язане з відривом

поверхневих шарів бетону [144], які захищають арматуру, після чого вона зазнає прямого нагріву та призводить до зниження структурної цілісності. Суворі вимоги щодо забезпечення вогнестійкості конструкцій, змушені розробляти нові рішення для підвищення термомеханічних властивостей існуючих матеріалів на основі цементу для проектування термостабільного високоміцного бетону. Згідно ДСТУ Б В.2.7-249:2011 жаростійкі бетони призначені для виробництва збірних бетонних та залізобетонних виробів і конструкцій, монолітних і збірно-монолітних споруд, що застосовуються при експлуатаційних температурах до 1800° С.

Бетон забезпечує надійний захист армуючої сталі (яка чутлива до високої температури), однак через її теплопровідність відбувається нелінійний розподіл температури в бетонному елементі [112]. В результаті теплові перехідні процеси поступово поширюються всередині бетонного елемента, що призводить до значних теплових градієнтів і, таким чином, спричиняючи небажану шкоду бетону [159]. Стійкість бетону в умовах підвищених температур обумовлюється його неоднорідністю (складається з цементної матриці та заповнювачів) і залежить не тільки від реакції окремих компонентів, але і від взаємодії між цими компонентами. Тому погіршення механічних та фізичних властивостей бетону залежить від окремих фізико-хімічних змін цементного каменю та заповнювачів, а також від (термічної) несумісності між заповнювачем та цементною матрицею, що його оточує [118]. Тому для забезпечення задовільної термостійкості композитів на основі цементу, що працюють в умовах підвищеної температури або піддаються впливу підвищених температур, склад бетону, включаючи пропорції та складові, є ключовим фактором при проектуванні матеріалу [112].

Максимальна температура, що витримується конструкціями, залежить, від вогнестійкості і термостійкості заповнювачів і тонкомелених добавок. У якості заповнювачів застосовують матеріали, що мають достатню вогнестійкість і термостійкість, наприклад шамот, базальт, доменний шлак,

туфи. В якості в'язучих використовують рідке скло, глиноземистий і високоглиноземний цемент, периклазовий цемент, фосфатне в'язуче. Тип в'язучої речовини та наповнювачів для жаростійкого бетону вибирають з урахуванням температури експлуатації конструкції.

До таких в'язучих належать лужні алюмосилікатні в'язучі, високі характеристики яких (значна міцність, жаростійкість тощо) обумовлені можливістю синтезу в складі новоутворень цеолітоподібних сполук, що визначають необхідні спеціальні властивості штучного каменю. Недоліком зазначених в'язучих є підвищена вартість, обумовлена головним чином значною енергоємністю базового алюмосилікатного компоненту метаклаоліну. Подібність хімічного складу метаклаоліну та продукту золотиділення, поряд із доцільністю синтезу штучних цеолітів на основі паливних зол, дозволяє передбачити можливість заміни метаклаоліну, що сприятиме підвищенню ефективності матеріалів на основі лужних алюмосилікатних в'язучих одночасно з вирішенням екологічних проблем утилізації відходів теплоенергетичної галузі [48].

Авторами [11, 63] одержано жаростійкі теплоізоляційні матеріали на основі гідросилікатів кальцію з використанням кремнеземистих, вапняно-кремнеземистих в'язучих, що містять мікрокремнезем та кремнегель, модифікованих натрійвмісними добавками. Підвищена термостійкість матеріалу забезпечується за рахунок створення допоміжних структурних зв'язків між мікроагрегатами гідросилікатів кальцію.

Низькоцементні бетони представляють собою багатокомпонентну композиційну систему і містять у речовинному складі зернистий та тонкодисперсний вогнетривкий заповнювач, кальційалюмінатний цемент з вмістом оксиду алюмінію понад 70 %, хімічні, мінеральні та органо-мінеральні добавки, які за рахунок дефлокуляції цементної складової та пластифікації бетонних мас забезпечують низьку водопотребу сумішей і необхідні реологічні властивості бетонних мас, сприяють їх ущільненню і

формуванню міцної структури композиту в умовах тверднення і термічного нагріву [19, 129].

Існують різні методи підвищення термічної стійкості цементних бетонів, що полягають в використанні певних заповнювачів, поліпропіленової фібри, нанесення поверхневих покриттів та введенні активних мінеральних добавок [159]. Термостійкість цементної матриці регулюється багатьма факторами, серед яких найважливішими є водоцементне відношення, співвідношення CaO/SiO_2 , а також кількість портландиту. Камінь, що характеризується низьким співвідношенням CaO/SiO_2 та низьким вмістом гідроксиду кальцію, є основою для отримання термостійкої цементної матриці [112]. Для надання бетону на портландцементі необхідної стійкості до дії високих температур в його склад вводять тонкодисперсні добавки, що містять активний аморфний кремнезем, який здатний зв'язувати оксид кальцію при температурі 700–900°C завдяки реакціям в твердому стані. В якості добавок застосовують пемзу, золу ТЕС, шамот, доменний гранульований шлак.

Введення активних мінеральних добавок, таких як зола-виношення або гранульований доменний шлак, сприяє підвищенню міцності при температурах до 400 °C, а також мінімізації втрати міцності до 600 °C порівняно з звичайним портландцементним бетоном. Крім того, внаслідок пуццоланової активності мінеральних добавок, що призводить до отримання додаткової кількості C–S–H фаз зі зниженням кількості гідроксиду кальцію, спостерігається зменшення поверхневих тріщин бетонів, загальної пористості, зниження ризику вибухового руйнування [99].

Разом з тим, введення підвищеної кількості мінеральних компонентів може спричинити сповільнення набору ранньої міцності. У роботі [76] запропоновано механо-хімічну активацію портландцементу з мінеральними компонентами з підвищеним вмістом Al_2O_3 та комплексними хімічними додатками поліфункціональної дії модифікованих багатокомпонентних портландцементних в'язучих для жаростійких матеріалів з покращеними

термомеханічними властивостями за рахунок направленої формувальності в продуктах гідратації AF_m -фаз, які обумовлюють підвищені експлуатаційні характеристики жаростійких матеріалів та розширюють область їх використання. Модифікування мономінерального каменю C_3S метакаоліном забезпечує стійкість цементного каменю при нагріванні і після охолодження за рахунок формувальності в складі продуктів тверднення гідрогеленіту, замість портландиту.

Останнім часом проводять дослідження з використання наноматеріалів, що підвищують термічну стійкість цементних композитів. Використання цих наноматеріалів сприяє зростанню ефективності, порівняно з різними матеріалами мікрорівня [19, 45]. Наноматеріали впливають на властивості цементних матеріалів двома способами: за рахунок гідратаційного ефекту та нуклеаційного ефекту [127, 143]. Завдяки невеликому розміру наноматеріали виступають зародками під час процесу гідратації, прискорюючи його з утворенням гелю $C-S-H$ навколо наноматеріалів [121]. Крім хімічного впливу, наноматеріали виявляють особливий фізичний ефект: так званий нанопоповнюючий ефект, що призводить до ущільнення порової системи [130, 131]. В результаті структура пор стає більш компактною та однорідною, що зумовлює значне поліпшення механічних властивостей та довговічності. Однак, включення наноматеріалів може призвести до помітного зменшення консистенції [113, 148] та небажаного ущільнення (внаслідок високого співвідношення площі поверхні до об'єму наночастинок) цементної матриці, що призводить до формування матриці цементу з низькою проникністю, збільшуючи здатність до тріщиноутворення в процесі термічного навантаження [67, 78, 79].

Отже, перспективним шляхом підвищення термічної стійкості відповідальних залізобетонних конструкцій є управління процесами структуроутворення цементного каменю в напрямку забезпечення стабільності експлуатаційних властивостей в умовах підвищених температур, що включає насамперед синтез гідратних новоутворень з підвищеною

термостабільністю, що досягається комплексним модифікуванням цементуючої матриці високоміцного бетону мікро- та нанодисперсними мінеральними добавками у поєднанні з суперпластифікатором.

1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза

Вирішення завдань підвищення ефективності виготовлення залізобетонних виробів та конструкцій спрямовано на оптимізацію технологічних режимів та зменшення енергетичних витрат за рахунок освоєння енергоощадних технологій. При цьому виникає необхідність оперативного коректування складів та режимів тверднення бетонів для забезпечення регламентованих показників властивостей та економічності.

Розвиток наукових досягнень в області спрямованого формування структури і властивостей бетонів дозволяє сформулювати шляхи вдосконалення технології виробництва збірного бетону та залізобетону, найбільш перспективним з них є впровадження безпрогрівної або малопрогрівної технології. Для переходу на безпропарювальні технології необхідно розробити програму для підбору та коректування складів бетону з хімічними та мінеральними добавками, а також використання спеціальних в'язучих систем, що забезпечують скорочення витрат енергії та ресурсів у технології залізобетонних виробів, та одержання нормованих властивостей бетону. Тому для одержання швидкотверднучих бетонів виникає гостра необхідність у впровадженні надшвидкотверднучих цементів з нормованою міцністю у віці однієї доби та менше.

Узагальнення результатів досліджень у галузі технології виробництва залізобетонних конструкцій, а також даних детального і всебічного аналізу літературних і патентних матеріалів вітчизняних та зарубіжних вчених,

присвячених розробленню модифікованих швидкотверднучих в'язучих та високоміцних будівельних композитів на їх основі, наномодифікуванню структури цементуючої матриці, а також закономірностей розвитку тріщин у бетонах (Ю. М. Баженов, В.Г. Батраков, І.В. Барабаш, В.М. Вировой, В.І. Гоц, Л. Й. Дворкін, В.М. Дерев'янка, І.Н. Дудар, В.І. Калашніков, В.П. Кузьміна, О. А. Кучеренко, Н.В. Кондратьєва, П.В. Кривенко, Я. Малолепши, А.В. Мішутін, М.І. Нетеса, А.А. Плугін, К.К. Пушкарьова, Р.Ф. Рунова, М. А. Саницький, К. Скрівенер, Х.С. Соболев, С.Й. Солодкий, В.І. Соломатов, К. Соболев, В.П. Сопов, С.М. Толмачев, О.В. Ушеров-Маршак, Л. Чарнецки, Л.О. Шейніч, М.В. Шпирько, Й. Штарк та ін.), свідчить, що прискорення тверднення бетону вимагає інноваційного підходу до створення цементної матриці, який базується на регулюванні процесами структуроутворення на поліструктурних рівнях, включаючи нанорівень, шляхом проектування надшвидкотверднучих портландцементних композицій з високою ранньою та марочною міцністю, що дає змогу забезпечити підвищення швидкості тверднення та функціональних характеристик, а також отримати нові за складом та якісно відмінні за структурою та властивостями конструкційні матеріали в різних умовах тверднення.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика вихідних матеріалів

Необхідні фізико-механічні показники надшвидкотверднучих портландцементних композицій забезпечуються використанням в'язучих, хімічних та мінеральних добавок, які за показниками якості відповідають вимогам діючих нормативних документів. Як в'язуче для розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій використовували портландцемент загальнобудівельного призначення ПЦ І-500Р-Н ПрАТ "Івано-Франківськцемент". Хімічний склад портландцементного клінкеру ПрАТ "Івано-Франківськцемент" представлений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад портландцементного клінкеру ПрАТ "Івано-Франківськцемент"

Вміст оксидів, мас.%						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
21,19	5,18	4,11	67,16	0,76	0,82	0,79

Згідно з ДСТУ Б В 2.7-46:2010 для портландцементів встановлено вимоги за основними фізичними та механічними властивостями – тониною розмелювання, термінами тужавіння та міцністю. Крім цього, важливим показником портландцементів для збірних залізобетонних виробів є активність при пропарюванні. Як показали результати випробувань (таблиця 2.2), використаний портландцемент ПЦ І-500Р-Н задовольняє вимоги діючих стандартів щодо тонини розмелювання, термінів тужавіння,

ранньої та стандартної міцності для марки 500. Питома міцність використаного портландцементу через 2 доби тверднення в нормальних умовах становить 0,6. Активність при пропарюванні портландцементу ПЦ І-500Р-Н – 37,2 МПа (коефіцієнт ефективності $K_p = R_p / R_{c28} = 0,7$), що відповідає І групі за ефективністю пропарювання.

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні властивості портландцементу ПЦ І-500Р-Н

$S_{\text{пит.}}$, м ² /кг	A_{008} , %	НГТ, %	Терміни тужавіння, хв		Границя міцності при стиску, МПа, у віці, діб			
			початок	кінець	2	7	28	після пропарю вання
350	31,5	21,0	150	230	32,4	47,2	53,5	37,2

Важливе значення у формуванні ранньої міцності в'язучих має їх дисперсність. Аналіз гранулометричного складу портландцементу ПЦ І-500Р-Н показав, що об'ємний середній діаметр частинок $D[4;3]$ відповідає 19,2 мкм, а максимум середнього діаметра $D[3;2]$ за розподіленням питомої поверхні становить 4,64 мкм (рисунок 2.1). Об'ємному вмісту 10, 50 та 90% відповідають діаметри частинок 2,7; 14,7 та 42,0 мкм відповідно.

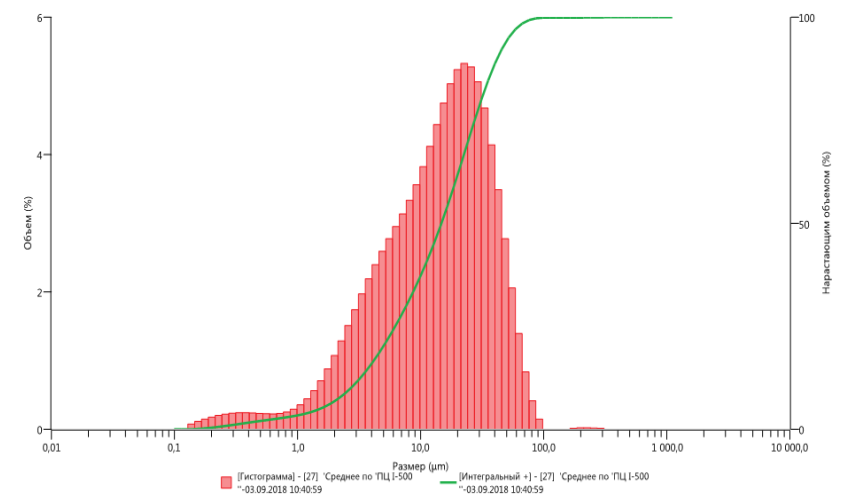


Рисунок 2.1 – Гранулометричний склад портландцементу ПЦ І-500Р-Н

Як додаткові цементуючі матеріали для розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій для бетонів, що працюють в умовах підвищених температур, використовували мікрокремнезем (Elkem Microsilica Grade 940-U), метакаолін ТзОВ «Мета Д», зола-виношення Бурштинської ТЕС. Хімічний склад активних мінеральних добавок пуцоланічної дії наведений в таблиці 2.3 і задовольняє вимоги ДСТУ Б В.2.7-128-2006.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад мінеральних добавок

Мінеральна добавка	Вміст оксидів, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
Зола-виношення	52,12	24,05	13,74	3,65	2,38	0,95	3,11
Метакаолін	53,42	43,80	0,75	0,45	0,30	-	-
Мікрокремнезем	94,47	0,43	2,28	0,78	0,87	-	1,17

Основним компонентом золи-виношення є скловидна алюмосилікатна фаза. Розподіл частинок за фракціями золи-виношення Бурштинської ТЕС зображено на рисунку 2.2. За показниками дисперсності дана зола-виношення відноситься до класу А ($S_{\text{пит}} > 300 \text{ м}^2/\text{кг}$, вміст зерен фракції D_{50} і D_{90} становить 23,77 і 81,68 мкм відповідно) (таблиця 2.4).

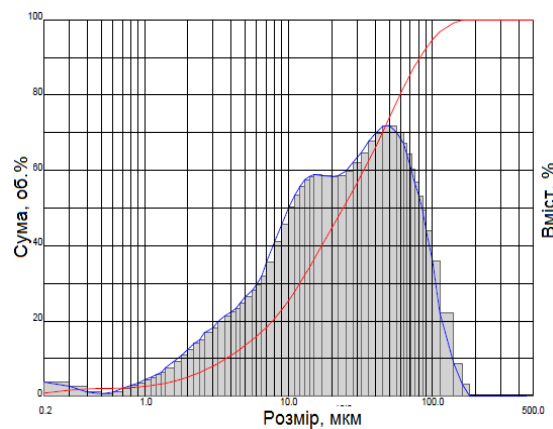


Рисунок 2.2 – Гранулометричний склад золи-виношення

Високоактивний метакаолін (ВМК) – це пуцоланова добавка, одержана термічною обробкою каоліну $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, яка характеризується високою пуцолановою активністю [116]. Одержання ВМК відбувається у контрольованих умовах, отриманий продукт характеризується однорідним гранулометричним розподілом частинок за фракціями, питомою поверхнею, кольором та хімічним складом. Згідно з даними гранулометричного аналізу (рисунок 2.3) розподіл зерен за фракціями метакаоліну виражається широким діапазоном розмірів від 0,1 до 200 мкм, а максимум на диференційній кривій розподілу частинок за розмірами знаходиться в межах 10-20 мкм. Ефективні діаметри D_{10} , D_{50} та D_{90} становлять відповідно 3,65; 17,13 та 73,67 мкм, при середньому діаметрі частинок 30,01 мкм (таблиця 2.4). Питома поверхня метакаоліну 1360 $\text{м}^2/\text{кг}$.

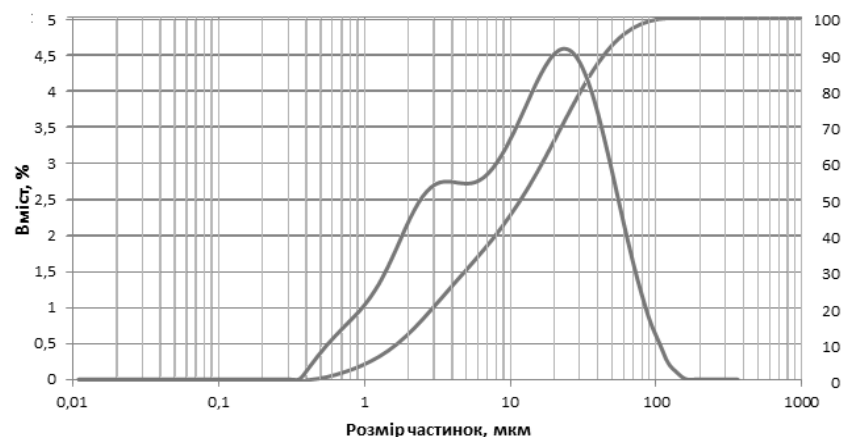


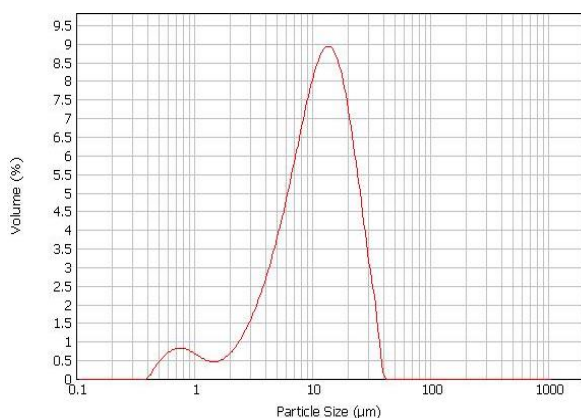
Рисунок 2.3 – Гранулометричний склад високоактивного метакаоліну

Для модифікування структури цементного каменю у роботі використано добавку мікрокремнезему Elkem Microsilica Grade 940U. Мікрокремнезем (МК) – добавка, що містить дрібнодисперсні аморфні сферичні частинки діоксиду кремнію (SiO_2), які утворюються при виробництві кремнію або феросиліцію. Вміст скловидної фази SiO_2 становить 94,47%. Середній розмір частинок становить 0,15–0,20 мкм, а питома поверхня – 19 000 $\text{м}^2/\text{кг}$.

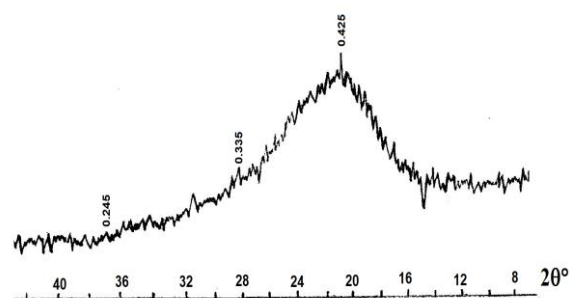
Таблиця 2.4 – Показники фракційного складу мінеральних добавок

Добавка	<10 мкм, %	<20 мкм, %	<50 мкм, %	D ₁₀ , мкм	D ₅₀ , мкм	D ₉₀ , мкм
Зола-винесення	25,47	44,86	87,66	3,66	23,87	81,59
Метакаолін	30,73	55,22	81,15	3,65	17,13	73,67
Мікрокремнезем	100,0	100,0	100,0	0,07	0,15	0,30

Згідно з даними лазерної гранулометрії частинки мікрокремнезему характеризуються ефективними діаметрами D₁₀; D₅₀ і D₉₀ відповідно 0,07; 0,15 та 0,4 мкм. Разом з тим, при зберіганні дрібнодисперсні частинки агрегуються в агрегати ефективними діаметрами D₁₀; D₅₀ і D₉₀ відповідно 3,3; 11,2 та 23,9 мкм (рисунк 2.4, а). Згідно з даними рентгенофазового аналізу мікрокремнезем характеризується аморфною структурою, про що свідчить дифракційне гало з незначними дифракційними максимумами, що належать β-кварцу (d/n = 0,425; 3,35; 2,45 нм) (рисунк 2.4, б). Насипна густина мікрокремнезему в ущільненому стані становить 320 кг/м³.



а



б

Рисунк 2.4 – Гранулометричне розподілення частинок за розміром (а) та дифрактограма (б) мікрокремнезему

Пуцоланова активність досліджуваних добавок золи-винесення, метакаоліну і мікрокремнезему, визначена за кількістю поглинутого оксиду кальцію з його насиченого розчину через 28 діб [12, 13], становить 45,9; 189,5

та 331,6 мг СаО/г добавки відповідно. Оцінкою пуцоланової активності мінеральних компонентів згідно з EN-450, за коефіцієнтом пуцолановості $K_{\text{пуц}}$, який базується на визначенні фізико-механічних показників і розраховується як співвідношення міцності при стиску дрібнозернистого бетону ($\text{Ц:П} = 1:3$; $\text{В/Ц}=0,5$), в якому 25% портландцементу замінено на мінеральну добавку, до міцності дрібнозернистого бетону без добавки. Коефіцієнт пуцолановості золи-винесення через 28 та 90 діб становить відповідно 0,81 та 0,86 і відповідає вимогам нормативного документа. Для добавок метакіоліну та мікрокремнезему, які характеризуються підвищеною питомою поверхнею, значення показників пуцолановості $K_{\text{пуц}28}$ перевищують показники золи-винесення на 31-39% і становлять 1,06 та 1,13 відповідно, показник $K_{\text{пуц}90}$ зростає до 1,10 та 1,19 відповідно.

На основі комплексного аналізу показників хімічного та дисперсного складу, а також пуцоланової активності встановлена відповідність активних мінеральних добавок золи-винесення та мікрокремнезему вимогам ДСТУ Б В.2.7-128-2006 та ДСТУ Б В.2.7-176:2008 щодо їх використання для модифікування портландцементних систем.

Для випробування портландцементів та розроблених надшвидкотверднучих портландцементних композицій використано монофракційний пісок згідно з ДСТУ Б В.2.7-189:2009. Як дрібні заповнювачі для проектування складу та приготування бетонних сумішей високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій використано природні кварцові піски Жовківського, Миколаївського, Ясинецького родовищ Львівської області, Рогатинського та родовища Побережжя Івано-Франківської області, показники якості яких наведені в таблиці 2.5.

Показники якості кварцових пісків відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95 для важких бетонів. Пісок Миколаївського родовища за вмістом пилюватих та глинистих домішок не відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95 для конструктивних бетонів. Пісок родовища

Побережжя за вмістом зерен 5-10 мм не відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95 для конструктивних бетонів та не містить зерен 0,63-1,25 мм, що створює необхідність коректування його гранулометричного складу.

Таблиця 2.5 – Показники якості дрібних заповнювачів
(ДСТУ Б В.2.7-232:2010)

Пісок	Зерновий склад						Модуль крупності, Мк	Насипна густина, кг/м ³	Воло- гість, %	Вміст глинистих домішок, %
	Діаметр вічок сит, мм									
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16				
	Часткові залишки на ситі, %									
Жовківсь кий	2,1	1,3	1,6	30,3	53,5	11,2	1,92	1482	3,5	0,7
Ясинець- кий	0,4	1,2	1,8	8,4	65,1	11,7	1,39	1423	4,3	0,4
Миколаїв ський	0,7	4,1	5,6	6,5	11,5	66,0	1,51	1390	4,7	2,8
Побереж жя	10	25,5	18,5	-	34,5	18,5	2,40	1453	7,0	0,8
Рогатин- ський	-	1,0	1,7	1,3	85,5	10,1	1,59	1410	5,4	0,9

Аналіз отриманих кривих розсіювання пісків свідчить про те, що піски Рогатинського, Ясинецького та Миколаївського родовищ визначаються високим вмістом дрібних фракцій менше 0,63 мм (рисунок 2.5). Дані піски відносяться до групи дуже дрібних. Криві розсіювання пісків не входять в область, що допускається для бетону. Слід відзначити, що Рогатинський пісок характеризується більшим вмістом зерен 1,25-0,63 та меншим 0,315-0,16 мм порівняно з піском Ясинецького родовища. У той же час, за гранулометричним складом пісок Жовківського родовища та родовища Побережжя відповідають зерновому складу піску для бетонів.

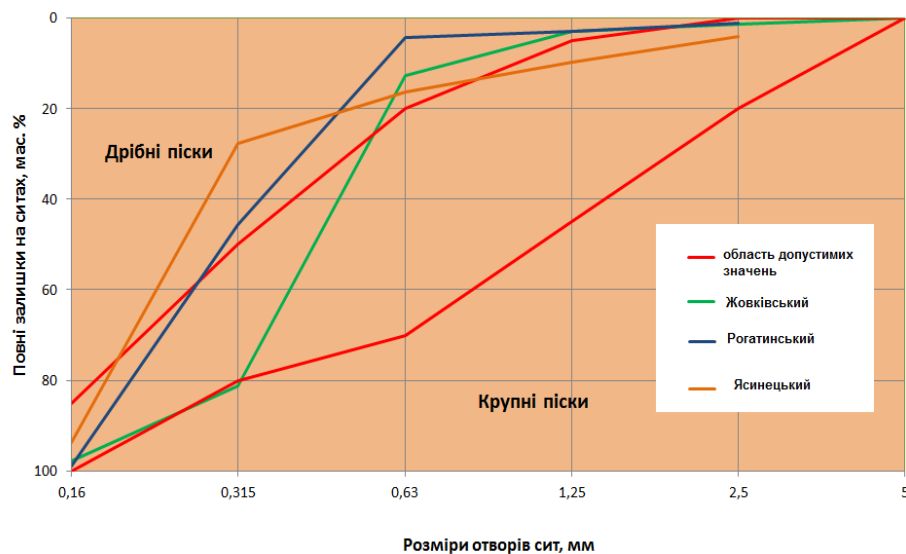
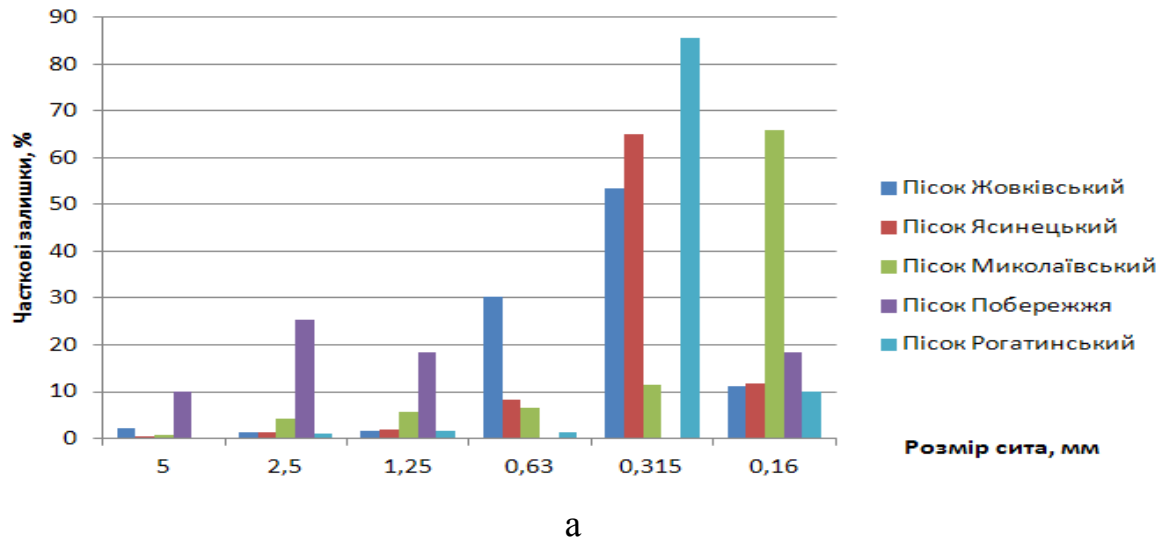
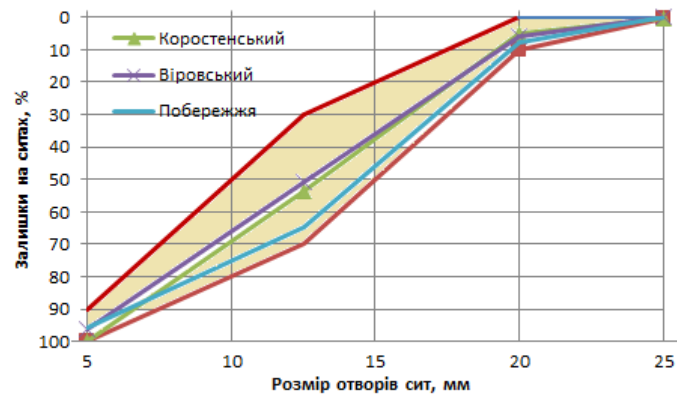
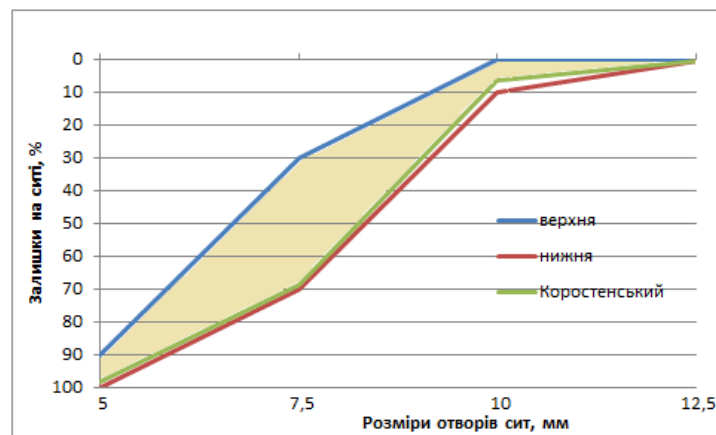


Рисунок 2.5 – Часткові залишки (а) та криві розсіювання дрібних заповнювачів

Як крупний заповнювач використовували гранітний щебінь Королевського родовища фракцій 5-10 та 5-20 мм, Віровського родовища фракції 5-20 мм, гравійний щебінь родовища Побережжя згідно ДСТУ Б В.2.7-71-98, характеристика яких наведена в таблиці 2.6. На рисунку 2.6 представлено криві розсіювання крупних заповнювачів. Використані заповнювачі за зерновим складом відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 для виготовлення бетонів.



а



б

Рисунок 2.6 – Криві розсіювання щебенів фракції 5-20 мм (а) та 5-10 мм(б)

Насипна густина крупних заповнювачів знаходиться в межах 1415–1509 кг/м³, істинна густина – 2,62 г/см³. Найнижчою пустотністю характеризується гравійний заповнювач Побережжя (42,4%) найвищою щебінь Коростенського родовища фракції 5-20 мм (46,0%). За вмістом глинистих та пиловатих домішок, а також зерен пластинчастої (лещадної) та голчатої форми (11-21%) використані заповнювачі відповідають вимогам стандарту ДСТУ Б В.2.7-74-98 для виготовлення важких бетонів. Марка за дробимістю крупних заповнювачів становить 1200.

Як хімічні добавки для проектування надшвидкотверднучих портландцементних композицій використано добавки пластифікуючої групи на основі лігносульфонатів Centrament N3 (MC Bauchemie) – ЛСТ, ефірів полікарбоксилатів MasterGlenium ACE 430 (BASF) – PCE.

Таблиця 2.6 – Показники якості крупних заповнювачів

Родовище	Зерновий склад				Вміст пиловидних і глинистих частинок, %	Вміст зерен пластинча- тої та голчатої форми, %	Насипна густина, кг/м ³	Вологість W, %
	Розмір отворів сит, мм							
	1,25D	D	0,5(d+D)	d				
	Часткові залишки, %							
Коростень (5-20)	0,3	4,5	50,3	44,9	0,02	18,0	1415	0,2
Коростень (5-10)	-	6,3	62,6	29,1	0,1	21,0	1426	2,0
Віровське	-	6,0	44,6	35,7	0,6	11,0	1450	0,8
Побережжя	-	7,6	57,3	30,8	0,25	7,0	1509	3,5

Для прискорення тверднення портландцементу застосовано інноваційний прискорювач тверднення на основі синтезованих гідросилікатів кальцію Master X-SEED 100 (BASF) [28]. Основні технічні характеристики цих добавок наведені в таблиці 2.7.

Поліконденсати лігнінсульфонату/нафталіну сульфонових кислот, що є основою добавки Centrament N3, знаходяться у воді у колоїдному стані і незначно понижують поверхневий натяг води, виявляючи незначну водоредукуючу дію в портландцементних системах, проте їх традиційно використовують як доступну добавку у технологіях товарного бетону, так і збірного залізобетону [24, 86].

MasterGlenium ACE 430 – хімічна добавка пластифікуючої/водоредукуючої групи на основі модифікованих полікарбоксилатів, яка є компонентом системи ZERO ENERGY SYSTEM і призначена для виробництва збірних залізобетонних виробів, дозволяє одержувати бетонні суміші з необхідною рухливістю, при суттєвому зниженні водоцементного відношення, знизити витрату портландцементу, скоротити тривалість і температуру теплової обробки, що забезпечить економію енергоресурсів на теплову обробку виробів [28]. Основою добавки

є ефіри полікарбоксилатів – органічні слабкі електроліти, розчинні в лужному середовищі. Карбоксилатна група COO-Na^+ дисоціює у воді, забезпечуючи негативний заряд вздовж ланцюга, при цьому електронна хмара нерівномірно розподіляється, що зумовлює хімічну полярність бічних ланцюгів і стеричний механізм стабілізації дисперсних систем [42, 107].

Таблиця 2.7 – Технічна характеристика хімічних добавок

Назва добавки	Основа	Колір	Густина, г/см^3	Рівень рН	Дозування, мас.%
Centrament N3	лігносуль- фонати	темно- коричневий	1,13–1,19	3,7–5,7	0,2–1,5
MasterGlenium ACE 430	полікар- боксилат	світло- коричневий	1,04–1,08	3,7–7,5	0,2–2,0
Master X- SEED 100	C-S-H	білий	1,13–1,14	11	1,0–4,0

Прискорювач тверднення Master X-SEED 100 використовують для регулювання структуроутворення портландцементних систем на нанорівні згідно з концепцією Crystal Speed Hardening. Основою добавки є суспензія колоїдних частинок кальцію гідросилікатів – C-S-H [28, 117]. На ІЧ-спектрі добавки спостерігаються смуги поглинання $1058; 452 \text{ см}^{-1}$, які відповідають валентним коливанням зв'язків Si-O-Si, а також смуга 3445 см^{-1} , що відповідає валентним коливанням води (рисунок 2.7, а). Згідно з результатами рентгенофазового аналізу добавки X-SEED 100 основні лінії ($d/n = 0,307; 0,278; 0,229; 1,89$ та ін.) належать стабілізатору колоїдної системи – нітрату натрію (рисунок 2.7, б).

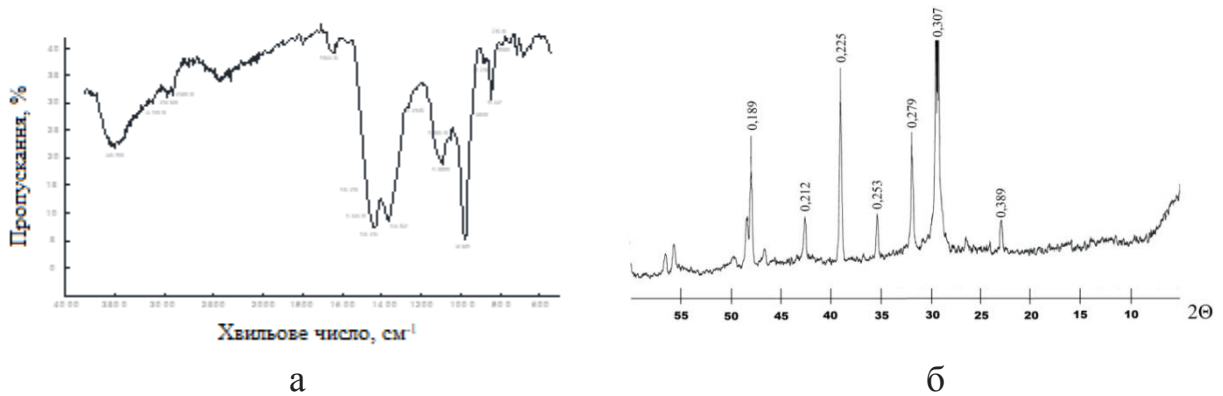


Рисунок 2.7 – ІЧ-спектр (а) та дифрактограма (б) прискорювача X-SEED 100

2.2. Фізико-механічні випробування

Випробування фізико-механічних властивостей портландцементів та надшвидкотверднучих портландцементних композицій проводили згідно з ДСТУ Б.В. 2.7-185:2009, ДСТУ Б.В. 2.7-187:2009 та ДСТУ Б.В. 2.7-188:2009 і полягали у визначенні нормальної густоти та термінів тужавлення цементного тіста, водовідділення, границі міцності при стиску та згині, тонини помелу в'язучих. Випробування портландцементних композицій проводили на зразках 2х2х2 см та 4х4х16 см.

Введення хімічних добавок до складу портландцементних композицій та бетонних сумішей на їх основі, визначення їх ефективності та ефектів дії проводили згідно з ДБН В.2.7-64-97, ДСТУ Б В.2.7-69-98 та ДСТУ Б В.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001) [33]. Фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів на основі модифікованих портландцементних композицій визначали згідно з ДСТУ Б.В. 2.7-187:2009.

Проектування складів модифікованих високоміцних бетонів проводили методом абсолютних об'ємів з врахуванням рекомендацій ДСТУ Б В.2.7-215:2009 та ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Жорсткість бетонної суміші визначали за ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Зразки бетону виготовляли за ДСТУ Б В.2.7-214:2009 у металевих формах-кубах розміром 100х100х100 мм.

Зразки тверднули в нормальних умовах (температура 20 ± 3 °C, відносна вологість 95+5%), а також в умовах низькотемпературної теплової обробки в універсальній пропарювальній камері КПУ-1. Після виготовлення зразки піддавали тепловій обробці за режимом 1+8+1 год. Температура ізотермічного прогріву складала 60, 50, 40 °C.

Випробування бетонів на міцність при стиску проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельно-технічні властивості модифікованих високоміцних бетонів (середня густина, водопоглинання, пористість, водонепроникність) визначали відповідно до ДСТУ Б В.2.7-170:2009. Характер пористої структури розроблених бетонів визначали за показником динаміки водопоглинання зразків через 1 та 28 діб тверднення в нормальних умовах, використовуючи метод дискретного зважування згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Призмову міцність, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона високоміцних бетонів визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2009 на зразках-призмах розміром 100x100x400 мм. Деформації усадки розроблених бетонів визначали на зразках 40x40x160 мм за допомогою компаратора з індикатором годинникового типу, в торцях яких були закладені металеві анкери [22]. Границю тріщиностійкості визначали за критичними значеннями умовного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{sc}^* при максимальних навантаженнях згідно з ДСТУ БВ 2.7-227:2009 на зразках 40x40x160 мм з початковим надрізом при випробуванні на згин.

Випробування корозійної стійкості класу впливу навколишнього середовища ХА модифікованих високоміцних бетонів проводили згідно з ДСТУ Б ГОСТ 27677:2011 шляхом порівняння міцності на стиск та згин зразків, виготовлених з бетонної суміші, з якої мокрим розсіюванням видалена крупна фракція, поміщених в агресивне середовище натрію сульфату (концентрація $SO_4^{2-} = 10$ г/л), з аналогічними показниками зразків, які зберігались в неагресивному середовищі (питна вода).

Згідно ДСТУ Б В.2.7-249:2011 визначення міцності на стиск бетону, що піддається дії підвищених температур проводять у проектному віці;

проміжному віці; та відпускну. Міцність бетону на стиск в проектному віці визначають після режимів тверднення (температура $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ та відносна вологість 90-100%) і сушіння (48 год при температурі $105\pm 5^{\circ}\text{C}$). Відпускну міцність бетону і міцність бетону в проміжному віці визначають після режимів тверднення через 7 діб. Після цього зразки бетону нагрівали в камерній електричній печі типу СНОЛ зі швидкістю підйому температури $150^{\circ}\text{C}/\text{год}$, з витримуванням при необхідній температурі 4 год і охолодженням разом з піччю до кімнатної температури.

Визначення стираності розроблених високоміцних бетонів, що піддаються дії підвищених температур, проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-212:2009 на крузі стирання ЛКИ-3. Як абразивний матеріал використовували монодисперсний пісок з модулем крупності $M_k=2,3$.

2.3. Фізико-хімічні методи дослідження

Гранулометричний склад порошкоподібних дисперсних систем досліджували за допомогою лазерного аналізатора Master Sizer 3000, принцип дії якого ґрунтується на розсіюванні і дифракції електромагнітних хвиль. За допомогою диспергуючого пристрою аналізовані частинки подаються у вимірювальну комірку і проходять крізь камеру, куди подається лазерний промінь. Світло, розсіяне пропорційно розміру частинок, через лінзу фокусується і спрямовується на детектор, за розподіленням розсіяного світла розраховують розподілення частинок за розмірами.

Хімічні склади використаного портландцементу, активних мінеральних добавок визначали з допомогою рентгеноспектрометра ARL 9800 XP. Калориметричне вивчення гідратації портландцементів з ультрадисперсними добавками проводили на диференційному калориметрі Tonicall. Теплові ефекти фіксуються, а за допомогою комп'ютерної програми

«Термокінетика» обробляються відповідно до цілей експерименту для забезпечення необхідної інформації у вигляді термокінетичних залежностей швидкості тепловиділення – $dQ / dt = f(\tau)$ і теплоти гідратації – $Q = f(\tau)$ з подальшою їх обробкою.

Питоме тепловиділення цементу в бетоні q , кДж/кг, за даний проміжок часу визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-225:2009 за формулою :

$$q = \frac{C_{\text{заг}}}{m_{\text{ц}}} (t - t_0),$$

де $C_{\text{заг}}$ – теплоємність бетонної суміші, кДж/К;

$m_{\text{ц}}$ – маса цементу, кг;

t_0 – початкова температура бетонної суміші, К;

t – температура бетону в кінці даного проміжку часу, К.

Теплоємність бетонної суміші обчислюється за формулою, кДж/К:

$$C_{\text{заг}} = 0,84 \cdot m_{\text{ц}} + 3,76 m_{\text{в}}$$

де $m_{\text{ц}}$ – маса цементу, кг; $m_{\text{в}}$ – маса води, кг

Фазовий склад продуктів гідратації портландцементних композицій визначали за допомогою методу рентгено-фазового аналізу методом порошків на дифрактометрі ДРОН-2.0 при $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні [23]. Вивчення структури добавок проводили з використанням методу ІЧ-спектрального аналізу за коливальними спектрами згідно з ДСТУ Б В.2.7-174:2008 на спектрометрі FT-IR-Nicolet 8700A.

Дослідження особливостей мікроструктури каменю на основі ПЦ І-500Р-Н та надшвидкотверднучих портландцементних композицій після теплової обробки, тверднення в нормальних умовах, тверднення, сушіння та дії підвищених температур, а також матриці високоміцних бетонів проводили за допомогою растрових електронних мікроскопів РЕМ-106И і JEOL JSM-T220A. На поверхню свіжих сколів зразків для збільшення контрасту рельєфу наносили тонку електропровідну плівку міді шляхом вакуумного термічного випаровування на вакуумному універсальному пості ВУП-5 [23].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ НАДШВИДКОТВЕРДНУЧИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ

3.1. Оцінка впливу хімічних та мінеральних модифікаторів на кінетику тверднення портландцементів

Для одержання надшвидкотверднучих портландцементних композицій із заданими будівельно-технічними властивостями необхідно забезпечити мінімальний міжзерновий простір, а також встановити закономірності в регулюванні параметрів цементних систем на стадії взаємодії цементу з водою. Хімічні процеси, які визначають ці властивості, обумовлені силами, що діють на межі розділу фаз. Зазначені взаємодії формують основні властивості дисперсних систем такі, як в'язкість, рухливість, структуроутворення. Грунтуючись на сучасних уявленнях фізико-хімії поверхневих явищ і теорії контактних взаємодій, структура і будова поверхнево-активних речовин визначають процеси їх адсорбції (хемосорбції) на міжфазних поверхнях [42]. Основними цілями введення модифікаторів у цементні системи є зниження в'язкості цементно-водних суспензій для покращення технологічних властивостей бетонних сумішей; зміна структури сформованого цементного каменю і бетону з метою збільшення їх міцності, регулювання швидкості процесів гідратації цементів і тверднення бетонів [39, 40].

При введенні пластифікуючих добавок стає можливим використання пластичних бетонних сумішей, що підвищує легковкладальність бетону, дає змогу знизити витрати на віброущільнення або на використання пригрузу. В технології збірних залізобетонних виробів при використанні жорстких

бетонних сумішей введення пластифікаторів зумовлює значне зниження водоцементного відношення та при термосному витримуванні швидший набір необхідної передаточної міцності. У зв'язку з цим, досліджено водоредукуючу дію хімічних добавок та їх вплив на процеси раннього структуроутворення. Як видно з таблиці 3.1, введення 0,5 мас.% пластифікатора ЛСТ знижує водопотребу портландцементу лише на 8,1%, в той час як полікарбоксилатний суперпластифікатор забезпечує зниження водопотреби при досягненні рівнорухливої консистенції на 21,3-24,6%.

Таблиця 3.1 – Вплив добавок-модифікаторів на терміни тужавіння портландцементу ПЦ І-500Р-Н (тісто 1:0)

Вид та вміст добавки, мас.%	НГТ, %	Відстань між частинками, мкм	Терміни тужавіння, год-хв	
			початок	кінець
б/д	30,5	1,94	2-30	3-50
0,5% ЛСТ	28,0	1,78	5-30	9-20
0,8% PCE	24,0	1,54	3-20	5-50
1,5% PCE	23,0	1,46	4-10	8-10
2,0% X-SEED	29,0	0,15	1-40	2-50
1,5% PCE+2,0% X-SEED	20,5	0,11	2-00	3-30
0,8% PCE+2,0% X-SEED	21,0	0,12	1-50	3-00

Проектування матриці високоміцного бетону базується на забезпеченні щільної упаковки частинок на початковій стадії. Вихідне водоцементне відношення характеризує величину простору між зернами в цементному тісті. Зменшення цього простору зумовлює швидше заповнення його продуктами гідратації та інтенсивний набір міцності цементного каменю, що важливо при безпропарювальних технологіях збірного залізобетону. Як показали розрахунки початкової відстані між частинками в цементному тісті нормальної густоти, що базується на залежності від питомої

поверхні і водовмісту при рівномірному розподіленні твердої та рідкої фази [129], при модифікуванні портландцементу ПЦ І-500Р-Н лігносульфонатним пластифікатором та полікарбоксилатним суперпластифікатором розрахункова відстань між частинками зменшується до 1,78 та 1,46 мкм відповідно, у той як у тісті без добавок відстань становить 1,94 мкм. Введення нанодисперсного модифікатора X-SEED сприяє більшою мірою заповненню міжзернового простору. Так, використання добавки на основі нанорозмірних частинок гідросилікатів кальцію у кількості 2,0 мас.% забезпечує зниження початкової відстані в 12 раз (до 0,15 мкм) порівняно з портландцементним тістом без добавок.

Незважаючи на зменшення відстані між частинками, початок тужавіння цементного тіста в присутності добавок пластифікуючої групи відтягується особливо при введенні лігносульфонату, коли початок відтягується на 3 год. Суттєвіше зменшення водопотреби при введенні підвищеної кількості полікарбоксилатного суперпластифікатора до 1,5 мас.% спричиняє гальмування процесів раннього структуроутворення. У той же час, в присутності наноприскорювача X-SEED процеси структуроутворення прискорюються на 50 хв. При цьому скорочується інтервал між початком та кінцем тужавіння, що сприяє прискореному набору міцності в нормальних умовах. Слід відзначити, що портландцементні системи, модифіковані нанодобавкою X-SEED, за термінами тужавіння відповідають вимогам ДСТУ Б В 2.7-46:2010.

Дослідження міцнісних показників цементного каменю свідчать, що введення добавок пластифікуючої групи сповільнює набір ранньої міцності портландцементу ПЦ І-500Р-Н (рисунок 3.1). Проте при модифікуванні добавкою РСЕ міцність каменю через 12 год зростає в 1,4 рази порівняно з каменем на основі ПЦ І-500Р-Н без добавок. Результати визначення міцності каменю, модифікованого наномодифікатором, свідчать про їх суттєвий вплив на процеси зародкоутворення в цементуючих системах та визначають час переходу матеріалу з стану суспензії до затверділого каменю за рахунок

однорідного зародкоутворення в міжпоровому просторі. Так, через 8 год міцність каменю при введенні синтетичних наночастинок C-S-H добавки X-SEED зростає у 2,2 рази порівняно з каменем без добавок. Через 1 добу тверднення в нормальних умовах показник відносної міцності наномодифікованого каменю (R_{c1}/R_{c28}) становить 0,57; а через 2 доби цей показник досягає значення 0,85.

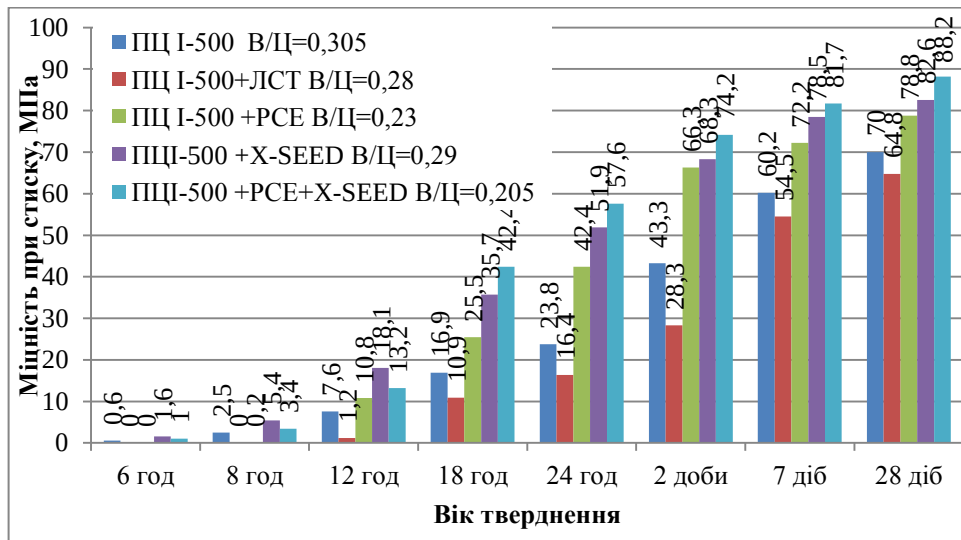


Рисунок 3.1 – Міцність портландцементних композицій

Слід відзначити, що у ранній період (до 12 год) міцність каменю, модифікованого комплексною нанодобавкою на основі PCE+X-SEED, знижується на 27-34% порівняно з каменем з монодобавкою-прискорювачем X-SEED. Разом з тим, через 18 год спостерігається інтенсифікація процесів структуроутворення, в результаті чого міцність портландцементної композиції з комплексною добавкою PCE+X-SEED зростає порівняно з міцністю каменю на основі портландцементу, модифікованого добавкою X-SEED, на 18,4%. Портландцементна композиція, модифікована комплексною добавкою на основі PCE+X-SEED, характеризується швидким темпом набору міцності, про що свідчить показник питомої міцності через 2 доби $R_{c2}/R_{c28} = 0,90$.

Ефективність дії добавок оцінювали за трьома основними групами показників: технологічними, фізико-механічними та економічними. Для

визначення ефективності дії добавок на кінетику набору ранньої міцності вивчено вплив модифікуючих добавок різної природи на міцнісні показники цементного каменю через 1 добу тверднення і кількісно оцінено їхню водоредукуючу дію.

Виходячи з одержаних даних, розраховано два технологічні показники, запропонованих в [5]. Міцнісний коефіцієнт, що характеризує активність цементного тіста з рівнопластичних сумішей в присутності модифікатора через 1 добу, рівний:

$$K_c = R_{cm} / R_{cn}, \quad (3.1)$$

де R_{cm} та R_{cn} – добова міцність модифікованого та немодифікованого каменю відповідно;

Комплексний коефіцієнт набору добової міцності цементного каменю з добавкою-модифікатором з врахуванням водоредукування, який забезпечує повнішу оцінку ефективності:

$$K_e = K_c \cdot B_d, \quad (3.2)$$

де $B_d = (B/C)_n / (B/C)_m$

$(B/C)_n$ та $(B/C)_m$ – водоцементне відношення відповідно модифікованого та немодифікованого тіста.

Показники міцнісного коефіцієнта через 12 год досягають максимального значення 2,38 при використанні наномодифікатора X-SEED, в той же час через 24 год активізуються процеси раннього структуроутворення в обмеженому міжзерновому просторі каменю, модифікованого комплексним модифікатором PCE+X-SEED, і міцнісний коефіцієнт перевищує коефіцієнт для портландцементу монодобавкою-прискорювачем X-SEED в 1,11 рази (рисунок 3.2). Коефіцієнт ефективності K_e , який враховує як прискорюючу, так і пластифікуючу дію добавок, має найбільше значення для зразків з комплексною добавкою PCE+X-SEED як через 12 год, так і через 24 год та становить відповідно 2,59 і 3,62. Ці дані вказують на визначальний вплив цієї добавки на реологічні та міцнісні властивості цементних систем у ранні терміни тверднення і свідчать про доцільність використання комплексного

наномодифікатора для розроблення надшвидкотверднучих портландцементних композицій.

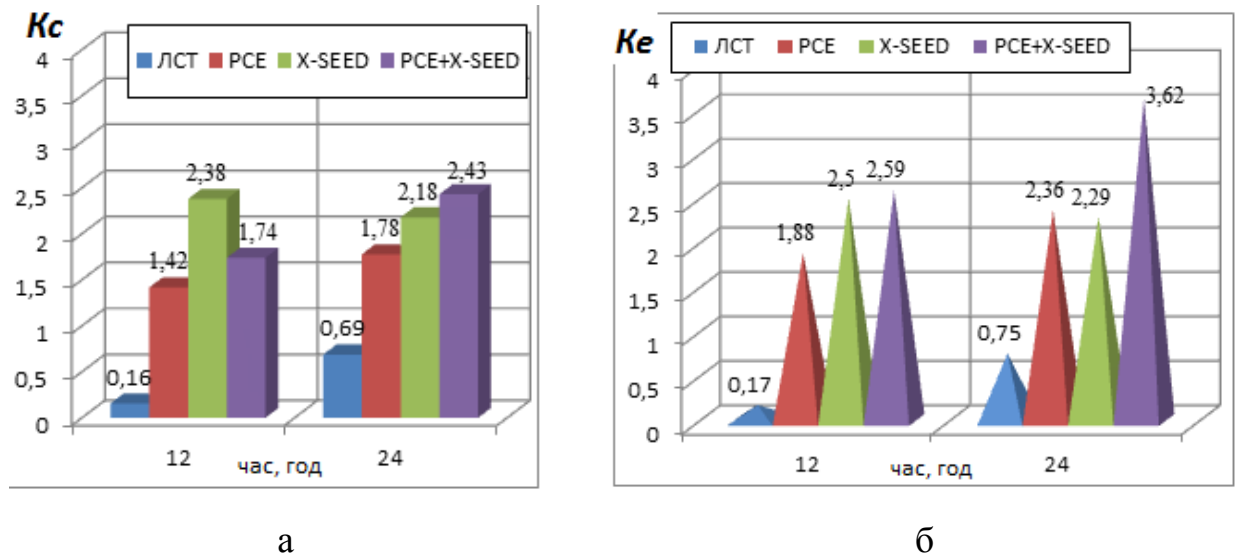


Рисунок 3.2 – Коефіцієнти ефективності добавок міцнісний K_c (а) та комплексний K_e (б)

Важливе значення для формування властивостей бетонів та підбору режимів теплової обробки мають теплові процеси, що відбуваються під час гідратації портландцементів. При тепловологій обробці суттєве значення має власне тепловиділення портландцементів при гідратації. З точки зору термодинаміки процес гідратації портландцементу супроводжується тепловим ефектом, величина якого характеризує інтенсивність взаємодії клінкерних мінералів з водою. Найбільше тепловиділення спостерігається на ранніх етапах, потім цей процес сповільнюється. Підвищення температури сприяє активації хімічних реакцій. Теплота, що виділяється при гідратації портландцементу, може досягати до 20% всієї теплоти, яка витрачається на нагрівання виробів і повинна враховуватись при складанні теплового балансу процесу тепловологої обробки [84].

Інтенсифікація фізико-хімічних явищ на межі розділу твердої і рідкої фаз полідисперсних систем, до яких належать в'язучі речовини, обумовлює активацію процесів тверднення особливо на ранніх стадіях [22]. Значна екзотермія відбувається на ранніх етапах і характеризується двома

максимумами швидкості тепловиділення, які розділяє індукційний період. Перший екзоефект зумовлений процесами змочування частинок в'язучого водою, другий – утворенням продуктів гідратації та перекристалізацією первинних гідратів. Результати калориметричних досліджень, представлених у формі диференціальних та інтегральних залежностей тепловиділення від часу $dQ/d\tau=f(\tau)$ та $Q=f(\tau)$, портландцементу ПЦ І-500Р-Н наведені на рисунку 3.3.

При твердненні портландцементу ПЦ І-500Р-Н 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.

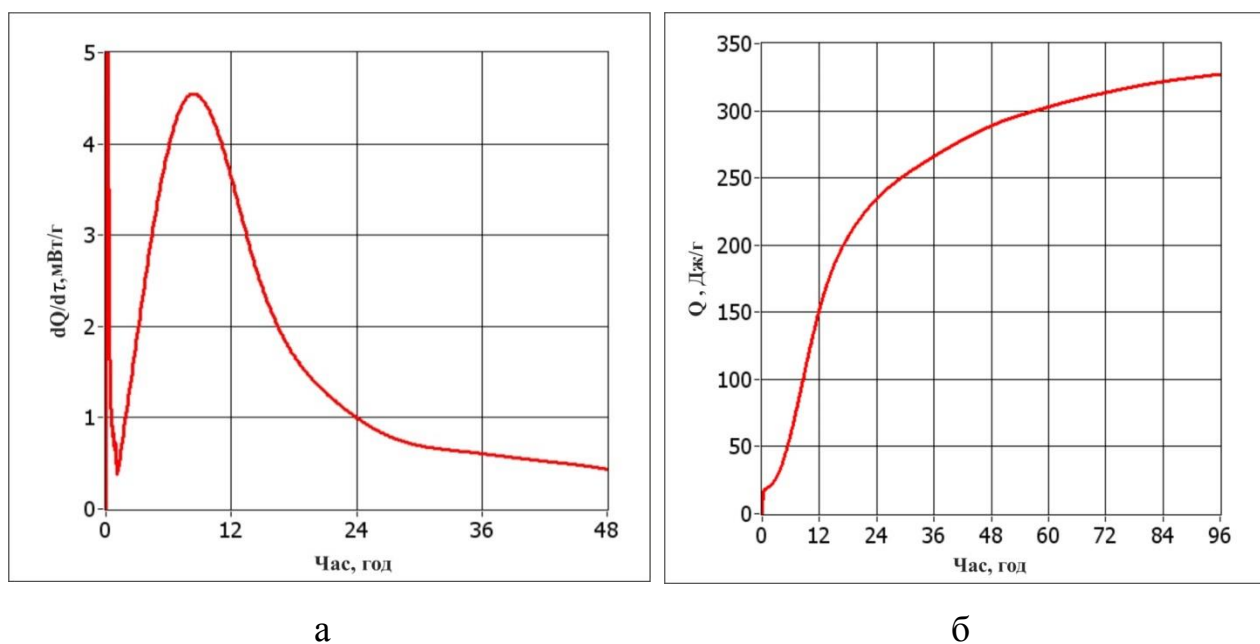


Рисунок 3.3 – Термокінетика гідратації портландцементу ПЦ І-500Р-Н
 $dQ/d\tau = f(\tau)$ (а) та $Q = f(\tau)$ (б)

Результати вимірювань з допомогою напівадіабатичного приладу підтверджують дані ізотермічної мікрокалориметрії (рисунки 3.4).

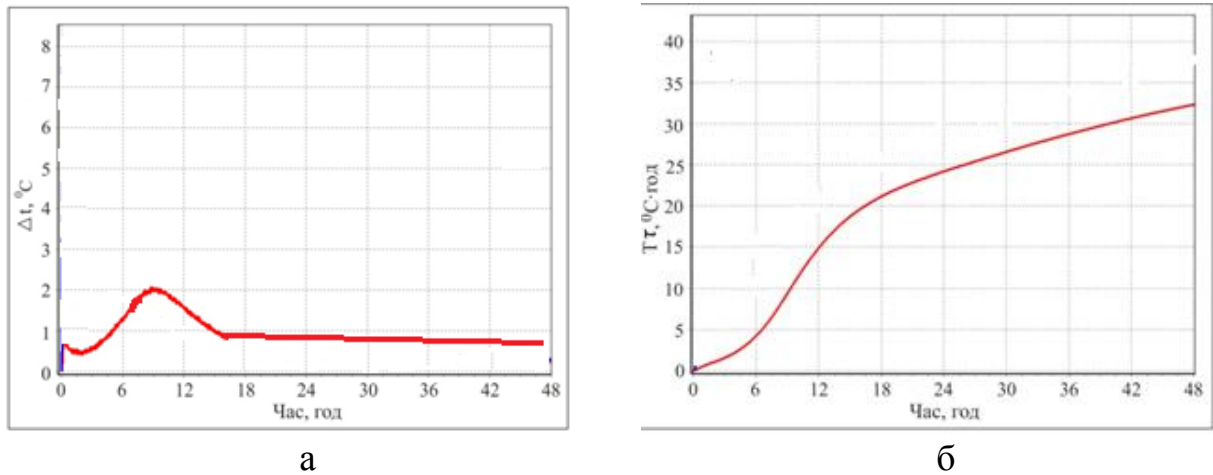


Рисунок 3.4 – Температурно-часові залежності тверднення портландцементу ПЦ І-500Р-Н

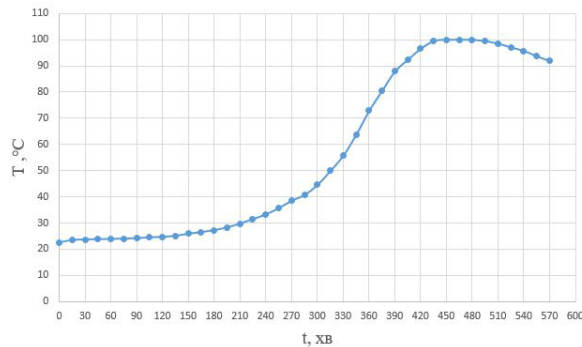
На залежності $\Delta t = f(\tau)$ чіткіше проявляються відмінності в закономірностях активізуючого впливу на швидкість процесів твердіння цементів. Залежність температурно-часового показника $T\tau = f(\tau)$ також свідчить про більшу повноту реакцій гідратації через 48 год тверднення. Кількісні показники кінетики температурних змін при гідратації портландцементу (таблиця 3.2) становлять $24,2^{\circ}\text{C}\cdot\text{год}$ – через 24 год, $32,4^{\circ}\text{C}\cdot\text{год}$ – через 48 год.

Таблиця 3.2 – Температурно-часові параметри тверднення портландцементу ПЦ І-500Р-Н

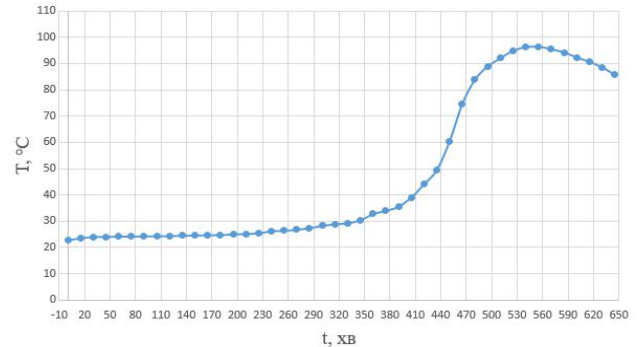
Перший екзоефект, $^{\circ}\text{C}$	Індукційний період τ_i , год	Основний температурний максимум $\Delta t_{\max}$		Температурно-часовий показник $T\tau$, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{год}$, год	
		момент досягнення, год	величина, $^{\circ}\text{C}$	24	48
0,7	3	8,7	2,1	24,2	32,4

На тепловиділення під час гідратації в'язучого впливає вид використовуваного цементу, його витрата на 1 м^3 бетону, а також введення

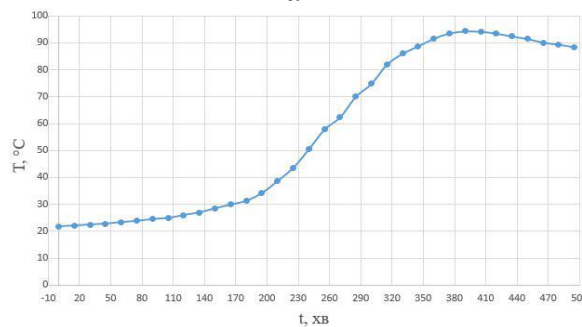
добавок-модифікаторів. У роботі проведено дослідження впливу добавок пластифікуючої групи Glenium 430 (PCE), добавки, що регулює тверднення, наномодифікатора X-SEED, а також комплексної добавки на їх основі на тепловиділення портландцементу ПЦ І-500Р-Н. Максимум температури гідратації портландцементу ПЦ І-500Р-Н (100°C) досягається через 7,5 год (рисунок 3.5, а).



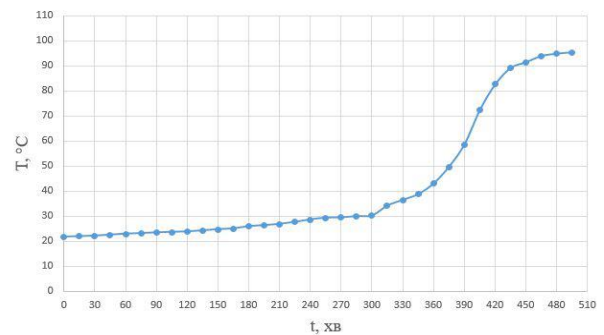
а



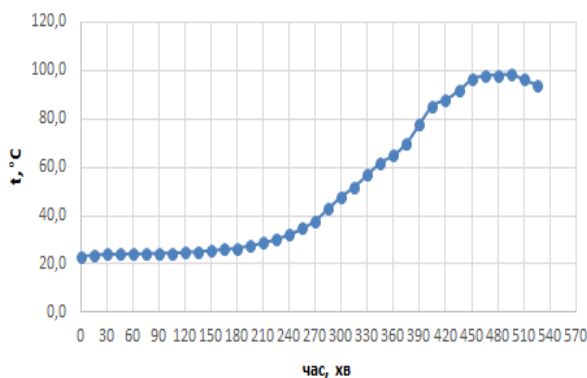
б



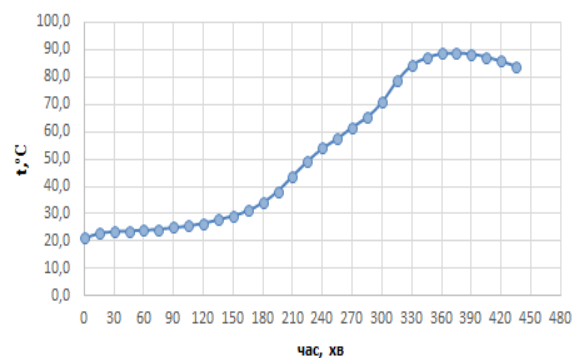
в



г



д



е

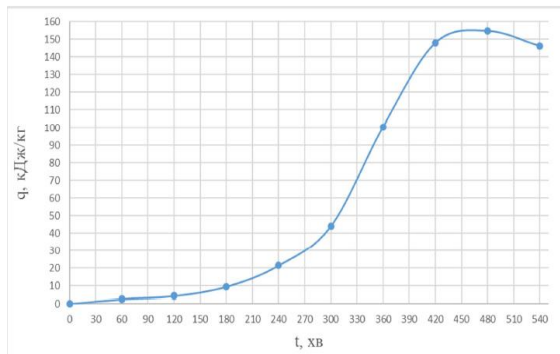
Рисунок 3.5 – Зміна температури портландцементу ПЦ І-500Р-Н (а);
ПЦ І-500Р-Н+1,5 %PCE (б); ПЦ І-500Р-Н+2%X-SEED (в);
ПЦ І-500Р-Н+1,5%PCE+2%X-SEED (г); ПЦ І-500Р-Н+0,8 %PCE (д);
ПЦ І-500Р-Н+0,8%PCE+2%X-SEED (е)

Як видно з рисунку 3.5, б, введення добавки суперпластифікатора на полікарбоксилатній основі Glenium Ace 430 (PCE) у кількості 1,5 мас.% відтягує час досягнення температурного максимуму на 2,25 год порівняно з портландцементом ПЦ І-500Р-Н без добавок. При цьому температурні показники досягають значення 96,5°C. При використанні 2 мас.% нанорозмірного прискорювача X-SEED (рисунок 3.5, в) прискорюються процеси гідратації за рахунок ефекту нуклеації і максимум температури досягається через 5,5 год. При цьому максимальна температура дещо знижується і становить 94,3°C.

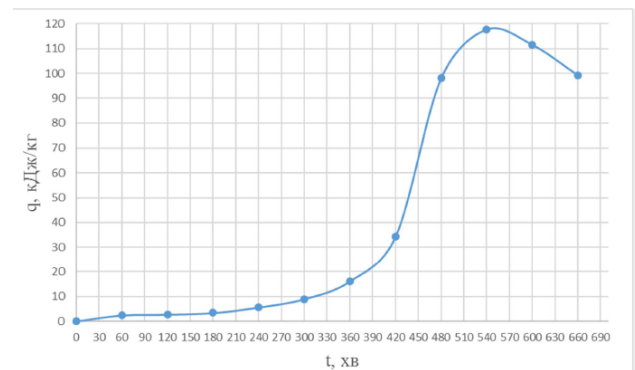
Як видно з рисунку 3.5, г, введення комплексної добавки поліфункціональної дії на основі полікарбоксилатного суперпластифікатора та прискорювача тверднення 1,5 мас.% PCE + 2 мас.% X-SEED до портландцементу призводить до незначного прискорення процесу тепловиділення, порівняно з портландцементом, модифікованим добавкою 1,5 мас.% PCE, при цьому максимум температури ($t=95,8^{\circ}\text{C}$) досягається через 8 год. Слід відзначити, що зменшення дозування полікарбоксилатного суперпластифікатора до 0,8 мас.% відтягує час досягнення температурного максимуму до 8,5 год (рисунок 3.3, д), а при введенні комплексного модифікатора 0,8 мас.% PCE + 2 мас.% X-SEED температурний максимум настає через 6,2 год (рисунок 3.3, е). При цьому початок тепловиділення фіксується через 2 год, що свідчить про ефективність комплексного модифікатора.

Результати визначення питомого тепловиділення під час гідратації портландцементних композицій наведені на рисунку 3.6. Для портландцементу ПЦ І-500Р-Н максимум питомого тепловиділення відповідає значенню 150 кДж/кг. При введенні полікарбоксилатного суперпластифікатора питоме тепловиділення портландцементу знижується до 119 кДж/кг. Використання синтетичних нанорозмірних гідросилікатів кальцію забезпечує прискорення гідратаційних процесів із забезпеченням

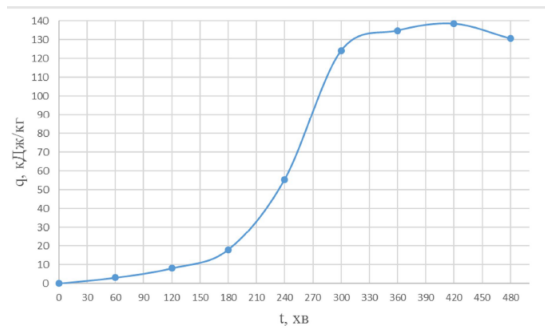
рівномірного їх протікання та досягнення питомого тепловиділення 140 кДж/кг.



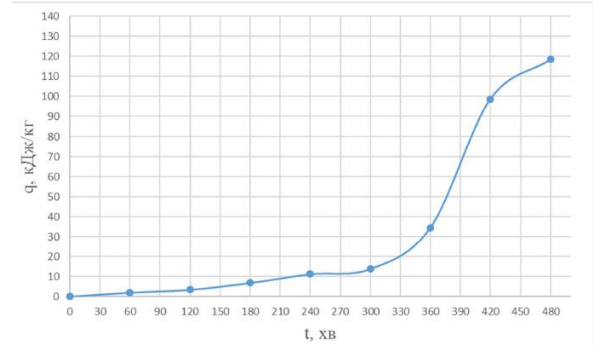
а



б



в



г

Рисунок 3.6 – Питоме тепловиділення ПЦ I-500P-H (а), ПЦ I-500P-H + PCE (б), ПЦ I-500P-H + X-SEED (в), ПЦ I-500P-H+PCE+X-SEED (г)

У бетонах процеси тепловиділення портландцементів мають менший вплив на зростання температури порівняно з цементним тістом. Так, для дрібнозернистого бетону (Ц:П=1:2), що характеризує мезоструктурний рівень бетону, на основі ПЦ I-500P-H температурний максимум становить 41,2 °С, а час досягнення максимуму температури відтягується з 7,5 год до 11 год порівняно з цементним тістом на основі ПЦ I-500P-H (рисунок 3.7). Добавки, що вводяться в портландцементні системи з метою регулювання властивостей, впливають на процеси гідратації в'язучого і викликають зміни його термкінетичних характеристик. Дослідженнями тепловиділення в процесі тверднення дрібнозернистого бетону встановлено, що при

використанні 0,5 мас.% добавки Centrament N3 на основі лігносульфонатів спостерігається сповільнення швидкості тепловиділення і зниження максимальної температури. Так, температурний максимум ($t=39,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) проявляється через 13 год. Використання суперпластифікатора полікарбоксилатного типу меншою мірою спричиняє сповільнення досягнення максимуму тепловиділення, який спостерігається через 12 год. Випробуваннями дрібнозернистого бетону на основі портландцементної композиції ПЦ I-500P-H+PCE+X-SEED встановлено прискорення досягнення температурного максимуму ($t=38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) на 3 год порівняно з дрібнозернистим бетоном на основі ПЦ I-500P-H. Введення комплексного наномодифікатора в портландцементну систему сприяє рівномірному протіканню гідратаційних процесів як внутрішнього джерела теплонадходження з розігріванням бетону зсередини, що забезпечує зменшення температурних деформацій під час теплової обробки бетону.

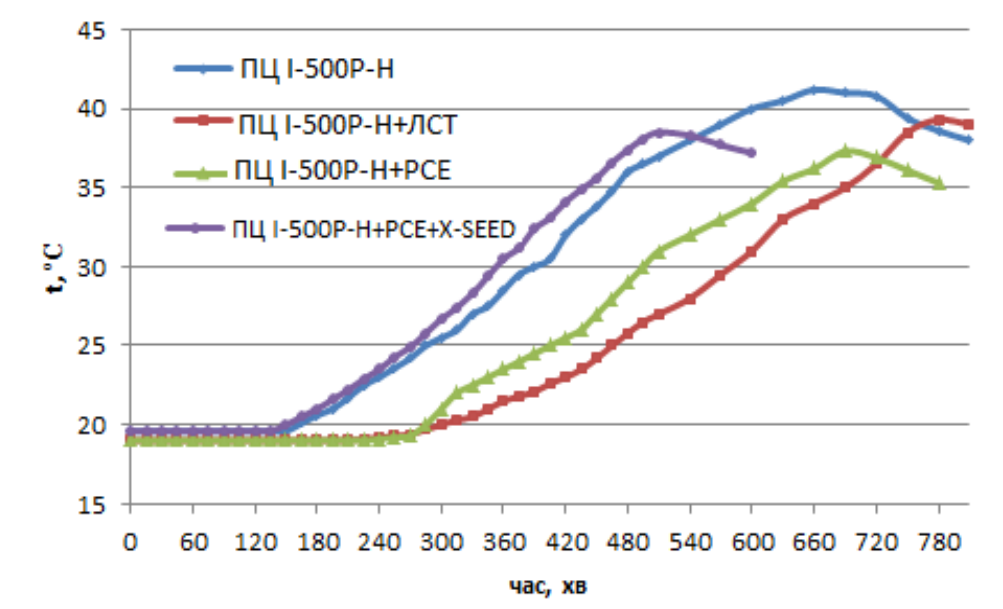


Рисунок 3.7 – Зміна температури модифікованих дрібнозернистих бетонів на основі портландцементу ПЦ I-500P-H

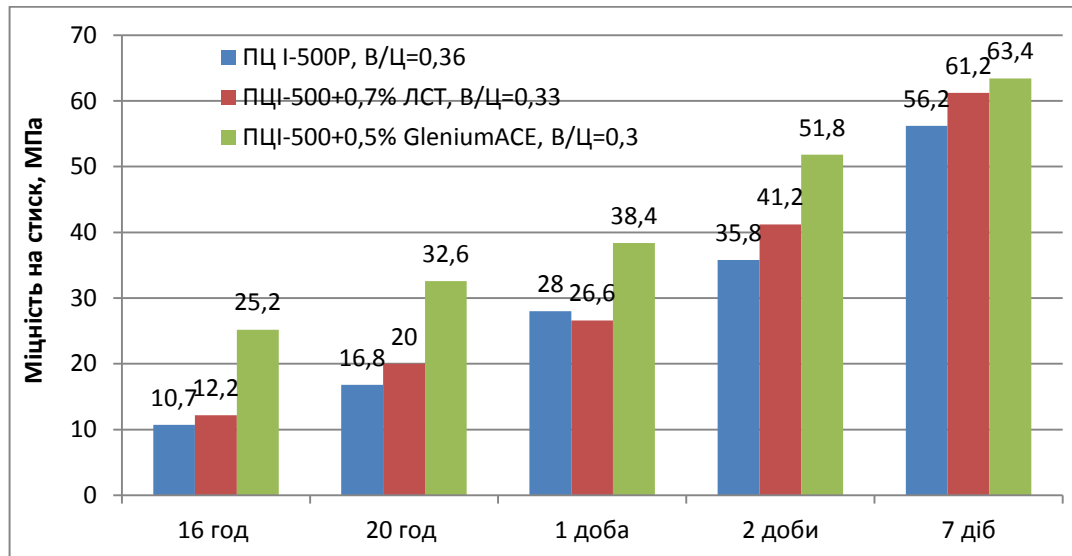
Отже, застосування комплексних добавок, що поєднують наноприскорювач та суперпластифікатор полікарбоксилатного типу, є одним

із найбільш ефективних шляхів управління процесами раннього структуроутворення та синтезу міцності цементного каменю. Комплексні поліфункціональні добавки здійснюють суттєвий вплив не тільки на процеси диспергування та стабілізації в портландцементних системах з досягненням необхідної рухливості, але й на їх структуроутворення, що необхідно враховувати при впливі інших технологічних факторів на швидкість тверднення портландцементних систем.

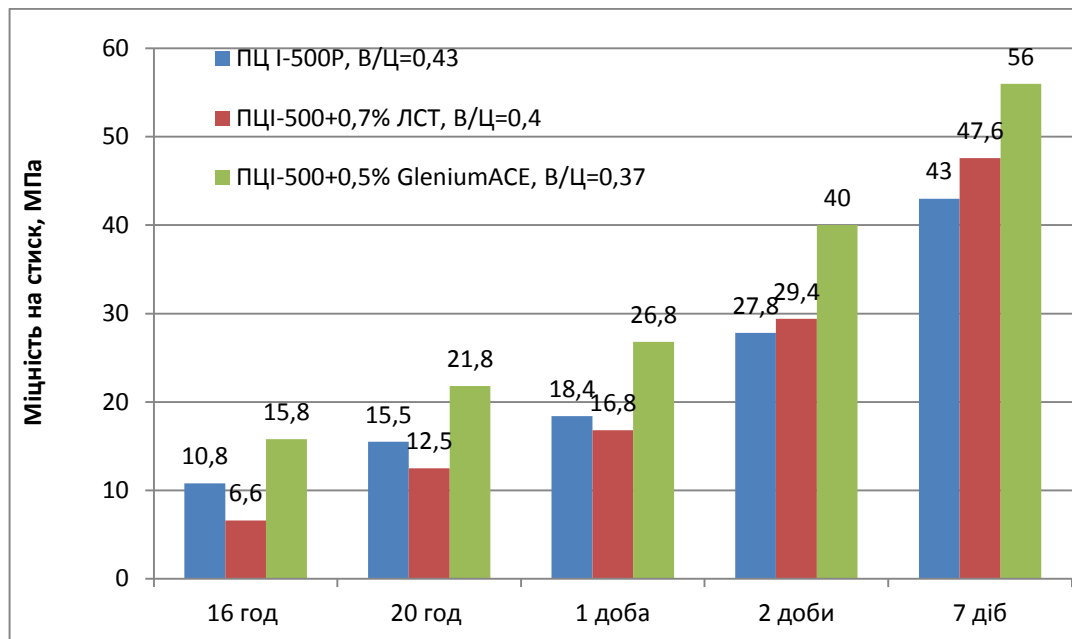
3.2. Дослідження впливу технологічних факторів на процеси раннього структуроутворення портландцементних композицій

Істотний вплив на формування структури високоміцних бетонів має якість заповнювачів. Наявність у їх складі значної кількості пиловатих та глинистих частинок спричиняє підвищення водопотреби для досягнення необхідної рухливості, що призводить до зменшення міцності затверділого композиту. З метою зменшення водопотреби використовують добавки пластифікуючої групи, ефективність дії яких також залежатиме від якості заповнювачів. Дослідження впливу добавок-пластифікаторів на основі лігносульфонатів (Centrament N3) та полікарбоксилатів (Glenium ACE430) проводили на дрібнозернистих бетонах на основі ПЦ І-500Р-Н при співвідношенні Ц:П=1:2, що відповідає мезоструктурному рівню важкого бетону. При дослідженні пластифікуючого ефекту добавок показано зростання міцності дрібнозернистого бетону (Ц:П=1:2, РК=200-210 мм) на піску Жовківського родовища ($M_{кр} = 1,92$) у ранній період в 1,3-1,5 рази порівняно з бетоном на піску Миколаївського родовища ($M_{кр} = 1,39$). Модифікування полікарбоксилатним суперпластифікатором забезпечує суттєве підвищення міцності дрібнозернистих бетонів у віці до 1 доби порівняно з дрібнозернистими бетонами, модифікованими

лігносульфонатним пластифікатором. Так, міцність через 1 добу дрібнозернистого бетону з добавкою РСЕ на жовківському піску на 37,1 % (рисунок 3.8, а) та на миколаївському піску на 45,7 % (рисунок 3.8, б) вища порівняно з бездобавочними складами.



а



б

Рисунок 3.8 – Вплив пластифікаторів на міцність дрібнозернистого бетону з використанням піску Жовківського (а) та Миколаївського (б) родовищ

Разом з тим, результати випробувань дрібнозернистих бетонів, модифікованих добавкою на основі лігносульфонатів Centrament N3, з

високорухливих сумішей свідчать про зменшення інтенсивності набору ранньої міцності особливо при використанні дрібного піску Миколаївського родовища. При введенні добавки Centrament N3 (водоредукуючий ефект) $\Delta B/C=8,3\%$ міцність дрібнозернистого бетону з використанням Жовківського піску зростає – на 14-20% у ранні терміни тверднення порівняно з бетоном без добавок. Слід відзначити, що при використанні дрібного піску Миколаївського родовища спостерігається спад ранньої міцності дрібнозернистого бетону при зниженні водопотреби ($\Delta B/C=7,5\%$) на 63,6% через 16 год тверднення. Через 2 доби тверднення набір міцності інтенсифікується з досягненням технічного ефекту $\Delta R_{ct2}=5,8\%$ та $\Delta R_{ct7}=10,7\%$.

При випробуванні дрібнозернистих бетонів Ц:П=1:2 (РК=110-115 мм) показано високу ефективність дії суперпластифікатора GleniumACE430 на полікарбоксилатній основі при використанні Миколаївського піску. Так, приріст ранньої міцності через 2 доби дрібнозернистих бетонів, модифікованих добавкою GleniumACE430, становить 48,3%, у той час, як при використанні добавки Centrament N3 приріст міцності складає 24,1% порівняно з дрібнозернистим бетоном без добавок (таблиця 3.3).

На формування структури високоміцних бетонів, що піддаються тепловологій обробці, крім якості заповнювачів суттєве значення має режим обробки, зокрема тривалість попереднього витримування при температурі навколишнього середовища, під час якого бетон набуває початкової міцності і здатний протистояти деформаціям, що відбуваються при нагріванні. На рисунку 3.9 наведені результати випробування міцності дрібнозернистих бетонів на основі ПЦ І-500-Н складу Ц:П:В_щ=1:1,2:0,69 (РК=110-115 мм), модифікованого пластифікаторами, з використанням дрібного заповнювача різних родовищ після ТВО за режимом 2 год попереднього витримування при 20°C та 10 год ізотермічного витримування при 50°C.

Таблиця 3.3 – Технологічний та технічний ефекти використання пластифікуючих добавок

(дрібнозернистий бетон Ц:П=1:2, пісок – миколаївський, РК=110-115 мм)

Позначення	Результати випробувань	
	Centrament N3 (ЛСТ)	GleniumACE430 (PCE)
Водоредукуючий ефект		
$\Delta B/C, \%$	7,5	12,5
Технічні ефекти		
$\Delta R_{ct}^2, \%$	24,1	48,3
$\Delta R_{ct}^7, \%$	5,3	30,1
$\Delta R_{ct}^{28}, \%$	2,3	28,1
R_{ct}^2/R_{ct}^{28}	0,57	0,67
R_{ct}^7/R_{ct}^{28}	0,91	0,93

Міцність дрібнозернистих бетонів з використанням піску Жовківського родовища є на 54,7% вищою при введенні ЛСТ порівняно з дрібнозернистим бетоном на основі піску Рогатинського родовища. Слід відзначити підвищену ефективність полікарбоксилатного пластифікатора PCE у бетонах з використанням дрібних пісків. Так, міцність дрібнозернистого бетону, модифікованого PCE, з використанням жовківського піску на 33,5% перевищує міцність бетону з застосуванням дуже дрібного рогатинського піску.

Для визначення ефективності дії добавок різної природи та використання надшвидкотверднучої композиції в умовах тепловологої обробки за низькотемпературними режимами вивчено їх вплив на міцнісні показники дрібнозернистих бетонів [62]. Міцність дрібнозернистого бетону на основі ПЦ І-500Р-Н після теплової обробки при введенні добавки ЛСТ (0,7 мас.%) підвищується на 11,4-26,3% при різних температурних режимах порівняно з контрольним складом (рисунок 3.9). У той же час, використання

добавки PCE (0,8 мас.%) забезпечує зростання міцності бетону на 68,3% при $T_{із.} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і на 32,5% при $T_{із.} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

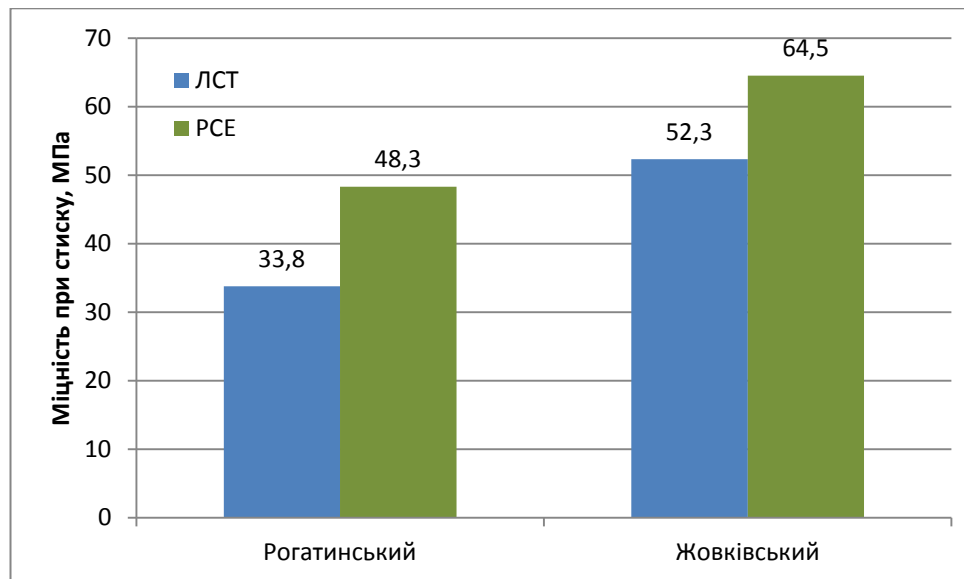


Рисунок 3.9 – Вплив дрібного заповнювача на властивості модифікованих дрібнозернистих бетонів після теплової обробки

Дрібнозернистий бетон на основі надшвидкотвердучої композиції (ПЦ I-500P-H+0,8 мас.% PCE + 2 мас.%X-SEED) характеризується найвищими міцнісними показниками. Так, міцність бетону зростає в 2,54 рази порівняно з контрольним складом при $T_{із.} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, при $T_{із.} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $T_{із.} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в 1,73 і 1,52 рази відповідно.

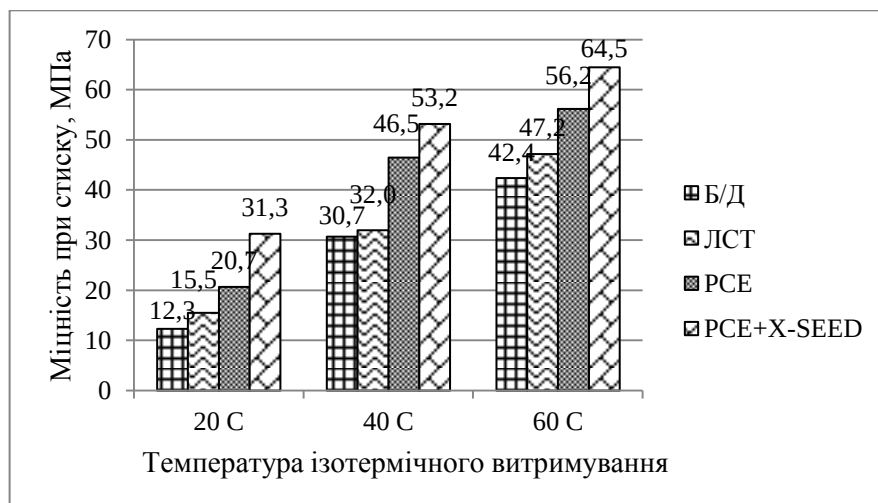


Рисунок 3.10 – Міцність на стиск дрібнозернистих бетонів після теплової обробки

Показники коефіцієнта відносної міцності бетону K_c , визначеного як відношення міцності модифікованого дрібнозернистого бетону до міцності бетону без добавок (рисунок 3.11) свідчать про найнижчу ефективність добавки ЛСТ ($K_c = 1,26; 1,04; 1,11$) [62]. Використання портландцементної композиції ПЦ I-500+PCE+X-SEED сприяє підвищенню коефіцієнта відносної міцності бетону K_c при різних температурах ізотермічного прогріву. Так, при $T_{із.}=20^{\circ}\text{C}$ значення коефіцієнта K_c становить 2,55; а також 1,73 і 1,52 при $T_{із.}=40^{\circ}\text{C}$ і $T_{із.}=60^{\circ}\text{C}$ відповідно. Дані результати свідчать про високу ефективність надшвидкотверднучих композицій при низькотемпературних режимах теплової обробки.

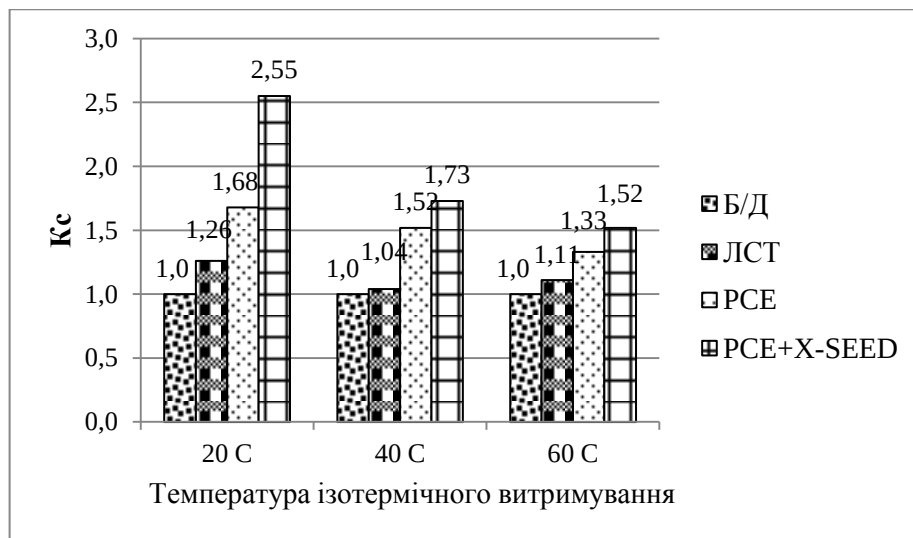


Рисунок 3.11 – Коефіцієнти ефективності добавок-модифікаторів

Дослідженнями міцності модифікованих дрібнозернистих бетонів, що піддавалися тепловій обробці, та через 28 діб показано, що бетони продовжують набирати міцність. Так, бетони на основі портландцементної композиції «ПЦ I-500P-H+PCE+ X-SEED» через 28 діб після тверднення при температурі 20°C характеризуються в 2,8 рази більшою міцністю порівняно з міцністю відразу після 9 год витримування. Після теплової обробки при температурі 40 та 60°C міцність через 28 діб таких бетонів зростає в 1,6 та 1,3 рази відповідно. Слід відзначити, що зі зростанням температури ізотермічного витримування спостерігаються недобори міцності через 28 діб (рисунок 3.12). Так, модифікування добавкою ЛСТ дрібнозернистого бетону

(Ц:П=1:2) на основі ПЦ І-500Р-Н забезпечує досягнення міцності 68,0 МПа при температурі 20 °С, у той час, як при температурі 60 °С міцність становить 62,3 МПа. Введення комплексної добавки PCE+X-SEED дозволяє одержати міцність 88,9 МПа при 20 °С та 83,2 МПа при 60 °С.

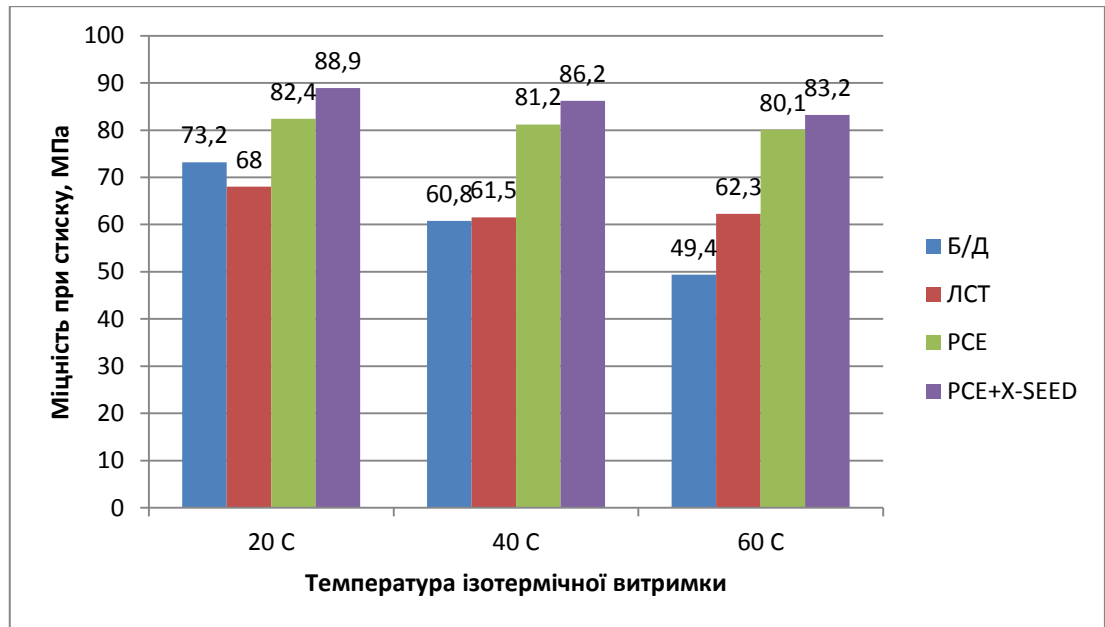
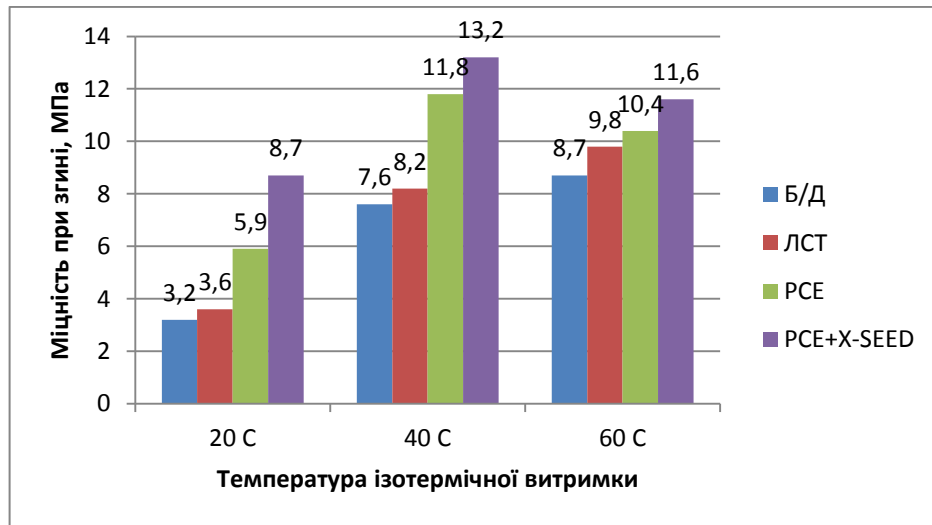


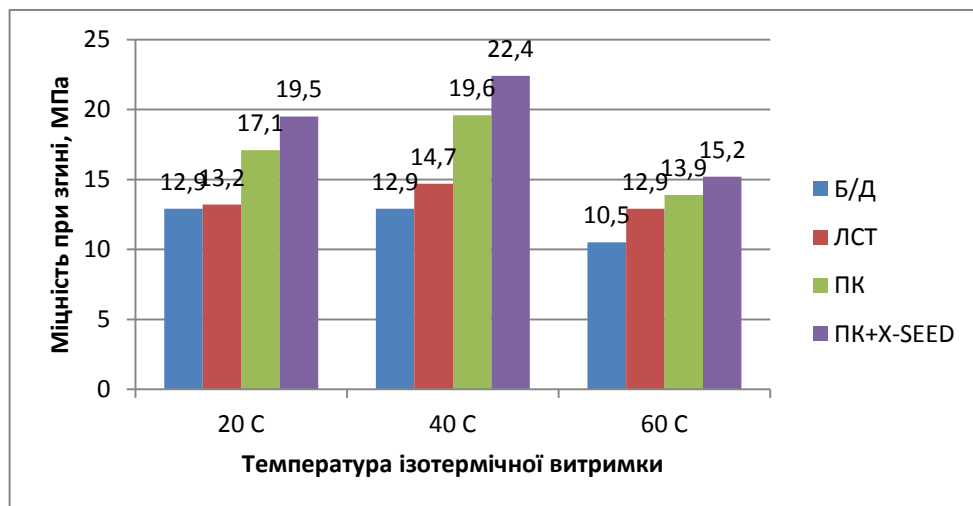
Рисунок 3.12 – Міцність дрібнозернистого бетону через 28 діб

Аналогічна тенденція спостерігається при випробуванні зразків на міцність на згин. Слід відзначити, що максимальні показники міцності на згин одержуються при модифікуванні дрібнозернистого бетону комплексною добавкою PCE+X-SEED при всіх температурах обробки (рисунок 3.13). Міцність на згин модифікованого дрібнозернистого бетону після теплової обробки при температурі 40°C становить 13,2 МПа, що на 42,3% перевищує міцність дрібнозернистого бетону на основі ПЦ І-500Р без добавок, та в 1,6 рази порівняно з бетоном на основі портландцементної композиції, модифікованої лігносульфонатним пластифікатором. Через 28 діб тверднення міцність продовжує зростати і досягає значення 22,4 МПа. Після теплової обробки міцність на згин становить 59%. Слід відзначити, що при тепловій обробці дрібнозернистих бетонів з температурою витримання 60°C спостерігаються недобори міцності на згин. Так, дрібнозернистий бетон на

основі наномодифікованої портландцементної композиції характеризується зниженням міцності на 12%, а через 28 діб – на 32%.



а



б

Рисунок 3.13 – Міцність на згин дрібнозернистого бетону після теплової обробки (а) та через 28 діб (б)

Отже, раннє структуроутворення портландцементів визначається комплексним модифікуванням добавками, які поєднують ефективний наноприскорювач та полікарбоксилатний суперпластифікатор, а також технологічними факторами, що необхідно враховувати під час оптимізації складів надшвидкотверднучих портландцементних композицій для високоміцних бетонів.

3.3. Оптимізація складів надшвидкотверднучих портландцементних композицій

Ефективність проектування надшвидкотверднучих портландцементних композицій, які забезпечують швидке тверднення бетонних виробів та конструкцій при мало- та безпрогрівних режимах теплової обробки, забезпечується завдяки застосуванню математичних моделей, що враховують реологію бетонних сумішей, оптимальну кількість добавок у структурі матеріалу, технологічні параметри у вигляді апроксимаційних статистичних залежностей. Для цього був застосований метод статичної математичної обробки наслідку – метод ортогонально-центрального композиційного планування (ОЦКП) [26, 41]. Сенс цього планування експериментів з застосуванням математичного методу полягає у встановленні математичної відповідності між властивостями і складом чи витратою матеріалів, розв'язуванні задач з оцінки ступеня на вплив вибраних факторів і знаходження їх взаємодії; пошуку найоптимальніших умов протікання процесів.

Для побудови експериментально-статистичних моделей показників міцності дрібнозернистого бетону на основі портландцементу ПЦ І-500Р-Н залежно від рецептурно-технологічних параметрів визначальними факторами моделювання вибрано температуру ізотермічного витримування ($X_1 = 20; 40; 60$ °C) та кількість прискорювача тверднення X-SEED ($X_2 = 0; 2,0; 4,0$ мас.%). Дозування високоефективного полікарбоксилатного суперпластифікатора стабілізували на рівні 0,8 мас. % при забезпеченні високого водоредукуючого ефекту. Характеристики змінних факторів наведені в таблиці 3.4. Для проведення аналізу впливу даної факторної моделі на міцність після теплової обробки та через 28 діб дрібнозернистого бетону виконані експериментальні дослідження відповідно з планом двофакторного трирівневого експерименту.

Таблиця 3.4 – Характеристика планування експерименту

Характеристика	Фактори	
	температура, (X ₁), °C	Кількість прискорювача, (X ₂), мас.%
Нижній рівень “-1”	20	0
Головний рівень “0”	40	2,0
Верхній рівень “+1”	60	4,0

Під час планування експерименту було використано наступні контрольні параметри:

Y₁ – водоцементне відношення;

Y₂, Y₃ – границя міцності на стиск зразків бетону після теплової обробки та через 28 діб тверднення відповідно, МПа;

Y₄, Y₅ – границя міцності на згин зразків бетону після теплової обробки та через 28 діб тверднення відповідно, МПа.

Метод ОЦКП дає можливість отримати математичний опис даного процесу у вигляді рівняння регресії (3.3):

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2, \quad (3.3)$$

де b₀, b₁, b₂, b₁₂, b₁₁, b₂₂ – коефіцієнти регресії, що обчислюються за формулами (3.4-3.9):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_1(i)}{\sum_{i=1}^N x_1(i)^2} \quad (3.4)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_2(i)}{\sum_{i=1}^N x_2(i)^2} \quad (3.5)$$

$$b_{11} = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_1^*(i)}{\sum_{i=1}^N x_1^*(i)^2} \quad (3.6)$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_1(i) \cdot x_2(i)}{\sum_{i=1}^N (x_1(i) \cdot x_2(i))^2} \quad (3.7)$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_2^*(i)}{\sum_{i=1}^N x_2^*(i)^2} \quad (3.8)$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(i) \quad (3.9)$$

Перевірку даних коефіцієнтів регресії на адекватність рівнянь регресії виконували за критеріями Стюдента та Фішера.

Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту (Ц:П=1:2)

№ п/п	Матриця планування		РК, мм	В/Ц	Границя міцності, Мпа,			
					на стиск		на згин	
	X ₁	X ₂			ТВО	28 діб	ТВО	28 діб
					Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
1	-1	-1	114	0,23	20,7	82,4	5,9	17,1
2	-1	0	115	0,23	31,6	88,9	8,7	19,0
3	-1	+1	115	0,21	25,2	85,4	10,3	20,1
4	0	-1	114	0,23	53,5	86,7	11,8	19,6
5	0	0	115	0,23	53,2	81,5	9,5	17,6
6	0	+1	115	0,21	50,8	80,2	11,4	19,4
7	+1	-1	114	0,23	61,2	77,6	10,4	13,9
8	+1	0	115	0,23	64,5	83,2	6,5	15,2
9	+1	+1	115	0,21	57,1	79,3	8,6	17,2

Обчислення коефіцієнтів рівнянь регресії виконано із застосуванням матричного підходу до регресивного аналізу. Значення коефіцієнтів рівнянь регресії наведені в таблиці 3.6. Незначимі коефіцієнти прирівнюють до нуля, а відповідні члени виключають з рівнянь регресії. Обчисленнями критерія Фішера показано, що отримані рівняння регресії адекватно описують експериментальні дані.

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти рівнянь регресії

Функції відгуку	Коефіцієнти регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{12}	b_{22}
Y_1	0,23	0	-0,01	0	0	-0,1
Y_2	54,78	16,77	1,62	-7,67	-0,9	-6,92
Y_3	84,53	-2,77	0	0	0	-2,60
Y_4	9,9	0	0,367	-2,5	-1,55	-1,5
Y_5	18,8	-1,13	1,53	-2,3	-0,7	0

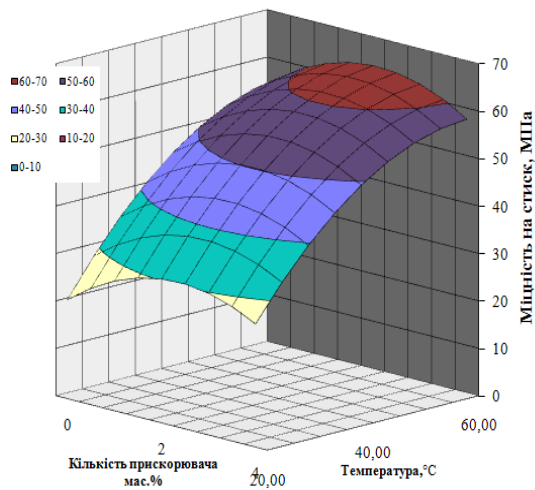
Аналізом отриманих поліноміальних регресійних рівнянь (3.10–3.12) і експериментально-статистичних моделей дрібнозернистих бетонів встановлено, що при введенні максимальної кількості прискорювача тверднення та температурі ізотермічного витримування 60 °С спостерігається зниження границі міцності на стиск після теплової обробки та через 28 діб, про що свідчать від’ємні знаки коефіцієнтів b_{11} та b_{22} . Слід відзначити позитивний вплив прискорювача тверднення на зростання міцності на згин, що зумовлюється утворенням підвищеної кількості гідросилікатів волокнистого габітуса.

$$B/C = 0,23 - 0,01X_2 - 0,1X_2^2 \quad (3.10)$$

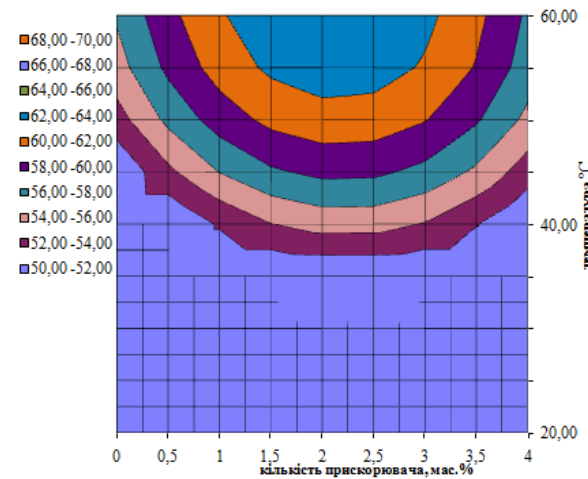
$$R_{\text{ство}} = 54,78 + 16,77X_1 + 1,62X_2 - 7,67X_1^2 - 6,92X_2^2 - 0,9X_1X_2 \quad (3.11)$$

$$R_{\text{с28}} = 84,53 - 2,77X_1 - 2,6X_1^2 \quad (3.12)$$

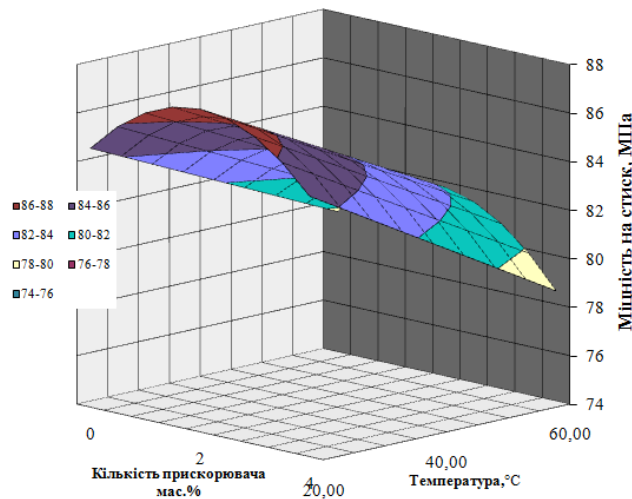
За даними рівняннями регресії було отримано ізопараметричні поверхні та діаграми, які адекватно описують залежність міцності на стиск після теплової обробки та через 28 діб тверднення модифікованих високоміцних дрібнозернистих бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій від змінних параметрів (рисунки 3.14).



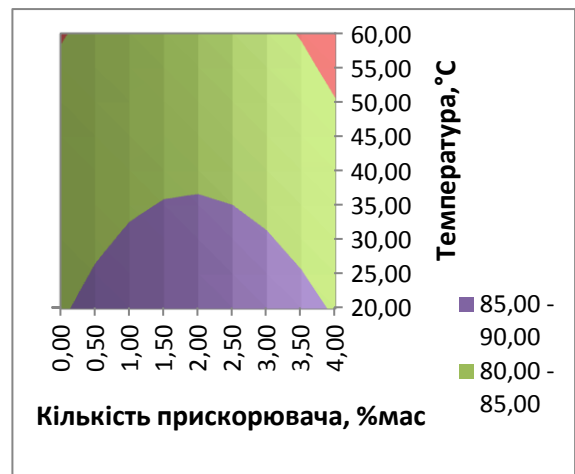
а



б



в



г

Рисунок 3.14 – Ізопараметричні поверхні та діаграми міцності на стиск портландцементних композицій після теплової обробки (а, б) та через 28 діб (в, г)

За результатами випробувань та графічними залежностями визначено оптимальну кількість добавки-прискорювача, що відповідає основному рівню варіювання, у складі надшвидкотверднучої портландцементної композиції, яка піддаються дії теплової обробки за низькотемпературним режимом (температура ізотермічного витримування становить 40 °С).

Стандартними випробуваннями згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009 портландцементної композиції на основі портландцементу ПЦ І 500Р-Н, модифікованого полікарбоксилатним суперпластифікатором та добавкою-прискорювачем X-SEED, встановлено, що при В/Ц=0,39 розроблена композиція характеризується розпливом 155 мм, за яким відповідає пластифікуючому ефекту 41,0%. При цьому рання міцність портландцементної композиції 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, що відповідає марці 500 (рисунок 3.15). При забезпеченні суттєвого водоредукуючого ефекту ($\Delta В/Ц=23,1\%$) при РК=115 мм досягається висока рання міцність, при цьому міцність через 1 та 2 доби становить відповідно 38,4 та 43,4 МПа. При цьому показники питомої міцності через 1 та 2 доби становлять відповідно $R_{c1}/R_{c28}=54,5\%$; $R_{c2}/R_{c28}=61,6\%$. Через 28 діб тверднення міцність портландцементної композиції досягає значення $R_{c28}=70,4$ МПа. Тобто розроблена портландцементна композиція за критерієм набору ранньої міцності належить до надшвидкотверднучих цементів згідно з ДСТУ Б В 2.7.281:2011, а за показниками стандартної міцності відповідає вимогам щодо високоміцних цементів [74, 140, 151].

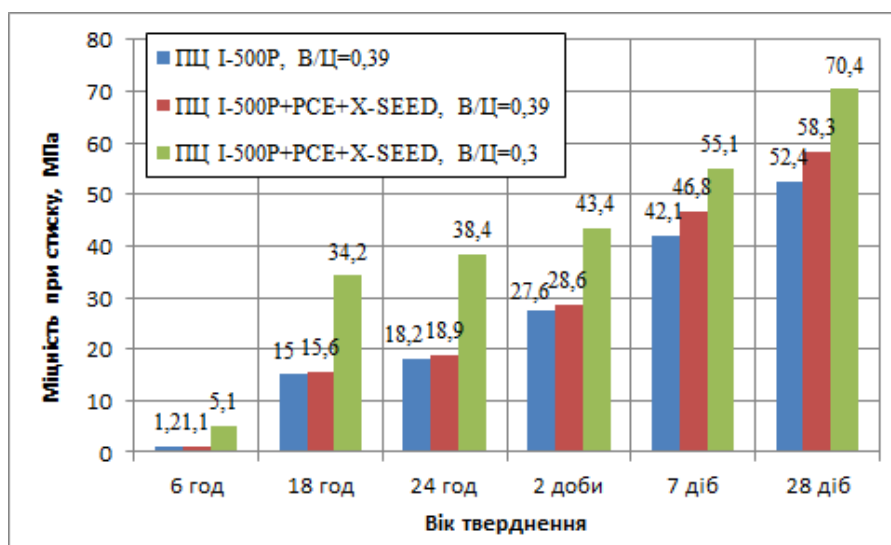


Рисунок 3.15 – Міцність на стиск модифікованих портландцементних композицій згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009

При введенні комплексного наномодифікатора відбувається направлене формування гідросилікатів кальцію, що армують цементний камінь на мікромасштабному рівні, за рахунок чого досягається підвищення міцності на згин цементуючої системи у всі терміни тверднення на 27-30% порівняно з вихідним портландцементом (таблиця 3.7). Надшвидкотверднуча портландцементна система характеризується підвищеними показниками тріщиностійкості (0,161-0,334), що задовольняє вимоги некрихких матеріалів. Деформації усадки цементного каменю на основі розробленої композиції зменшуються порівняно з каменем на основі ПЦ І-500Р-Н за рахунок зменшення водопотреби та прискореного структуроутворення.

Таблиця 3.7 – Будівельно-технічні властивості надшвидкотверднучих портландцементних композицій

Показник	Вік тверднення				
	18 год	24 год	2 діб	7 діб	28 діб
Міцність на згин, МПа	5,5	8,6	12,8	18,4	20,8
Умовний коефіцієнт тріщиностійкості	0,161	0,224	0,295	0,334	0,295
Деформації усадки, мм/м	0,16	0,19	0,24	1,32	1,34

Для модифікування портландцементів для високоміцних бетонів, що піддаються дії підвищених температур, слід використовувати ультрадисперсні мінеральні добавки пуцоланічної дії з метою зв'язування гідроксиду кальцію, а також суперпластифікатор на полікарбоксилатній основі (PCE), який характеризується високим пластифікуючим та водоредукуючим ефектом. Для забезпечення ранньої пуцоланової реакції практичний інтерес представляє використання ультрадисперсних мінеральних добавок високоактивного метакіаоліну (ВМК) та мікрокремнезему (МК). Для порівняння використали алюмосилікатну мінеральну добавку золи-винесення (ЗВ) [64, 151]. Дозування мінеральних

добавок становило 5 мас.%, кількість полікарбоксилатного суперпластифікатора – 1 мас. %.

Як видно з результатів таблиці 3.8, введення золи-виношення зумовлює зниження ранньої міцності композиції на 5,9–9,3%. У той же час, міцність композицій з метакаоліном та мікрокремнеземом зростає в 1,2-1,5 рази. Через 28 діб тверднення міцність модифікованих портландцементних композицій перевищує міцність портландцементу ПЦ І-500Р-Н.

Таблиця 3.8 – Міцність портландцементних композицій (Ц:П=1:2, РК=110-115 мм)

Вид в'язучого	В/Ц	Границя міцності на стиск, МПа					
		нормальні умови, у віці, діб				через 2 доби, нагріті до температури, °С	
		1	2	7	28	105	200
ПЦ І-500Р-Н	0,31	31,2	36,9	57,8	65,3	47,8	54,2
ПЦ І-500Р-Н+3В	0,22	28,3	34,7	56,3	67,3	46,7	55,1
ПЦ І-500Р-Н+ВМК+РСЕ	0,24	32,5	43,3	62,8	74,7	60,7	71,5
ПЦ І-500Р-Н+МК+РСЕ	0,23	43,5	56,3	66,4	78,3	80,3	82,9

Питома міцність портландцементної композиції ПЦ І-500Р-Н+МК+РСЕ через 1 та 2 доби становить 0,56 та 0,72, що відповідає вимогам щодо надшвидкотверднучих. Через 2 доби тверднення в нормальних умовах портландцементні композиції піддавали дії підвищених температур. Після сушіння зразків при температурі 105 °С протягом 48 год спостерігається зростання міцності в усіх випадках в 1,3-1,43 рази, а після витримування при температурі 200 °С – в 1,35-1,47 рази. Найвищими міцнісними показниками після дії підвищених температур характеризується портландцементна композиція з мікрокремнеземом, для якої міцність становить 82,9 МПа.

З метою прискорення процесів гідратації використали інноваційний прискорювач тверднення X-SEED, що містить нанорозмірні кристали гідросилікатів кальцію C-S-H. Для вивчення впливу ультрадисперсної мінеральної та комплексних хімічних добавок на фізико-механічні властивості портландцементних композицій при визначенні і оптимізації їх складу з метою одержання максимальної ранньої та стандартної міцності в умовах підвищеної рухливості бетонної суміші проводили дослідження з використанням двофакторного методу планування експерименту, що передбачає використання багатфакторних моделей – математичних залежностей між властивостями та технологічними параметрами, складовими портландцементів. Принципові основи використання статистичних моделей у вирішенні технологічних завдань удосконалення методології проектування складів портландцементних систем, високоміцних бетонів із заданими властивостями висвітлені в роботах [26, 41].

Під час планування експерименту як змінні фактори вибрано рецептурні: відсотковий вміст у портландцементній композиції мікрокремнезему МК (0; 5; 10 мас. %) (X_1) та кількість прискорювача тверднення X-SEED (0; 2; 4 мас. %) (X_2) (таблиця 3.9). Для забезпечення високого водоредукуючого ефекту та максимальної міцності стабілізували кількість добавки РСЕ на рівні 1,0 мас. %. Для дослідження формували зразки-балочки 4x4x16 см дрібнозернистого бетону (Ц:П = 1:3; РК = 106-115 мм).

Таблиця 3.9 – Інтервали варіювання та значення рівнів варіювання

Характеристика	Фактори	
	кількість мікрокремнезему (X_1), мас.%	кількість X-SEED, (X_2), мас.%
Нижній рівень “-1”	0	0
Основний рівень “0”	5	2
Верхній рівень “+1”	10	4

При плануванні експерименту були вибрані наступні контрольні параметри (функції відгуку):

Y_1 – водоцементне відношення;

Y_2 - Y_5 , МПа – міцність при стиску дрібнозернистого бетону у віці 1; 2; 7 та 28 діб відповідно (таблиця 3.10).

Таблиця 3.10 – Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

№	Умовні фактори		Натуральні фактори		В/Ц	Границя міцності при стиску, МПа, у віці, діб			
			Кількість добавки, мас. %						
	X ₁	X ₂	МК	X-SEED		1	2	7	28
1	+1	+1	10	4	0,33	34,2	51,0	66,4	88,6
2	+1	-1	10	0	0,34	31,2	49,0	54,1	74,8
3	-1	+1	0	4	0,31	34,6	50,8	53,6	71,2
4	-1	-1	0	0	0,33	24,8	42,1	46,8	69,6
5	+1	0	10	2	0,33	38,8	47,8	69,6	87,2
6	-1	0	0	2	0,31	32,4	49,4	60,0	75,2
7	0	+1	5	4	0,33	33,6	45,6	59,6	82,8
8	0	-1	5	0	0,34	28,8	46,4	51,2	73,2
9	0	0	5	2	0,33	39,6	44,0	58,8	78,8

У програмі було застосовано матричний підхід до регресивного аналізу та знаходження коефіцієнтів регресії. На основі отриманих коефіцієнтів регресії (таблиця 3.11) складені рівняння регресії досліджуваних функцій водоцементного відношення (Y_1) та міцностей бетонів (Y_2 - Y_5) за формулою (3.3). Аналіз наведених коефіцієнтів регресії дозволяє зробити ряд технологічних висновків. Введення добавок X-SEED та мікрокремнезему має позитивний вплив на ранню міцність дрібнозернистого бетону (функція

Y_2 , Y_3), про що свідчать додатні знаки при коефіцієнтах b_1 і b_2 . Слід відзначити, що максимальна кількість добавки X-SEED у складі портландцементних композицій негативно впливає на зростання міцності дрібнозернистого бетону (від'ємні знаки при коефіцієнті b_{22}). В той же час, введення мікрокремнезему позитивно впливає на зростання міцності при подальшому твердненні за рахунок розвитку пуцоланових реакцій.

Таблиця 3.11 – Значення коефіцієнтів регресії

Функції відгуку	Коефіцієнт регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
Y_2	35,600	3,067	2,933	0,200	0,000	-4,400
Y_3	45,067	0,933	1,667	1,700	3,000	0,400
Y_4	61,556	4,933	4,600	1,400	1,867	-7,533
Y_5	80,733	5,767	4,167	3,050	-0,500	-3,700

На основі рівнянь регресії одержано моделі міцності надшвидкотверднучих композицій через 1, 2, 7 та 28 діб тверднення в нормальних умовах (рисунок 3.16), що дозволило визначити оптимальне співвідношення між активними компонентами системи – 5 мас. % мікрокремнезему та 2 мас.% нанорозмірного прискорювача при витраті полікарбоксилатного суперпластифікатора 1 мас.% з одержанням екстремумів ранньої ($R_{c1}=39,6$ МПа) та стандартної ($R_{c28}=80,6$ МПа) міцності.

Згідно з стандартними випробуваннями за ДСТУ Б В.2.7-187:2009 модифікована портландцементна композиція ПЦ І-500Р+МК+РСЕ+Х-SEED характеризується показниками ранньої міцності $R_{c1}=27,9$ МПа та стандартної міцності $R_{c28}=59,5$ МПа при реалізації пластифікуючого ефекту ($\Delta PK=35\%$) (рисунок 3.17). При забезпеченні водоредукуючого ефекту ($\Delta B/C=25,6\%$) міцність через 28 діб досягає 69,9 МПа [134].

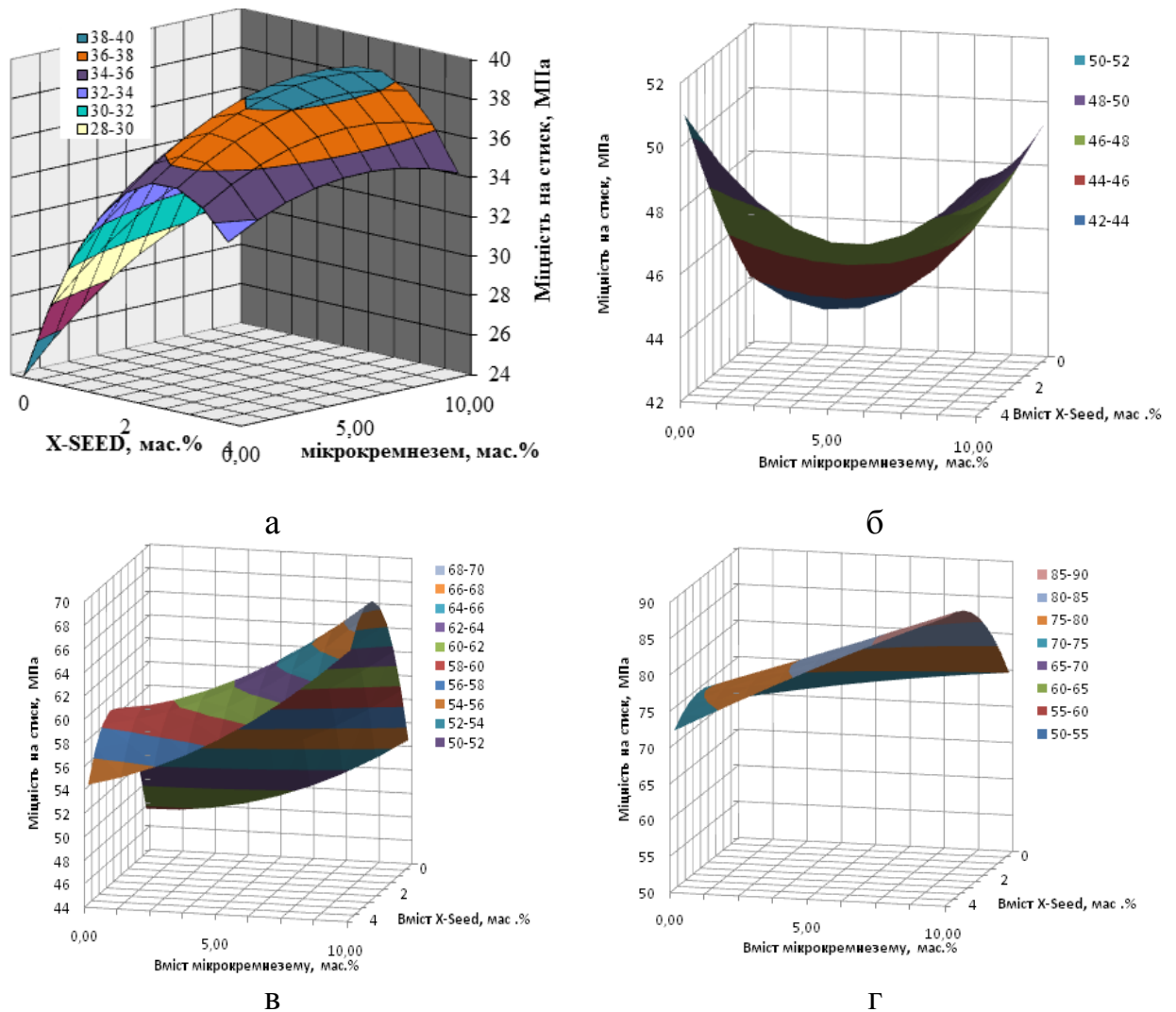


Рисунок 3.16 – Моделі міцності модифікованої портландцементної композиції через 1 (а), 2 (б), 7 (в) 28 (г) діб

Портландцементна композиція ПЦ I-500P+МК+PCE+X-SSD характеризується прискореною кінетикою набору ранньої міцності ($R_{c1}/R_{c28}=46,2\%$; $R_{c2}/R_{c28}=56,5\%$), та за показниками стандартної міцності відповідає вимогам щодо надшвидкотверднучих та високоміцних цементів згідно з ДСТУ Б В 2.7.281:2011. Міцність через 18 год розробленої надшвидкотверднучої портландцементної композиції становить 28,4 МПа, що в 1,7 рази перевищує міцність портландцементу ПЦ I-500P-Н без добавок.

Суттєве значення для одержання однорідної бетонної суміші і для надійного зчеплення бетону з арматурою має водовідділення. Вода, що відділяється з цементного розчину, збирається під крупним заповнювачем в

масі бетону або під арматурою і викликає послаблення контактної зони цементного каменю з заповнювачем. Використання мінеральних добавок з високим ступенем активної поверхні, на якій адсорбується вода, забезпечують стабілізаційний ефект [18].

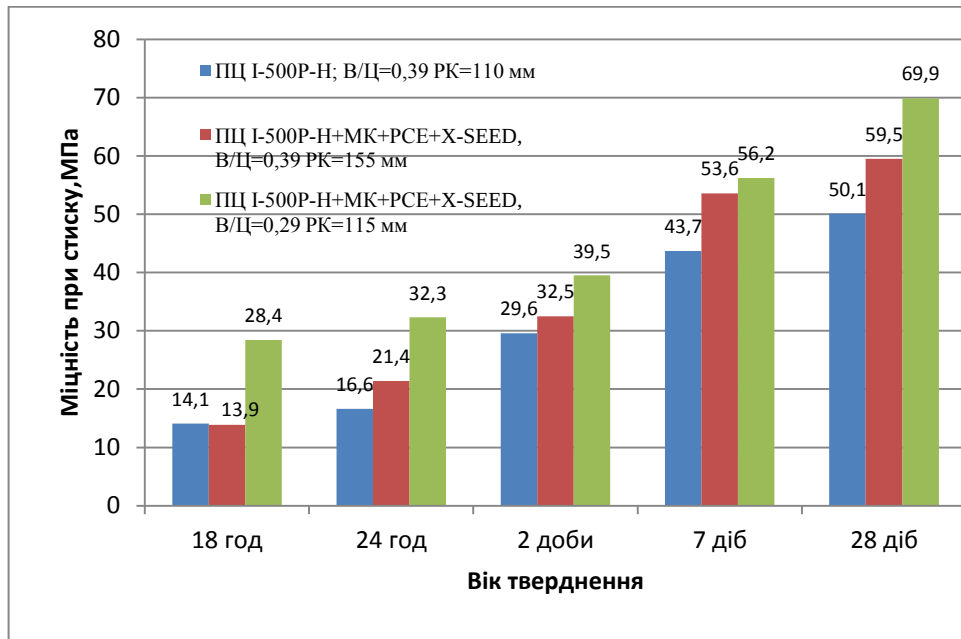


Рисунок 3.17 – Міцність на стиск ПЦ I-500P-H і надшвидкотверднучих портландцементних композицій

Результатами визначень об'ємного коефіцієнта водовідділення (K_v , %) згідно з ДСТУ Б В.2.7-186:2009 встановлено, що для ПЦ I-500P-H $K_v=13,3\%$ (рисунок 3.18). Сумісне використання мікрокремнезему та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу внаслідок гомогенізації суспензії та збільшення дисперсності забезпечує зменшення водовідділення ($K_v=1,06\%$), що пояснюється вищою седиментаційною стійкістю ультрадисперсних частинок мікрокремнезему порівняно з частинками портландцементу. Аналогічним водовідділенням характеризується портландцемент, модифікований добавкою PCE+X-SEED, що стабілізує систему за рахунок дефлокуляції частинок портландцементу.

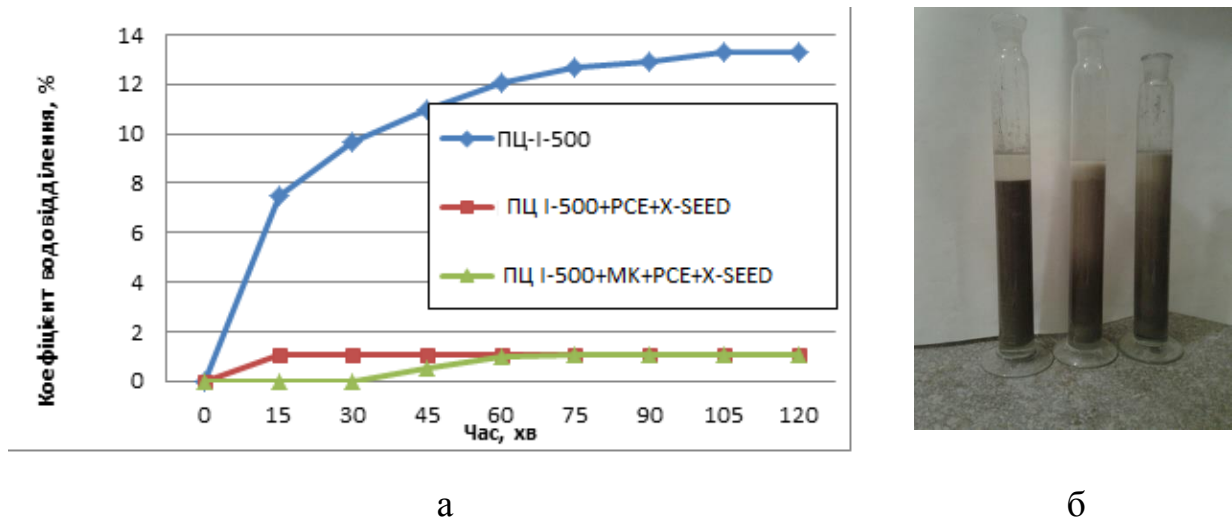


Рисунок 3.18 – Кінетика зміни коефіцієнтів водовідділення надшвидкотверднучих портландцементних композицій

Показано, що міцність через 2 доби тверднення в нормальних умовах для каменю на основі ПЦ I-500P-H 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 [135]. 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 % (рисунок 3.19).

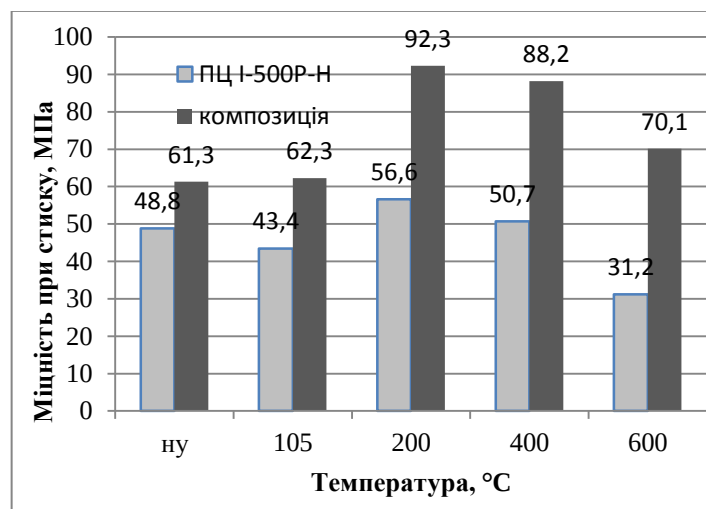


Рисунок 3.19 – Міцність надшвидкотверднучих композицій, що тверднули 2 доби, та піддавались дії підвищених температур

Застосування оптимальної кількості мінеральних та хімічних модифікаторів дає можливість одержувати надшвидкотверднучі портландцементні композиції з необхідними реологічними, фізико-механічними властивостями для різних умов тверднення та експлуатації, що потребує проведення досліджень з особливостей процесів їх гідратації в умовах теплової обробки та при підвищених температурах.

3.4. Фізико-хімічні особливості гідратації надшвидкотверднучих портландцементних композицій

Для вивчення особливостей процесів гідратації надшвидкотверднучих портландцементних композицій проводили рентгенофазовий аналіз цементного каменю, гідратованого 1 добу в нормальних умовах та після теплової обробки (40 °C), на основі ПЦ І-500Р-Н без добавок та портландцементної композиції ПЦ І-500Р-Н+РСЕ+Х-SEED. Продукти гідратації портландцементу без добавок і з добавками, що тверднув у нормальних умовах, представлені лініями гідроксиду кальцію ($d/n = 0,492$; $0,262$ нм) та еtringіту ($d/n = 0,979$ нм) (рисунок 3.20).

Слід відзначити, що на дифрактограмі каменю на основі портландцементу з добавкою РСЕ інтенсивність лінії $d/n = 0,218$ нм, яка відповідає негідратованому трикальцієвому силікату, є вищою, а ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – нижчою, що свідчить про сповільнення процесів гідратації у ранній період в присутності полікарбоксилатів. Проведеними дослідженнями встановлено, що при введенні в портландцементну систему суперпластифікатора нової генерації на основі полікарбоксилатів, підвищується рухливість системи. Він, адсорбуючись на поверхні високодисперсних цементних частинок, створює мономолекулярний шар, який згладжує кути, поверхневі нерівності, знижує анізотричність

частинок, надаючи їм більшу сферичність і створює структурно-механічний бар'єр, який забезпечує стабільність системи в часі, з іншого боку спричиняє сповільнення гідратаційних процесів.

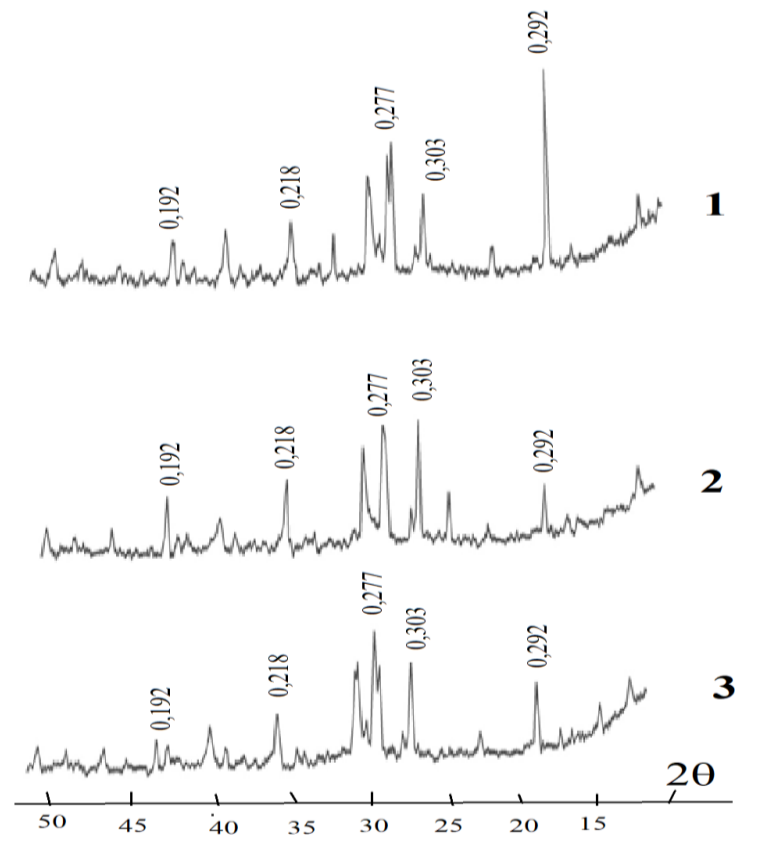


Рисунок 3.20 – Дифрактограми портландцементного каменю, гідратованого 1 добу в нормальних умовах, на основі: 1 – ПЦ I-500P-H; 2 – ПЦ I-500P-H+PCE; 3 – ПЦ I-500P-H+PCE+X-SEED

При введенні комплексного модифікатора PCE+X-SEED інтенсивність ліній негідратованих клінкерних мінералів ($d/n = 0,279; 0,218$ нм) є слабшою, ніж на дифрактограмі портландцементу без добавок, що свідчить про прискорення процесів гідратації портландцементу. За результатами рентгенофазового аналізу цементного каменю без добавок та з добавкою суперпластифікатора PCE та прискорювача тверднення X-SEED через 28 діб тверднення в повітряно-вологих умовах виявлено, що продукти гідратації портландцементу без добавок і з добавками полікарбоксилатів зображено лініями гідроксиду кальцію ($d/n = 0,492; 0,262$ нм) та еtringіту ($d/n =$

0,979 нм) (рисунок 3.21). Слід відзначити, що інтенсивність ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на дифрактограмі портландцементу з добавками є слабшою, а інтенсивність ліній негідратованих клінкерних мінералів ($d/n = 0,279; 0,219$ нм) сильнішою, ніж на дифрактограмі портландцементу без добавок, що свідчить про формування підвищеної кількості гідросилікатів кальцію [140, 151].

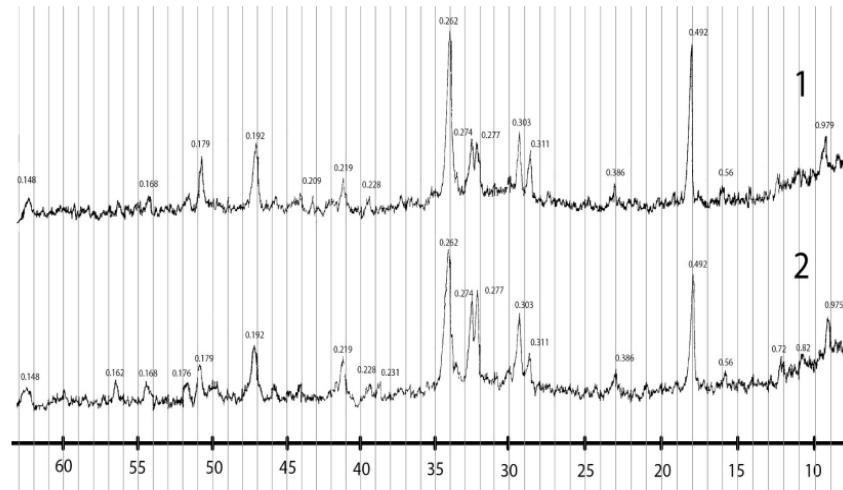


Рисунок 3.21 – Дифрактограми портландцементного каменю, гідратованого 28 діб, на основі: 1– ПЦ I-500P-H; 2– ПЦ I-500P-H+PCE+ X-SEED

При дослідженні особливостей гідратації модифікованих портландцементів, які піддавали тепловій обробці за низькотемпературним режимом (температура ізотермічного прогріву складала $40\text{ }^{\circ}\text{C}$), встановлено, що з підвищенням температури інтенсифікуються процеси гідратації портландцементу (рисунок 3.22).

Ступінь гідратації портландцементу без добавок після теплової обробки зростає в 1,39 рази порівняно з портландцементом, що тверднув 1 добу в нормальних умовах. При введенні комплексного модифікатора Glenium+X-SEED ступінь гідратації зростає в 1,41 рази. Слід відзначити інтенсифікацію процесів структуроутворення в цементній системі з добавкою Glenium, про що свідчить зростання інтенсивності ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$. У той же час, в камені з комплексним модифікатором PCE+X-SEED лінії, які

відповідають портландиту, є нижчими, що свідчить про утворення рентгеноаморфних гідросилікатів кальцію.

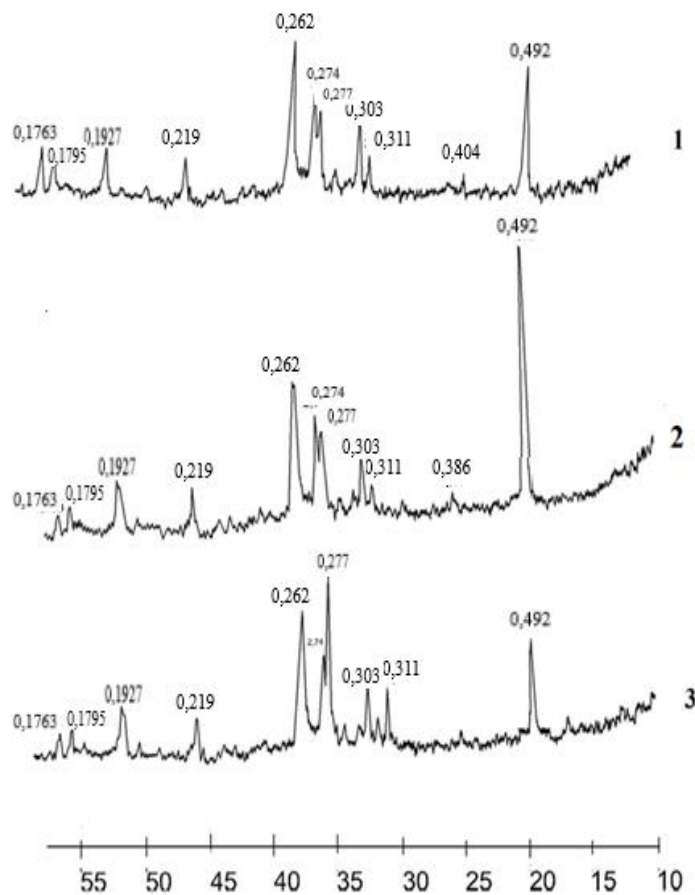


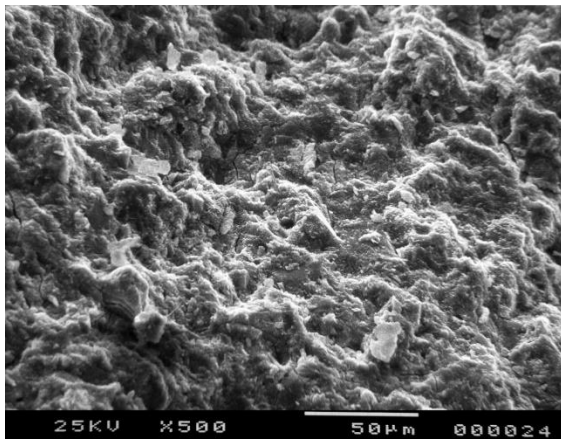
Рисунок 3.22 – Дифрактограми портландцементного каменю після теплової обробки на основі: 1 – ПЦ I-500P-H; 2 – ПЦ I-500P-H+PCE; 3 – ПЦ I-500P-H+PCE+ X-SEED

Методом растрової електронної мікроскопії досліджено особливості мікроструктури каменю на основі портландцементу ПЦ I-500P-H, модифікованого добавкою ЛСТ, та на основі надшвидкотверднучої цементуючої системи і свідчить про формування щільної структури (рисунок 3.23).

Процеси, що відбуваються в бетоні під час нагрівання пов'язані з процесами випаровування води, дегідратації, зсідання цементного каменю. У зв'язку з цим, досліджено особливості процесів, що відбуваються при нагріванні на зразках цементного каменю (таблиця 3.11). Показано, що

міцність через 3 доби тверднення в нормальних умовах для каменю на основі ПЦ І-500Р становить 48,8 МПа, у той час, як міцність модифікованого каменю зростає до 61,3 МПа (технічний ефект становить $f_{cm2}=25,6\%$). Після сушіння та нагрівання до 200 °С міцність модифікованого цементного каменю становить 86,6 МПа, після 600 °С міцність знижується на 38 %, у той час як міцність бездобавочного каменю знижується на 45 %.

ПЦ І-500Р-Н+ЛСТ



ПЦ І-500Р-Н+PCE+X-SEED

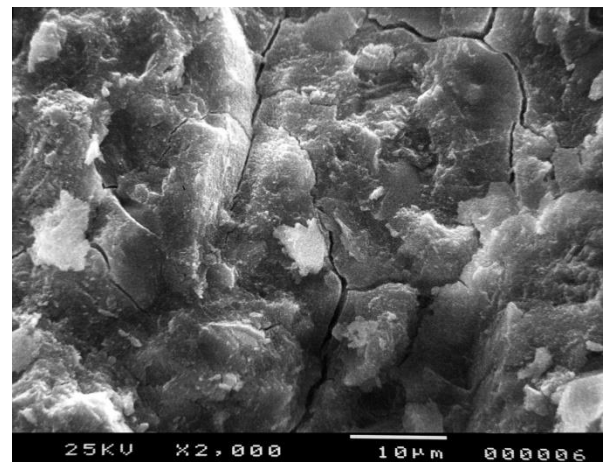
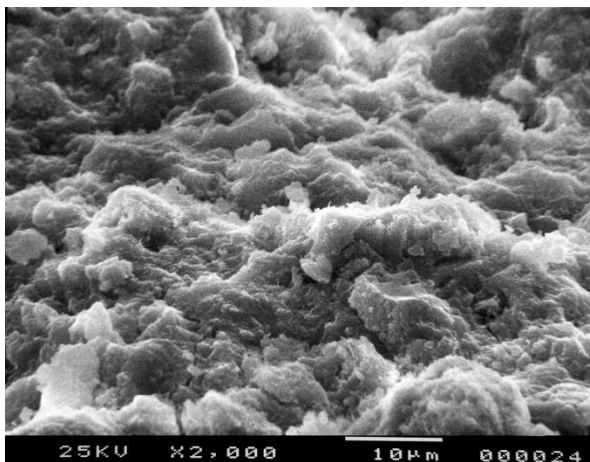
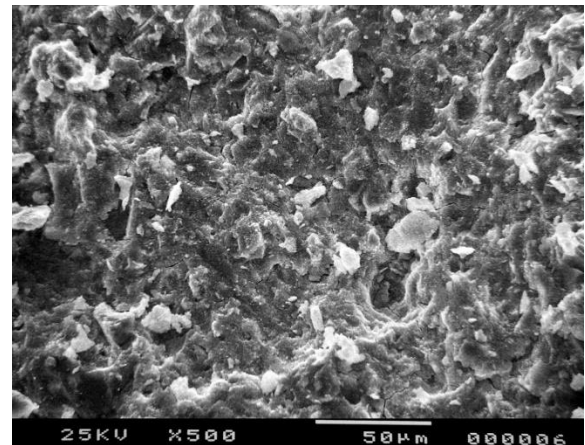


Рисунок 3.23 – Мікроструктура каменю на основі портландцементу ПЦ І-500, модифікованого добавкою ЛСТ, та на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції після теплової обробки ($T_{i3}=40\text{ °C}$)

Через 2 доби тверднення камінь на основі наномодифікованої цементуючої системи характеризується втратами маси після 105⁰С в 2 рази меншими порівняно з бездобавочним каменем (рисунок 3.24). Після нагрівання до температури 600 °С втрати маси модифікованого каменю є

дещо більшими порівняно з бездобавочним каменем, що пов'язано з підвищеним ступенем зв'язуванням води гідратні сполуки.

Таблиця 3.12 – Міцність надшвидкотверднучих портландцементних композицій (тісто 1:0)

В'язуче	НГТ, %	Границя міцності на стиск, МПа						
		нормальні умови, у віці, діб				через 2 доби, нагріті до температури, °С		
		1	2	7	28	105	200	600
ПЦ І-500Р-Н	0,31	26,0	48,8	62,3	73,0	43,4	56,6	31,2
ПЦ І-500Р-Н+ МК+РСЕ	0,24	32,5	61,3	72,6	95,0	60,5	86,6	53,7
ПЦ І-500Р-Н + МК+РСЕ+ X-SEED	0,23	36,5	66,3	76,8	99,3	62,3	92,3	60,1

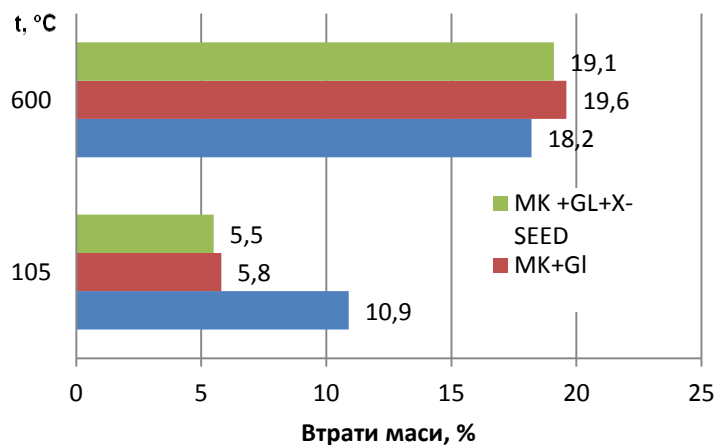


Рисунок 3.24 – Втрати маси цементного каменю через 3 доби тверднення

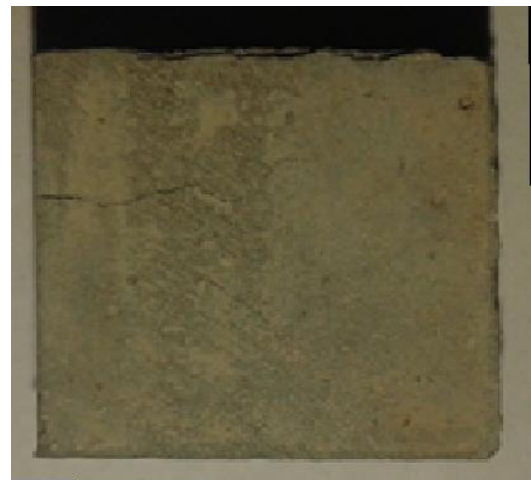
Після нагрівання зразків на основі ПЦ І-500Р-Н до 600 °С відбувається розклад портландиту, що супроводжується значним тріщиноутворенням (рисунок 3.25, а). У той же час, камінь на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції після витримання при температурі 600 °С залишається цілісним, що зумовлено переважаючою кількістю гідросилікатів в структурі каменю, дегідратація яких відбувається

поступово в інтервалі температур 120-180 °С без суттєвої перебудови структури (рисунк 3.25, б).

У надшвидкотверднучих портландцементних композиціях більш повно відбувається зв'язування гідроксиду кальцію за рахунок ранньої пуцоланової реакції, що зумовлює підвищення залишкової міцності цементного каменю на їх основі після нагрівання. Загальновідомою причиною спаду міцності цементного каменю при впливі підвищених температур є дегідратація і перекристалізація гідратних новоутворень, що зумовлює виникнення деструктивних явищ в цементному камені [132]. З метою виявлення особливостей протікання процесів, які проходять в цементному камені при нагріванні, проводили дослідження фазового складу і мікроструктури після впливу підвищених температур.



а



б

Рисунок 3.25 – Зразки цементного каменю, гідратованого 2 доби, після витримування при температурі 600 °С на основі ПЦ I-500P-H (а) та ПЦ I-500P-H + МК+PCE+ X-SEED (б)

Згідно з результатами рентгенофазового аналізу на дифрактограмі каменю на основі портландцементу ПЦ I-500P-H через 2 доби тверднення у нормальних умовах (рисунк 3.26) спостерігаються лінії гідратних фаз кальцію гідроксиду ($d/n=0,490$; $0,262$; $0,190$ нм) та еtringіту ($d/n=0,971$;

0,561; 0,388 нм) [136]. На дифрактограмах каменю надшвидкотверднучої портландцементної композиції інтенсивність ліній трикальцієвого силікату ($d/n=0,218$ нм) та портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ є меншою порівняно з каменем на основі ПЦ І-500Р-Н. Це свідчить, що зростання міцності модифікованого цементного каменю зумовлене прискоренням гідратаційних процесів та пуцоланових реакцій.

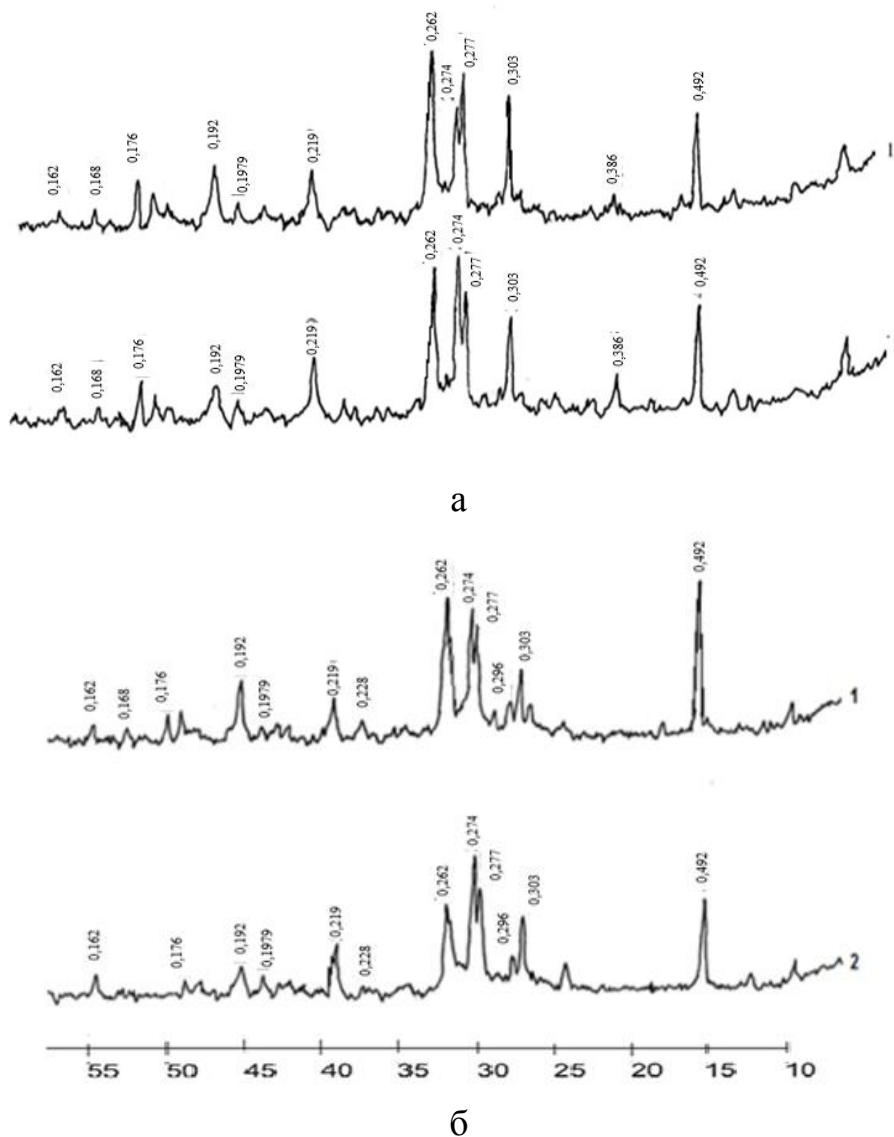


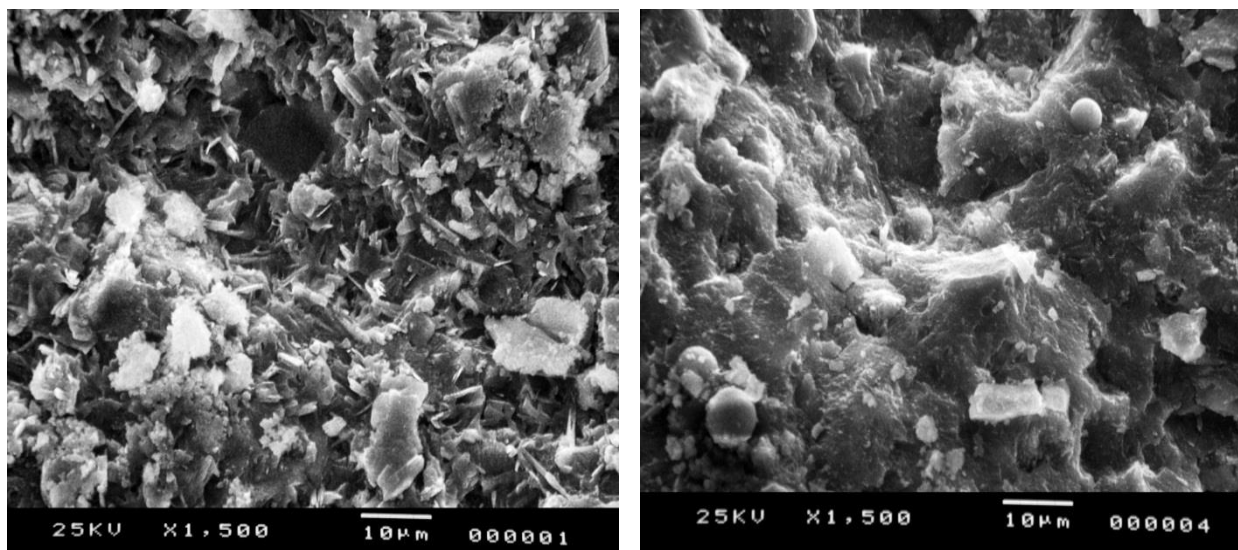
Рисунок 3.26 – Дифрактограми каменю, гідратованого 2 доби в нормальних умовах (а), та після нагрівання до 200 °С (б) на основі: 1 - ПЦ І-500Р-Н; 2 – надшвидкотверднучої портландцементної композиції

Згідно з даними рентгенофазового аналізу каменю на основі ПЦ І-500Р-Н, гідратованого 2 доби та нагрітого до температури 200 °С

процеси гідратації прискорюються при підвищеній температурі, про що свідчить більша інтенсивність ліній портландиту ($d/n=0,490; 0,262; 0,190$ нм), в результаті цього міцність каменю на основі портландцементу ПЦ І-500 без добавок зростає. Слід відзначити, що міцність каменю на основі модифікованої портландцементної композиції підвищується внаслідок інтенсифікації пуцоланових реакцій. Це підтверджується зменшенням інтенсивності ліній аліту C_3S ($d/n=0,218$ нм) та портландиту $Ca(OH)_2$ порівняно з каменем на основі модифікованої композиції, яка тверднула в нормальних умовах. Гелеподібні гідратні новоутворення заповнюють міжзерновий простір, ущільнюючи структуру, в результаті чого відбувається зростання міцності каменю.

Слід відзначити, що швидкість твердофазових реакцій зв'язування CaO у силікати та алюмінати кальцію, при введенні до складу портландцементу мінеральних компонентів, залежить значною мірою від щільності цементного каменю. Чим щільніша структура цементного каменю, тим повніше проходить зв'язування оксиду кальцію.

Особливості мікроструктури каменю на основі ПЦ І-500Р-Н без добавок і цементної композиції, модифікованої золою-винесення, мікрокремнеземом та полікарбоксилатним суперпластифікатором, через 2 доби тверднення в нормальних умовах та витримування за температури $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ досліджували з допомогою методу растрової електронної мікроскопії (рисунок 3.27,а). Камінь на основі ПЦ І-500Р-Н без добавок характеризується пористою структурою. У порах утворюються продукти гідратації – гексагональні кристали портландиту та волокнисті гідросилікати кальцію. Для мікроструктури каменю на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції, модифікованої орґано-мінеральною добавкою, характерна однорідність, щільність, менша кількість пор та нижчий ступінь закристалізованості продуктів гідратації (рисунок 3.27,б).

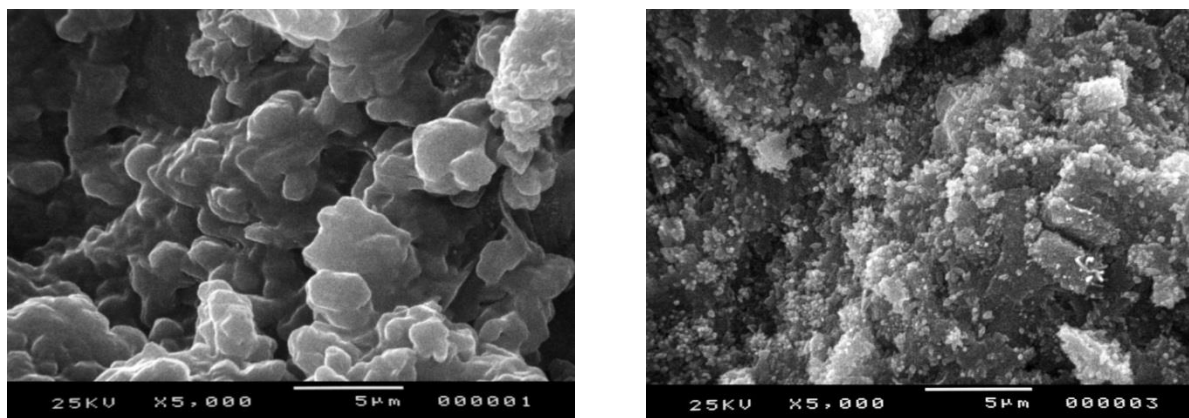


а

б

Рисунок 3.27 – Мікроструктура цементного каменю на основі ПЦ I-500P-N (а) та цементної композиції (б), що тверднув 2 доби в нормальних умовах та нагрівався до 200 °С

Дослідженнями особливостей мікроструктури каменю на основі портландцементу ПЦ I-500P-N без добавок і надшвидкотверднучої портландцементної композиції методом растрової електронної мікроскопії, через 2 доби тверднення та витримування при 600 °С встановлено, що камінь без добавок характеризується пористою рихлою структурою (рисунок 3.28, а). Розклад портландиту спричиняє значне утворення тріщин в цементному камені та втрату його міцності. Як видно з рисунку 3.28, б, мікроструктура каменю на основі модифікованої портландцементної композиції з органо-мінеральною добавкою, характеризується однорідною, щільною структурою з меншою кількістю пор внаслідок глибших гідратаційних процесів та зв'язування гідроксиду кальцію в гідросилікати.



а

б

Рисунок 3.28 – Мікроструктура каменю на основі ПЦ І-500Р-Н (а) та модифікованої портландцементної композиції (б) після нагрівання до 600 °С

Отже, одержання надшвидкотверднучих портландцементних композицій забезпечується шляхом комплексного модифікування цементуючих систем ультрадисперсними мінеральними компонентами та полікарбоксилатним суперпластифікатором за рахунок направленою керування процесами гідратації клінкерних мінералів з утворенням підвищеної кількості гідросилікатної фази і реакцій пуцоланової взаємодії гідратних продуктів з активними мінеральними компонентами в неклінкерній частині композицій.

Висновки до розділу

1. Проведено оцінку добавок-модифікаторів за критерієм водоредукуючого ефекту. При модифікуванні портландцементу ПЦ І-500Р-Н лігносульфонатним пластифікатором та полікарбоксилатним суперпластифікатором розрахункова відстань між частинками зменшується до 1,78 та 1,46 мкм відповідно, у той час як у тісті без добавок відстань становить 1,94 мкм. Введення нанодисперсного модифікатора X-SEED

сприяє більшою мірою заповненню міжзернового простору до 0,15 мкм, що сприяє синтезу ранньої міцності.

2. Аналізом комплексної оцінки ефективності використаних модифікаторів встановлено, що через 24 год активізуються процеси раннього структуроутворення в обмеженому міжзерновому просторі каменю, модифікованого комплексним модифікатором PCE+X-SEED, і міцнісний коефіцієнт перевищує коефіцієнт для портландцементу з монодобавкою-прискорювачем X-SEED в 1,11 рази. Коефіцієнт ефективності K_e , який враховує як прискорюючу, так і пластифікуючу дію добавок, має найбільше значення для зразків з комплексною добавкою PCE+X-SEED як через 12 год, так і через 24 год та становить відповідно 2,59 і 3,62.

3. Результатами термодинамічних досліджень показано, що введення комплексного модифікатора PCE+X-SEED зумовлює прискорення досягнення температурного максимуму на 1,3 год. При цьому максимальна температура дещо знижується і становить 94,3°C. Оцінкою питомого тепловиділення встановлено, що портландцемент ПЦ І-500Р-Н, модифікований добавкою X-SEED характеризується питомим тепловиділенням 130-140 кДж/кг протягом тривалого часу (до 3 год).

4. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції „ПЦ І-500Р-Н – суперпластифікатор PCE – наночастинки C-S-H” характеризуються високою ранньою $R_{c1}=18,9$ МПа та стандартною ($R_{c28} = 58,3$ МПа) міцністю з високорухливих сумішей (РК=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.

5. Дрібнозернистий бетон на основі надшвидкотвердучої композиції (ПЦ І-500Р-Н+0,8 мас.% PCE + 2 мас.%X-SEED) характеризується найвищими міцнісними показниками. Так, міцність бетону зростає в 2,54 рази порівняно з контрольним складом при $T_{iz} = 20$ °C, при $T_{iz} = 40$ °C та

$T_{i3} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в 1,73 і 1,52 рази відповідно. Використання портландцементної композиції ПЦ I-500+PCE+X-SEED сприяє підвищенню коефіцієнта відносної міцності бетону K_c при різних температурах ізотермічного прогріву. Так, при $T_{i3}=20^{\circ}\text{C}$ значення коефіцієнта K_c становить 2,55; а також 1,73 і 1,52 при $T_{i3}=40^{\circ}\text{C}$ і $T_{i3}=60^{\circ}\text{C}$ відповідно. Дані результати свідчать про високу ефективність надшвидкотверднучих композицій при низькотемпературних режимах теплової обробки.

6. Методом експериментально-статистичного моделювання встановлено оптимальне співвідношення між добавками-модифікаторами у складі надшвидкотверднучих портландцементних композицій – 2 мас.% X-SEED та 5 мас. % мікрокремнезему. Розроблена надшвидкотверднуча портландцементна композиція характеризується високою ранньою ($R_{ct1}=32,3\text{ МПа}$, $R_{ct2}=39,5\text{ МПа}$) і стандартною ($R_{ct28}= 69,9\text{ МПа}$) міцністю. При цьому надшвидкотверднуча портландцементна композиція характеризується значним темпом наростання міцності через 1 добу – $R_{c1}/R_{c28} = 46,2\%$ та через 2 доби – $R_{c2}/R_{c28} = 56,5\%$, що задовольняє вимоги щодо надшвидкотверднучих високоміцних в'язучих.

7. Згідно даних рентгенофазового аналізу цементного каменю після нагрівання до температури 200°C міцність каменю на основі портландцементу ПЦ I-500 без добавок зростає за рахунок прискорення процесів гідратації при підвищеній температурі з утворенням портландиту. У той же час міцність каменю на основі модифікованої портландцементної композиції з органомінеральними 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.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МОДИФІКОВАНИХ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ НАДШВИДКОТВЕРДНУЧИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ

4.1. Принципи проектування складів модифікованих високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій для низькотемпературних режимів теплової обробки

Вирішення завдань з підвищення ефективності виробництва залізобетонних виробів та конструкцій на підприємствах та будівельних об'єктах спрямовано на удосконалення технологічних режимів та зменшення енерговитрат за рахунок освоєння енергоощадних технологій. При цьому виникає необхідність оперативного регулювання та коректування складів бетонів, а також режимів їх тверднення для забезпечення регламентованих показників властивостей, якості та економічності.

Одним із найбільш ефективних напрямків зниження енергоємності збірних залізобетонних виробів є забезпечення умов для формування упорядкованої малодефектної структури цементної матриці без теплової обробки бетону. Такі технології вимагають якісно нового підходу, що дозволяє забезпечити реалізацію потенціалу в'язучих властивостей портландцементу та максимальну міцність бетону [84].

Склади бетонних сумішей збірного залізобетону можна регулювати з використанням різних алгоритмів при зміні технологічних параметрів, зокрема активності цементу, вологості і гранулометрії заповнювачів, водоцементного відношення, вмістом та видом добавок. Адаптація складів і їх коректування до конкретних умов формування та тверднення дозволяють

радикально підвищити ефективність контролю якості бетону, скерувати його не тільки на досягнення надійних показників якості продукції, що виготовляється, але й на суттєву економію цементу та інших ресурсів [3, 20]. Разом з тим, технологія безпрогрівного збірного залізобетону вимагає нового підходу до формування структури цементуючої матриці бетону, в основі якого лежить можливість регулювання процесами раннього структуроутворення та тепловиділення шляхом модифікування хімічними добавками, раціонального підбору складу з одержанням оптимальної пустотності для забезпечення високих експлуатаційних характеристик будівельних конструкцій і виробів [6, 32].

Проектування складів бетонної суміші проводять, виходячи із забезпечення відповідності технічним вимогам щодо легковкладальності, технологічних параметрів виготовлення залізобетонних виробів, характеристик бетону, зокрема міцності, довговічності, захисту арматури та закладних деталей від корозії. Склад бетону слід підбирати, виходячи з рівня міцності бетону згідно з ДСТУ Б В.2.7-224 з урахуванням фактичної однорідності бетону. Для раціонального проектування складу бетону необхідно підібрати співвідношення крупного та дрібного заповнювачів, щоб досягнути мінімально можливої витрати цементного тіста, яка буде залежати від пустотності заповнювачів, а також від їх внутрішньої поверхні, яка визначається гранулометричним складом і водопотребою заповнювачів. У національному стандарті ДСТУ-Н Б В 2.7-299:2013 запропоновано до апробації європейський досвід одержання заповнювачів для важкого бетону. Проблема несумісності EN 206-1:2000 з нормативними документами України щодо вимог до розмірів сит розв'язана шляхом перерахунку, що ґрунтується на апроксимації значень проходу матеріалу через сита з отриманням ситових кривих для поліфракційного заповнювача, який містить дрібний та крупний заповнювачі [10]. У зв'язку з цим, у роботі проведено проектування складу високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій з врахуванням нормативних кривих

розподілу частинок при заданому максимальному розмірі зерен 20 мм з одержанням співвідношення фракцій заповнювача для забезпечення структури бетону, оптимальної за критерієм міцності. Для регулювання та оптимізації гранулометричного складу заповнювачів використаний гравійний пісок Побережжя та щебінь Королевського родовища двох фракцій 5-10 та 5-20 мм. Як видно з рисунка 4.1, крива розсіювання заповнювачів проходить між кривою А та кривою В, це означає, що суміш заповнювача вважається оптимальною.

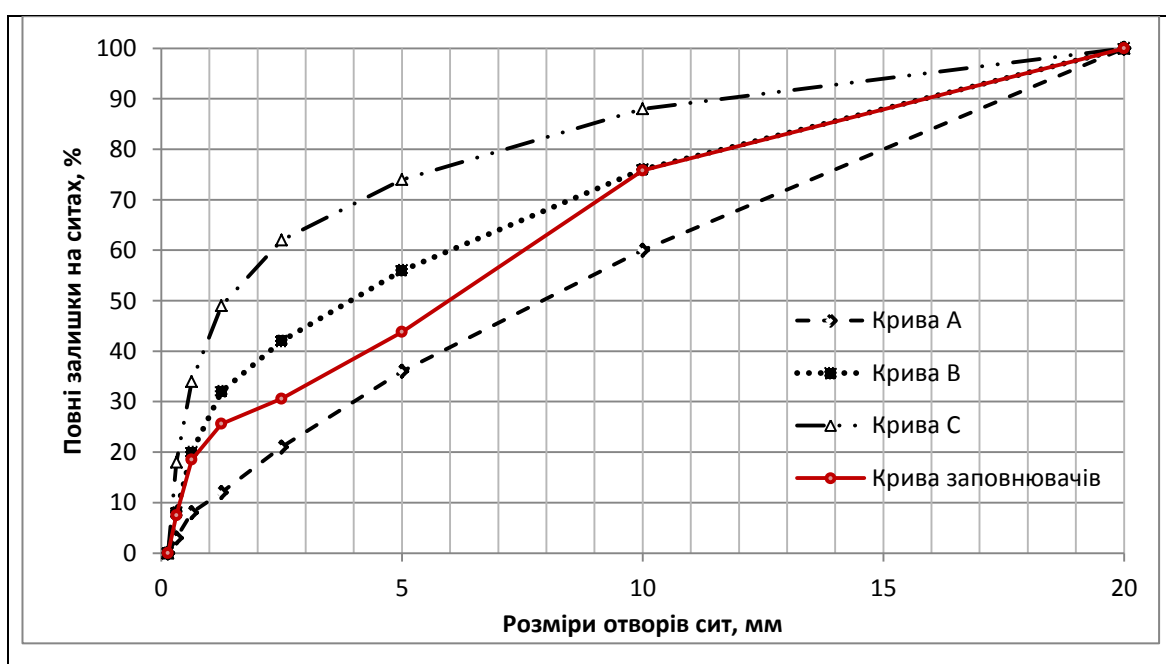


Рисунок 4.1 – Криві розсіювання суміші заповнювачів з максимальним розміром зерен 20 мм

Кількість води в бетонній суміші навіть за низьких водоцементних відношеннях при одержанні жорстких бетонних сумішей перевищує необхідну для процесів гідратації портландцементу і визначається необхідністю забезпечення вимог щодо регламентованої легковкладальності. Тому у бетонній суміші завжди міститься надлишок вільної, хімічно незв'язаної води. Значна частина цієї води зв'язана адсорбційно з допомогою сил поверхневого молекулярного притягання. Суттєве зменшення водопотреби бетонної суміші при використанні суперпластифікаторів,

часткове випаровування води та швидке її зв'язування у гідратні продукти може призвести до явища самовисихання. Для визначення істинного водоцементного відношення необхідно врахувати водоутримувальну здатність заповнювачів (необхідна кількість води для їх змочування). Водоутримувальна здатність заповнювачів наведена у таблиці 4.1. Як показали результати розрахунків, істинне водоцементне відношення суміші становить 0,23, що достатньо для забезпечення протікання процесів гідратації портландцементу.

Таблиця 4.1 - Фракційний склад та водопотреба піску

Фракції	Кількість, %	Кількість при витраті 760 кг на 1 м ³ , кг	Водопотреба, л
2,5-1,25	27,5	209	1,7
1,25-0,63	8,5	64,6	0,9
0,63-0,3	13	98,8	2,8
0,3-0,16	31,5	239,4	13,5
0,16-0,08	19,5	148,2	17,3

При виробництві попередньо напружених плит перекриття, виготовлених методом безопалубного формування, виникає ряд проблем, пов'язаних з розопалубленням виробів у короткі терміни, забезпеченням регламентованої передавальної та проектної міцностей, що зумовлює перевитрати портландцементу і використання прогріву. При проектуванні модифікованих високоміцних бетонів для залізобетонних конструкцій за низькотемпературною технологією теплової обробки для підвищення ефективності та забезпечення покращених властивостей бетонів використовували надшвидкотверднучі портландцементні композиції, модифіковані полікарбоксилатним суперпластифікатором та прискорювачем тверднення на основі нанорозмірних частинок гідросилікатів кальцію [56, 61, 154].

Ефективність проектування бетонів з покращеними показниками якості, які забезпечують довговічність бетонних виробів та конструкцій, досягається за рахунок застосування математичних моделей, що враховують і відображають реологію бетонних сумішей, а також апроксимаційних статистичних залежностей, які оцінюють вплив технологічних факторів на експлуатаційні характеристики будівельних матеріалів. При моделюванні складів бетонів для залізобетонних виробів з метою мінімізації витрати портландцементу та одержання спектру рецептурних моделей високоміцного бетону використано метод експериментально-статистичного моделювання. Факторами моделювання властивостей важкого бетону вибрані витрата портландцементу ПЦ І-500Р-Н ($X_1 = 350, 400$ та 450 кг/м^3 бетонної суміші) та кількість суперпластифікатора полікарбоксилатного типу ($X_2 = 0; 0,5; 1,0 \text{ мас.}\%$). При зміні рецептурних рівнів вибраних факторів водовміст бетонної суміші підбирали, виходячи із забезпечення необхідної легковкладальності бетонної суміші (марка Ж2). Зразки тверднули в умовах низькотемпературної теплової обробки за режимом 1+8+2 год з температурою витримування 50°C .

При плануванні експерименту контрольними параметрами слугували:

Y_1 – водоцементне відношення;

Y_2 – істинне водоцементне відношення;

Y_3, Y_4 – міцність бетону після теплової обробки та через 28 діб.

Таблиця 4.2 – Інтервали варіювання та значення рівнів варіювання

Характеристика	Фактори	
	Витрата портландцементу (X_1) кг/м^3 бетонної суміші	Кількість РСЕ, (X_2), мас.%
Нижній рівень «-1»	350	0
Основний рівень «0»	400	0,5
Верхній рівень «+1»	450	1,0

Матриця планування повного двофакторного експерименту, а також отримані результати наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

№	Умовні фактори		Натуральні фактори		В/Ц	В/Ц іст.	Границя міцності при стиску після, МПа		K _c
			Витрата				ТВО/ % від проектної	28 діб	
	X ₁	X ₂	ПЦ, кг	РСЕ, мас. %	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	
1.	+1	+1	450	1,0	0,29	0,20	65,8/142	76,3	1,25
2.	+1	-1	450	1,0	0,34	0,20	52,4/113	80,9	1,00
3.	-1	+1	350	0,5	0,31	0,24	54,7/151	71,3	1,22
4.	-1	-1	350	0,5	0,38	0,24	44,8/124	79,2	1,00
5.	+1	0	450	1,0	0,30	0,20	71,6/154	89,6	1,36
6.	-1	0	350	0,5	0,33	0,24	58,8/163	83,8	1,31
7.	0	+1	400	0	0,30	0,22	62,9/136	72,2	1,25
8.	0	-1	400	0	0,34	0,22	50,3/108	83,3	1,00
9.	0	0	400	0	0,30	0,22	67,5/146	84,2	1,34

У програмі використано матричний підхід до регресивного аналізу та знаходження коефіцієнтів регресії. На основі отриманих коефіцієнтів регресії (таблиця 4.4) складені рівняння регресії досліджуваних функцій водоцементного відношення, істинного водоцементного відношення та міцності бетону. Для пошуку значень змінних факторів X₁ (витрата портландцементу) і X₂ (витрата РСЕ), при яких досліджувані параметри приймають максимальні значення, використали дисоціативно-кроковий метод оптимізації.

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнтів регресії

Функції відгуку	Коефіцієнти регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
Y_1	0,302	-0,015	-0,027	0,012	0,017	0,005
Y_2	0,200	-0,020	-	0,012	0,012	-
Y_3	67,000	4,583	4,317	-1,550	-10,150	1,875
Y_4	82,567	2,083	-3,917	2,172	-6,828	0,825

За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні поверхні та діаграми, що адекватно описують показники міцності після теплової обробки (рисунок 4.2).

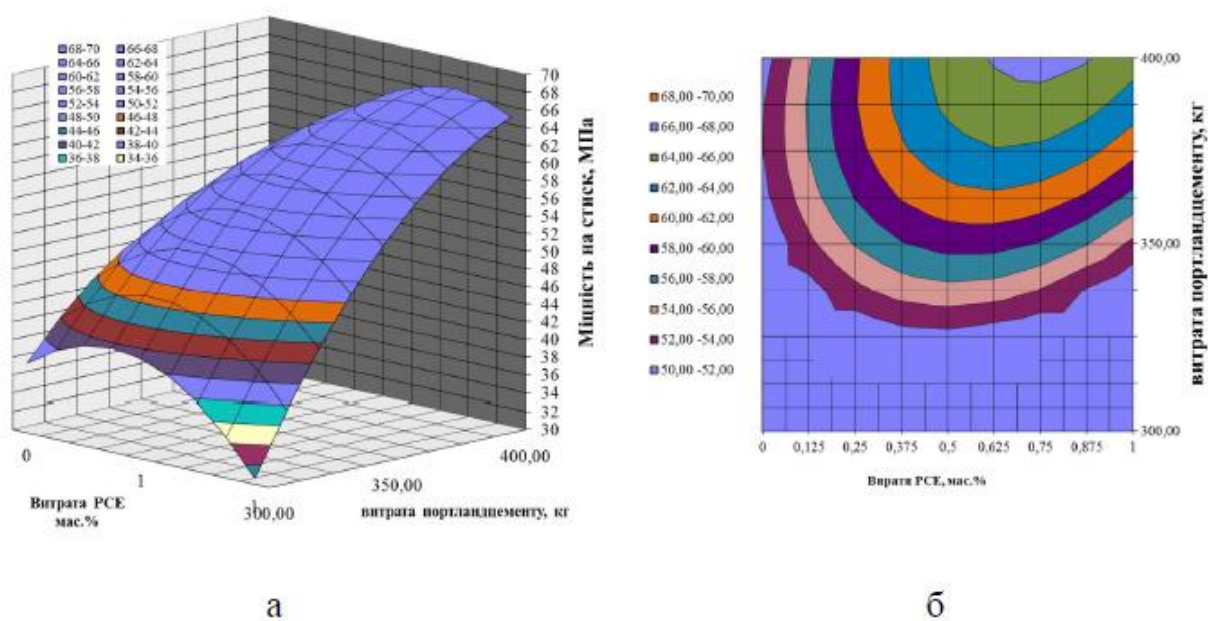


Рисунок 4.2 – Ізопараметрична поверхня (а) та діаграма (б) міцності бетону після теплової обробки

За результатами проведених досліджень встановлено, що при використанні 0,5–0,8 мас.% хімічної добавки полікарбоксилату досягаються максимальні показники міцності швидкотверднучого бетону. Коефіцієнт ефективності використання полікарбоксилатного суперпластифікатора (K_c) в

умовах низькотемпературної теплової обробки при витраті цементу 350, 400 та 450 кг/м³ становить 1,31; 1,34; 1,36 відповідно. Враховуючи значне перевищення міцностей швидкотверднучих бетонів, було запроєктовано склад бетону із витратою цементу Ц=300 кг. Після теплової обробки міцність бетону даного складу становить 39,6 МПа, а міцність у проектному віці 71,1 МПа, що відповідає класу за міцністю С 45/55 (рисунок 4.3). Одержані результати вказують також про можливість зниження температури ізотермічного витримування.

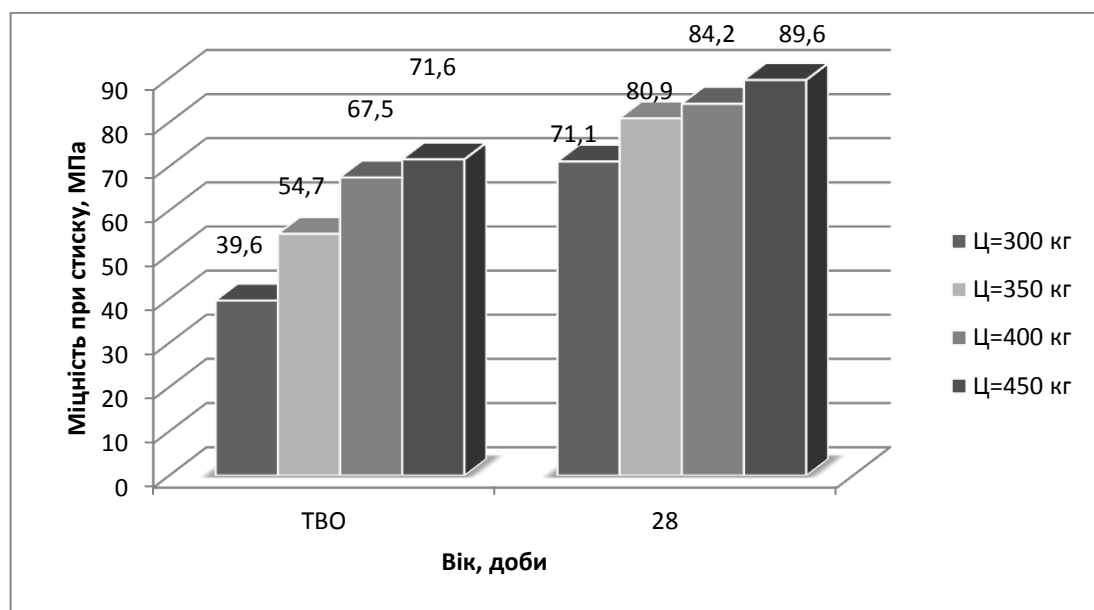


Рисунок 4.3 – Міцність при стиску високоміцних бетонів після теплової обробки

Для бетонів, що піддаються тепловій обробці, важливе значення має тривалість попереднього витримування в нормальних умовах, що дозволяє набрати бетону міцність, щоб протистояти негативному впливу підвищених температур. Для малопрогрівних та безпрогрівних технологій збірного залізобетону важливе значення має кінетика набору міцності бетону в нормальних умовах. Запроєктовано бетони на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції з витратою в'язучого 370 кг на 1 м³ бетонної суміші з використанням суміші заповнювачів оптимізованого складу

(рисунок 4.4). Як показали результати випробувань, модифікований бетон характеризується інтенсивним структуроутворенням у ранні терміни тверднення – через 6 год міцність бетонів досягає 4,8 МПа. Через 18 год міцність бетону становить 35,6 МПа, що відповідає передавальній міцності для проектного класу С 30/35. За показником питомої міцності згідно з ДСТУ Б В 2.7-176 вже через 1 добу тверднення $f_{cm1}/f_{cm28}=0,53$ розроблений бетон відповідає вимогам швидкотверднучих, через 2 доби показник питомої міцності досягає показника $f_{cm2}/f_{cm28}=0,71$. У проектному віці міцність бетону на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції становить 82,6 МПа, що відповідає вимогам високоміцних.

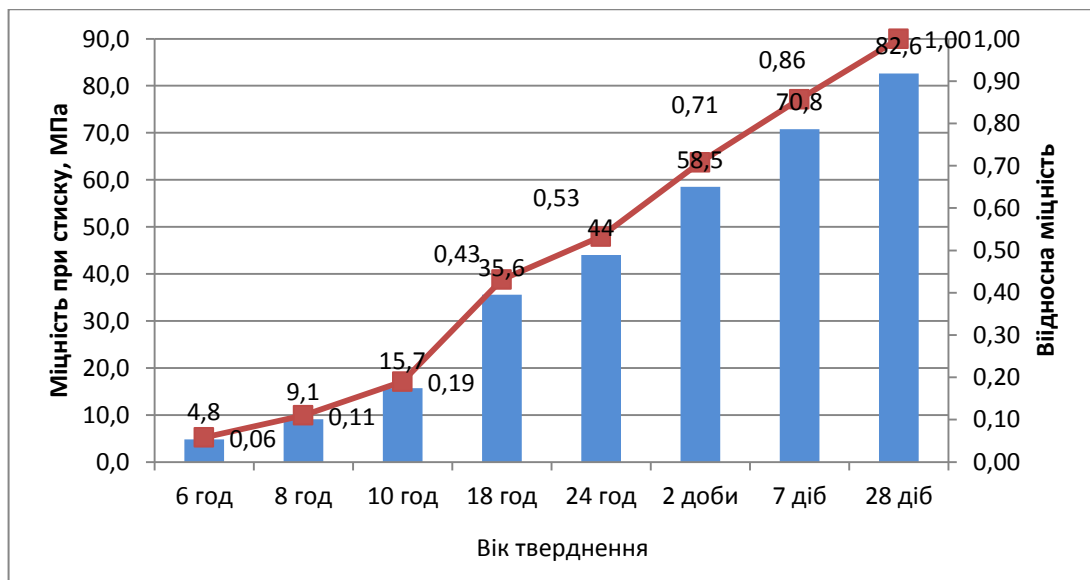


Рисунок 4.4 – Кінетика набору міцності високоміцного бетону на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції в нормальних умовах

Для визначення доцільності використання надшвидкотверднучих портландцементів для виготовлення бетонів круглопустотних плит перекриття безопалубним методом, найважливішими критеріями для якого є жорсткість та швидкий набір міцності у ранньому віці, запроектовано важкі бетони марки за легковкладальністю бетонної суміші Ж2 класу за міцністю С 30/35 на їх основі, для порівняння заформовано бетон, модифікований традиційною пластифікуючою добавкою на основі лігносульфонатів.

Добавка PCE забезпечує істотніший водоредукуючий ефект порівняно з добавкою ЛСТ. Необхідна рухливість бетонної суміші з добавкою PCE досягається при В/Ц=0,35, тоді як з добавкою ЛСТ – В/Ц=0,39. Заформовані зразки бетонів тверднули в нормальних умовах, а також піддавали тепловій обробці за режимом 1+8+1 год з температурою ізотермічного прогріву 40 °С. Як видно з результатів випробувань міцності бетонів в нормальних умовах тверднення, міцнісні показники композитів з комплексною добавкою PCE+X-SEED у ранні терміни (через 1 добу) є вищими на 42,6 та 14,5% порівняно з бетоном, модифікованим монодобавками ЛСТ та PCE відповідно (рисунок 4.5). Через 28 діб тверднення значення міцності відповідають показникам для класів C45/55 для бетону, модифікованого добавкою ЛСТ, та C50/60 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 - $f_{cm1}/f_{cm28}=0,53$, що відповідає вимогам надшвидкотверднучих. Слід відзначити, що через 1 добу тверднення в нормальних умовах бетон на основі надшвидкотверднучої композиції досягає передаточної міцності для бетонів класу C30/35.

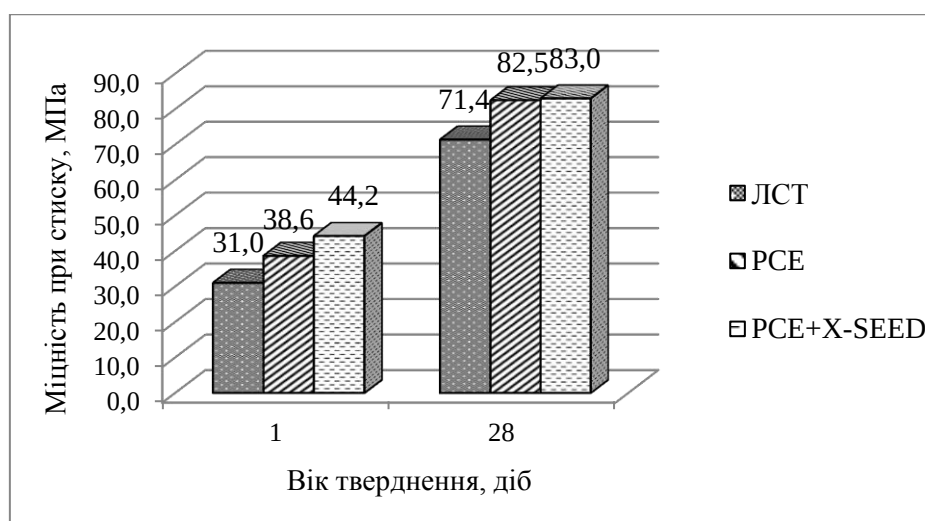


Рисунок 4.5 – Міцність бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементів в нормальних умовах тверднення

Як видно з рисунка 4.6, найбільшу міцність після тепловологої обробки набрав склад з використанням комплексної добавки PCE+X-SEED – 48,5 МПа, що становить 107,8% від проектної міцності. У той час, як міцність бетону, модифікованого добавкою на основі лігносульфонатів Centrament N3, після теплової обробки становить 36,4 МПа, що відповідає 80,8% проектної і забезпечує нормовані показники передавальної міцності.

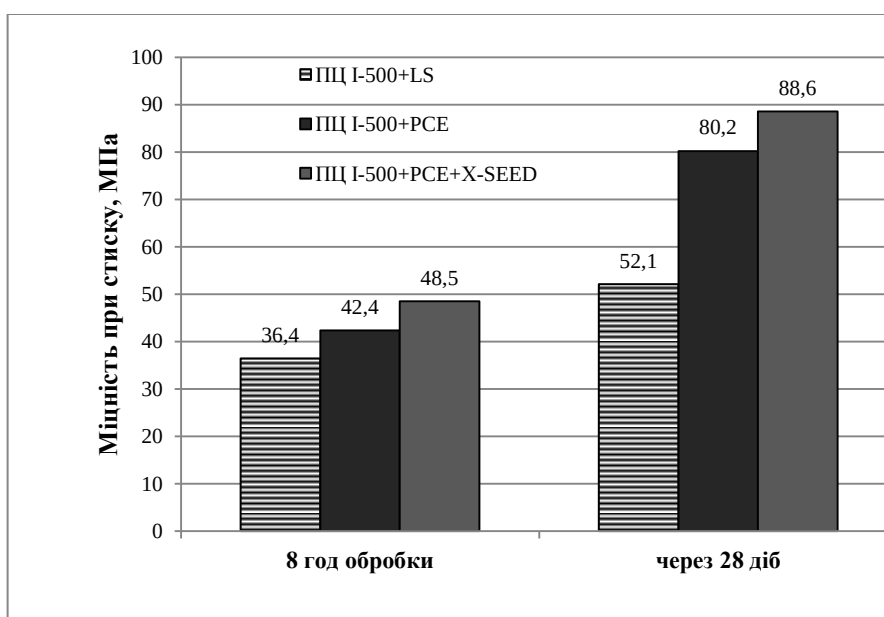


Рисунок 4.6 – Міцність бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій після теплової обробки

З метою зниження собівартості високоміцних бетонів запроектовано композити 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 з мінеральними добавками ПЦ II/A-B-500 та ПЦ II/A-П-500, для порівняння використано бездобавочний портландцемент ПЦ I-500P-H (таблиця 4.5). При використанні ПЦ II/A-B-500 водопотреба суміші знижується на 4,5%. Використання портландцементу з добавкою цеоліту спричиняє деяке зростання водопотреби бетонної суміші. Застосування портландцементів з мінеральними добавками у складі надшвидкотверднучих портландцементних композицій забезпечує одержання

високої ранньої міцності бетонів (через 1 добу – 37-39 МПа), що відповідає вимогам бетонів з інтенсивним темпом набору ранньої міцності $f_{cm16 \text{ год}}/f_{cm28}=0,33-0,35$ та $f_{cm24 \text{ год}}/f_{cm28}=0,44-0,50$ з досягненням проектної міцності 84,8 МПа (С50/60), що відповідає вимогам щодо швидкотверднучих високоміцних бетонів за рахунок оптимального гранулометричного складу в'язучого. Через 24 год тверднення в нормальних умовах бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій забезпечують досягнення передаточної міцності бетону для класу С30/35, що створює можливість заміни чистоклінкерного портландцементу ПЦ І-500Р-Н на цементі з мінеральними добавками ІІ типу.

Таблиця 4.5 – Міцність високоміцних бетонів на основі портландцементів різних типів

В'язуче	В/Ц	Міцність при стиску, МПа, у віці			
		16 год	24 год	7 діб	28 діб
ПЦ І-500Р-Н	0,33	30,2	37,8	71,7	89,1
ПЦ ІІ-А-В-500	0,32	29,5	39,0	68,6	84,8
ПЦ ІІ-А-ІІ-500	0,34	28,4	37,1	58,7	84,8

Дослідженнями мікроструктури контактної зони «дрібний заповнювач-модифікована цементна матриця» (рисунок 4.7, а) та модифікованої цементної матриці (рисунок 4.7, б) високоміцного бетону на основі ПЦ ІІ/А-В-500 через 1 добу тверднення показано формування однорідної дрібнокристалічної структури, що не обмежує набір міцності в подальші терміни тверднення. Даними мікрозондового аналізу показано, що основними гідратними фазами цементного каменю у початковий період є гідросилікати кальцію С-S-H, які ущільнюють контактну зону та омонолічують структуру високоміцного бетону, що забезпечує зростання його міцності.

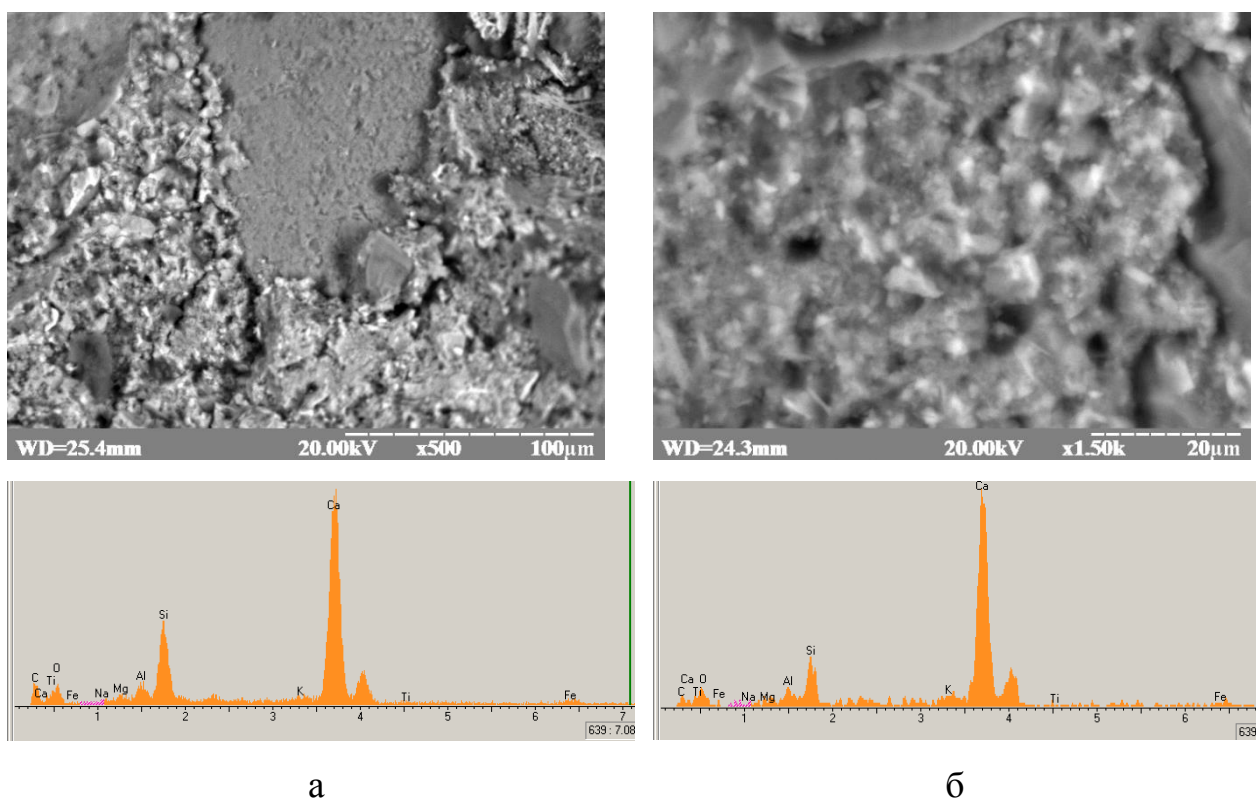


Рисунок 4.7 – Мікроструктура і мікрозондовий аналіз контактної зони (а) та модифікованої цементуючої матриці (б) високоміцного бетону

Отже, запроєктовано ефективні склади високоміцних бетонів класів за міцністю С40/50, С50/60 на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій для низькотемпературних режимів теплової обробки, які забезпечують досягнення необхідної передавальної та проектної міцності.

4.2. Дослідження будівельно-технічних властивостей бетонів, одержаних за низькотемпературних режимів теплової обробки

Міцність затверділого бетону визначається його структурою. Характер пористості також впливає на основні експлуатаційні властивості матеріалу –

водопроникність, стійкість до зовнішніх впливів та довговічність. У зв'язку з цим, вивчено інтегральні та диференціальні параметри пористої структури бетонів згідно з ДСТУ Б В 2.7-170:2008 та методикою, проведеною за кінетикою поглинання матеріалом води з допомогою дискретного зважування.

Як показали результати випробувань (таблиця 4.6), середня густина бетонів коливається в межах 2365–2462 кг/м³, що відповідає вимогам стандартів для важкого бетону. Середня густина бетону на основі модифікованої надшвидкотверднучої портландцементної композиції в сухому стані є більшою, порівняно з середньою густиною бетону на основі ПЦ І-500+ЛСТ. Це свідчить про формування щільної структури бетону завдяки оптимально підбраному складу бетону на макро- та мезорівні, а також збільшенню кількості гідратних новоутворень на мікро- та нанорівні.

Бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементів характеризуються незначним масовим водопоглинанням 1,1%. Відкрита капілярна пористість, що характеризує об'ємне водопоглинання, становить 2,71 %. При цьому загальна пористість бетону становить 6,5 %. Показник середнього розміру капілярів для бетонів на основі ПЦ І-500Р-Н характеризується середнім значенням 9,3 та 4,0 відповідно з сумішшю з добавками пластифікуючої дії ЛСТ та РСЕ. Низьке значення показника однорідності розмірів капілярів $\alpha=0,35-0,42$ при максимальному значенні 1 спричинене присутністю в бетоні капілярних пор з розмірами, що перевищують середній, і меншими. При використанні надшвидкотверднучих портландцементних композицій показник середнього розміру капілярних пор знижується до 1,3 при показнику однорідності 0,5. Пористість розробленого модифікованого високоміцного бетону знижується на 16-32% порівняно з бетоном на основі портландцементу ПЦ І-500Р-Н, модифікованого добавкою ЛСТ. Слід відзначити, що використання надшвидкотверднучої композиції сприяє формуванню щільної структури цементуючої матриці, за рахунок утворення продуктів гідратації в міжзерновому просторі з перериванням

капілярів та зменшенням відкритої пористості до 2,71%, що зумовлює підвищення довговічності композиту. У той же час, відкрита пористість бетону на основі ПЦ І-500+ЛСТ становить 6,46%.

Таблиця 4.6 – Структурно-фізичні показники високоміцних бетонів

Характеристика		Вид в'язучого		
		ПЦ І- 500+ ЛСТ	ПЦ І- 500+ PCE	ПЦ І- 500+ PCE+ X- SEED
Середня густина бетону, кг/м ³ , в стані:				
сухому		2365	2420	2462
водонасиченому		2439	2481	2489
Водопогли- нання	масове, Wm, мас. %	2,73	2,52	1,10
	об'ємне, Wv, об. %	6,46	6,10	2,71
Пористість, %				
загальна, П _п		7,74	7,63	6,50
відкрита, П _о		6,46	6,10	2,71
закрита, П _з		1,28	1,53	3,79
Показник середнього розміру відкритих капілярних пор, λ ₁		9,3	4,0	1,3
Показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор, α		0,35	0,42	0,5

При зростанні міцності зростає крихкість та знижується тріщиностійкість бетонів. Закономірності поширення тріщин в розроблених високоміцних бетонах під навантаженням вивчені методами механіки руйнувань за рівнем критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{с*} при нерівноважних випробуваннях до дефрагментації зразків через 28 діб тверднення в нормальних умовах (рисунк 4.8). При цьому встановлено, що дрібнозернисті бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних

композицій характеризуються підвищенням коефіцієнта інтенсивності в 1,9 рази ($K_{с*} = 1,36 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$) порівняно з бетоном на основі ПЦ І-500Р-Н, модифікованого добавкою ЛСТ ($K_{с*} = 0,71 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$).

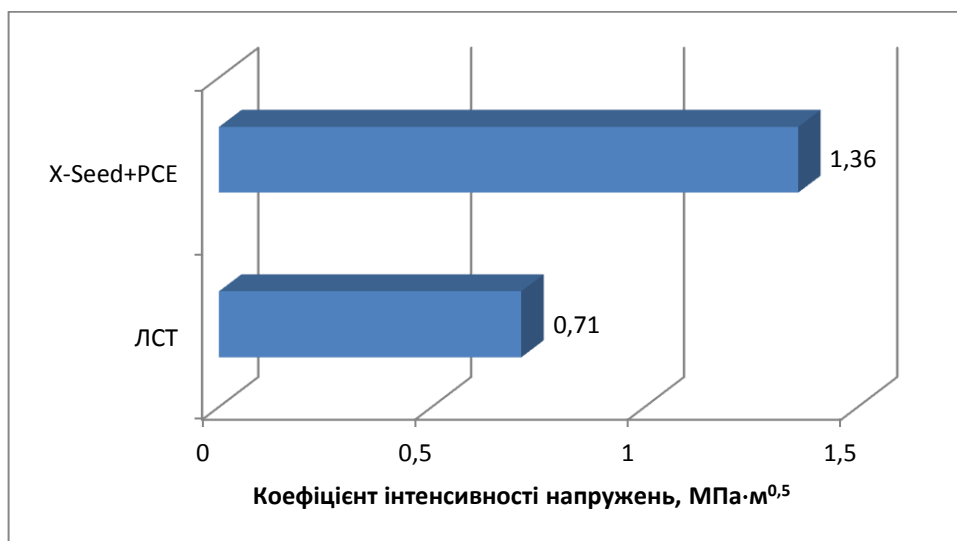


Рисунок 4.8 – Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій

Деформативні та фізико-механічні властивості визначали при випробуванні призм $100 \times 100 \times 400$ мм та кубів $100 \times 100 \times 100$ мм високоміцного бетону на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції та бетону, модифікованого добавкою ЛСТ, які піддавалися тепловій обробці за низькотемпературним режим та через 28 діб тверднення в нормальних умовах до рівня навантаження $\sim 0,6 P_p$ (P_p – руйнівне навантаження). Витрата портландцементу в бетонах становила 370 кг на 1 м^3 бетонної суміші. Визначення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона бетонів проведено при навантаженні 30% від руйнівного ($\sigma = 0,3 P_p / S$) (рисунок 4.8).

Результати дослідження деформативних властивостей високоміцного бетону на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції свідчать, що його призмova міцність становить 76,5 МПа, тоді як бетону на основі ПЦ І-500+ЛСТ з рівнорухливої суміші – 56,1 МПа (таблиця 4.7).



Рисунок 4.9 – Визначення призмової міцності (а) та модуля пружності (б) модифікованого високоміцного бетону

Модуль пружності бетону на основі ПЦ I-500P-H+PCE+X-SEED зростає на 12,3% порівняно з бетоном на основі ПЦ I-500P-H+ЛСТ. Дослідженнями деформативних властивостей наномодифікованих швидкотверднучих бетонів на основі ПЦ I-500 P-H+ X-SEED + PCE встановлено, що їх модуль пружності складає 52,6 ГПа, а коефіцієнт Пуассона – 0,19.

Важливою характеристикою бетону є здатність витримувати дію агресивного середовища [38]. Згідно з [77] агресивна дія навколишнього середовища поділяється на класи. У роботі вивчали стійкість бетону до корозії, спричиненої впливом хімічних речовин – сульфатна корозія (клас ХА). Даний вид корозії об'єднує всі процеси взаємодії бетону, які зв'язані із утворенням та накопиченням в бетоні малорозчинних солей, що характеризуються збільшенням об'єму при переході у тверду фазу, утворенням кристалів, що у свою чергу супроводжується внутрішніми напруженнями та деструктивними явищами у бетоні. Такі явища виникають внаслідок кристалізації не тільки продуктів реакції, але і солей в порах бетону, що надходять ззовні у вигляді розчинів [43].

Таблиця 4.7 – Показники деформативності бетонів

В'язуче	Призмova міцність, МПа	Кубикова міцність, МПа	Модуль пружності, ГПа	Коефіцієнт Пуассона,
ПЦ І-500Р-Н+ЛСТ	56,1	71,4	46,8	0,18
ПЦ І-500Р-Н+PCE+X- SEED	76,5	83,0	52,6	0,19

Оцінювання корозійної стійкості бетонів проводили за зміною міцності зразків дрібнозернистого високоміцного бетону номінального складу Ц:П = 1:2, при зберіганні їх в агресивному середовищі солей згідно з ДСТУ Б ГОСТ 27677:2011. Цей метод дозволяє візуально спостерігати за процесом руйнування зразків при корозії, що у поєднанні з випробуваннями на міцність дає можливість повніше характеризувати поведінку зразків в агресивних середовищах [43]. Розчин Na_2SO_4 (концентрація $\text{SO}_4^{2-} = 10$ г/л) використовували як агресивне середовище. Для відповідності розробленого високоміцного бетону стандарту коефіцієнт стійкості $\text{КС}_{63\Gamma}$ повинен бути більшим ніж 0,9.

Результати досліджень стійкості дрібнозернистого високоміцного бетону до дії сульфатної корозії через 6 місяців представлені в таблиці 4.8. Міцність на стиск зразків дрібнозернистого високоміцного бетону на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції, що зберігалися в сульфатному середовищі 6 місяців, продовжує зростати до показника 81,0 МПа із забезпеченням коефіцієнта корозійної стійкості $\text{КС}_{6\text{CT}} = 1,08$, тоді як коефіцієнт корозійної стійкості, розрахований за значенням міцності на згин, становить $\text{КС}_{63\Gamma} = 1,1$. Дрібнозернисті бетони, модифіковані монодобавками пластифікуючої групи, характеризуються меншим зростанням міцності на стиск та згин на 3-10% і задовольняють вимоги щодо корозійної стійкості.

Таблиця 4.8 – Корозійна стійкість дрібнозернистих бетонів

Цемент	В/Ц	РК, мм	Границя міцності, МПа				КС _{бзг}	КС _{бст}
			Н ₂ О		Na ₂ SO ₄			
			згин	стиск	згин	стиск		
ПЦ І-500	0,30	110	9,7	62,8	10,0	64,7	1,03	1,03
ПЦ І-500+PCE	0,23	112	14,2	68,8	15,6	71,6	1,10	1,04
ПЦ І-500 + PCE+X-SEED	0,23	120	18,2	75,0	20,0	81,0	1,10	1,08

Узагальнені результати порівняльних випробувань високоміцного бетону на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції та бетону, модифікованого пластифікуючою добавкою ЛСТ, наведені в таблиці 4.9. Як видно з результатів випробувань, використанням надшвидкотверднучої портландцементної композиції при однаковій витраті в'язучого досягається зростання марки бетону з С35/45 до С50/60, що дозволяє класифікувати їх як високоміцні. Використання розроблених композицій забезпечує одержання бетонів з швидким наростанням міцності в нормальних умовах ($f_{cm1}/f_{cm28}=0,51$ та $f_{cm2}/f_{cm28}=0,75$), а також забезпечення необхідної передавальної міцності в умовах низькотемпературної теплової обробки.

Отже, розроблені високоміцні бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій характеризуються високою ранньою, передавальною та проектною міцністю, покращеними деформативними властивостями, підвищеною щільністю, водонепрорникністю та корозійною стійкістю, а в кінцевому результаті довговічністю, що дозволяє застосовувати їх для мало- та безпропарювальних технологій збірного залізобетону.

Таблиця 4.9 – Будівельно-технічні властивості високоміцних бетонів

Показник	Одиниці вимірювання	Значення показника для високоміцного бетону	
		модифікованого ЛСТ	на основі над швидко-тверднучої 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	%	8,4	6,8
Міцність на стиск, f_{cm} , у віці, 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, $f_{\text{cm1}}/f_{\text{cm28}}$		0,50	0,51
$f_{\text{cm2}}/f_{\text{cm28}}$		0,70	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, $K_{\text{с}}^*$	МПа·м ^{0,5}	0,71	1,36
Водопоглинання за масою, $W_{\text{м}}$	%	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		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

4.3. Розроблення модифікованих високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, що працюють в умовах підвищених температур

Проектування складу високорухливих дрібнозернистих бетонів, що піддаються дії підвищених температур, та для ремонтних робіт здійснювали шляхом оптимізації гранулометричного складу компонентів, що визначають макро- та мезоструктурний рівень бетону. Для оптимізації складу заповнювачів використали метод ітерації, який дає змогу шляхом регулювання співвідношення між кількістю піску Жовківського родовища ($M_k=2,0$) та піску з відсіву подрібнення фракції 2-5 мм отримати максимально щільну упаковку з найменшим об'ємом міжзернових пустот. З цією метою послідовно збільшували вміст піску Жовківського родовища у суміші заповнювачів з кроком 10% та визначали насипну густину у вільнонасипаному стані. На основі аналізу графічних залежностей насипної густини встановлено оптимальне співвідношення заповнювачів у суміші, яке становить 1:1 (50 мас.% Жовківського піску та 50 мас.% піску з відсіву подрібнення) за критерієм мінімальної пустотності (рисунок 4.10).

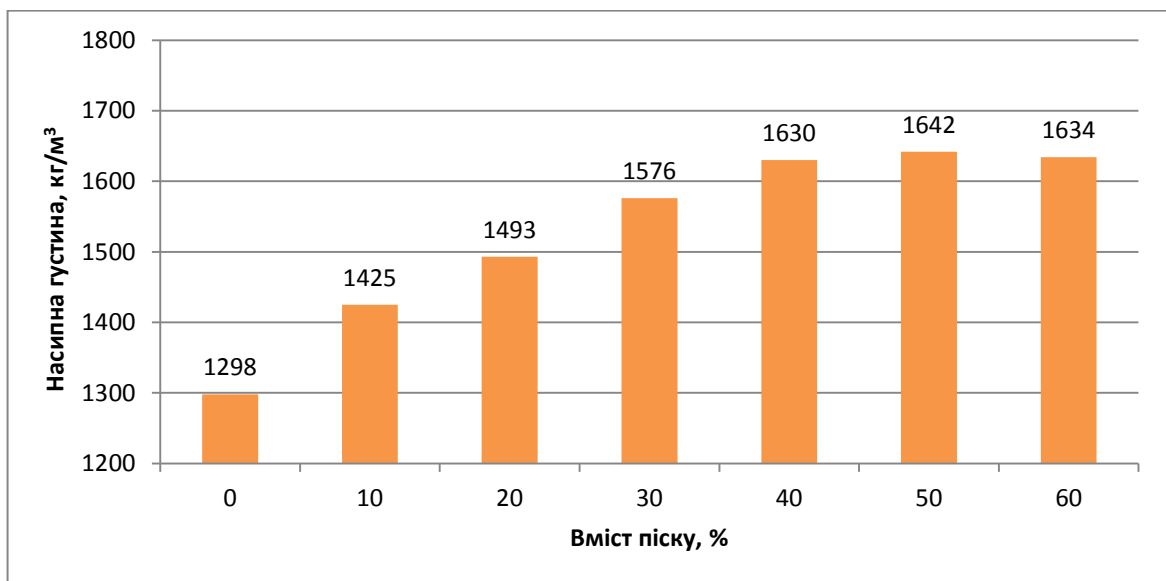
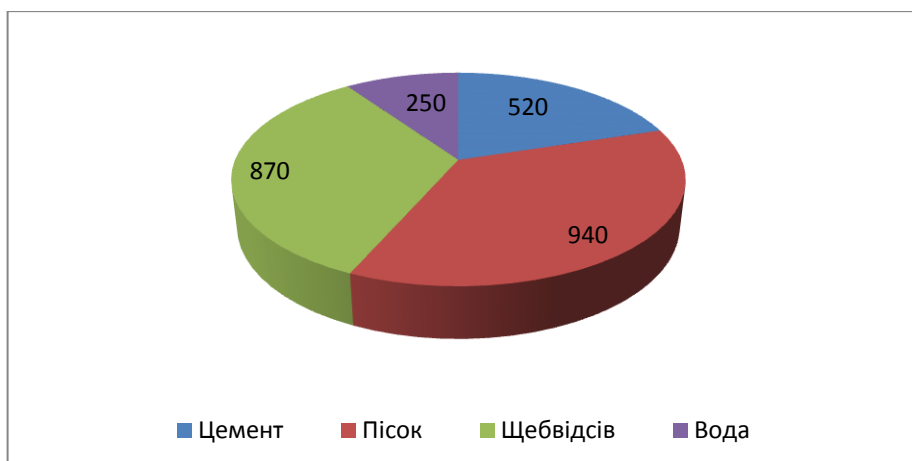
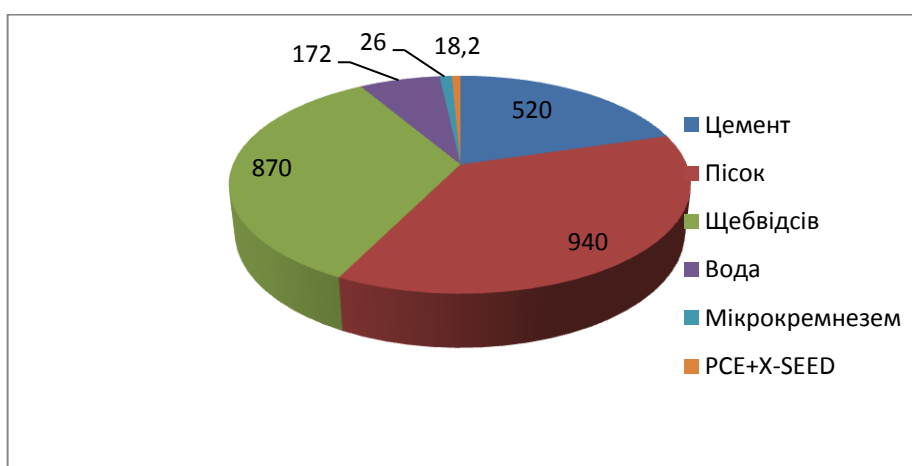


Рисунок 4.10 – Насипна густина суміші дрібних заповнювачів

З використанням оптимізованого заповнювача проведено проектування складу бетону на основі портландцементу ПЦ І-500Р-Н та надшвидкотверднучої портландцементної композиції (рисунок 4.11).



А



б

Рисунок 4.11 – Склад дрібнозернистих бетонів на основі портландцементу ПЦ І-500Р (а) та надшвидкотверднучої портландцементної композиції (б)

Верифікація складу розроблених бетонів показала, що за показниками консистенції, визначеної за розпливом конуса ($PK=160-180$ мм), бетонні суміші відносять до пластифікованих. При цьому висока рухливість дрібнозернистої суміші на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій досягається при водоредуруючому ефекті $\Delta B/C = 32\%$, що сприяє

підвищенню щільності системи та швидкому формуванню структури композиту.

Рання міцність дрібнозернистого бетону на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій через 1 добу гідратації в нормальних умовах становить 35,3 МПа, а через 2 доби – 60,2 МПа, що відповідно в 1,9 і 2,3 рази перевищує міцність бетону без добавок (рисунок 4.12). Значне зростання ранньої міцності модифікованих бетонів обумовлене забезпеченням щільної упаковки системи частинками мінеральних добавок, прискореною взаємодією гідроксиду кальцію з енергетично активними частинками дрібнодисперсних мінеральних добавок з утворенням продуктів гідратації в неклінкерній частині в'язучого. Міцність дрібнозернистого бетону на основі наномодифікованих надшвидкотверднучих цементуючих систем через 28 діб підвищується до 102,4 МПа, що відповідає класу міцності С 70/85. Питома міцність дрібнозернистого бетону f_{cm2}/f_{cm28} становить 0,59, що дозволяє класифікувати його як швидкотверднучий і високоміцний [37, 94, 154].

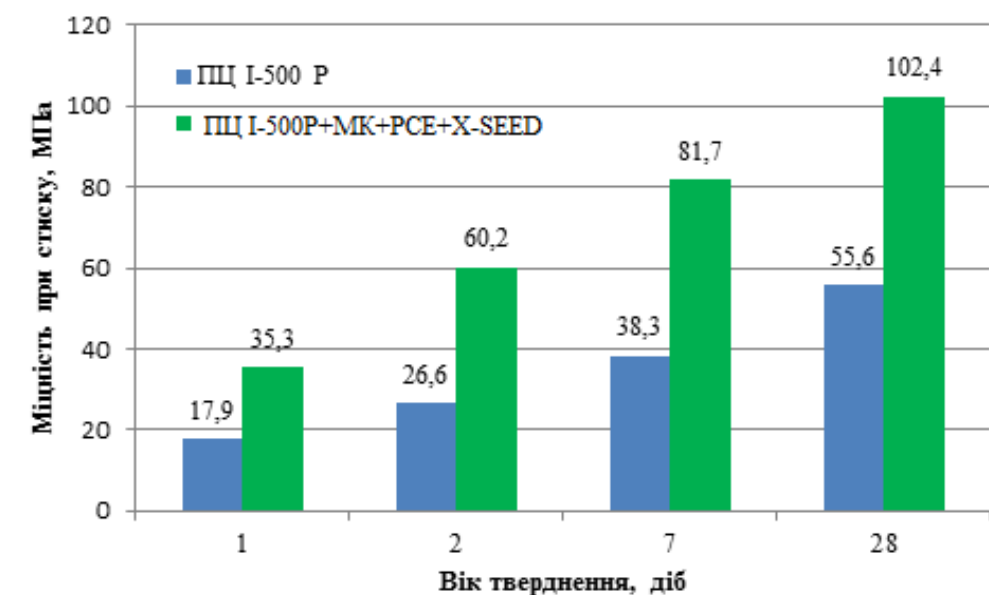


Рисунок 4.12 – Міцність бетонів на основі надшвидкотверднучих композицій в нормальних умовах

Згідно з ДСТУ Б В 2.7-249-2011 для будівельних композитів, які піддаються дії підвищених температур, визначали проектну міцність (для бетонів на основі портландцементів через 7 діб тверднення в нормальних умовах) та міцність в проміжному віці (через 1 та 2 доби). У зв'язку з тим, що основним призначенням жаростійкого бетону є його роботоздатність при дії високих температур, необхідно визначити, як впливає підвищення температури на міцність бетону. Зразки бетону піддавали температурним впливам через 1, 2 і 7 діб тверднення в нормальних умовах [75, 135, 136].

При висушуванні бетону до постійної маси спостерігається підвищення його міцності при стиску. Так, міцність бетону базового складу, який піддали впливу температури через 1 добу тверднення в нормальних умовах, після сушіння ($t=105\pm5$ °C) зростає на 60,9% і на 77,6% при витримуванні за температури 200°C (рисунок 4.13). Приріст міцності модифікованого дрібнозернистого бетону є ще вагомим – на 112% і 148,6% відповідно. Нагрівання бетону до 200°C забезпечує зростання міцності бетону на 10-15%, порівняно з тим, який висушували при 105 ± 5 °C. Це обумовлюється обезводненням гідросилікатного гелю та ущільненням структури бетону.

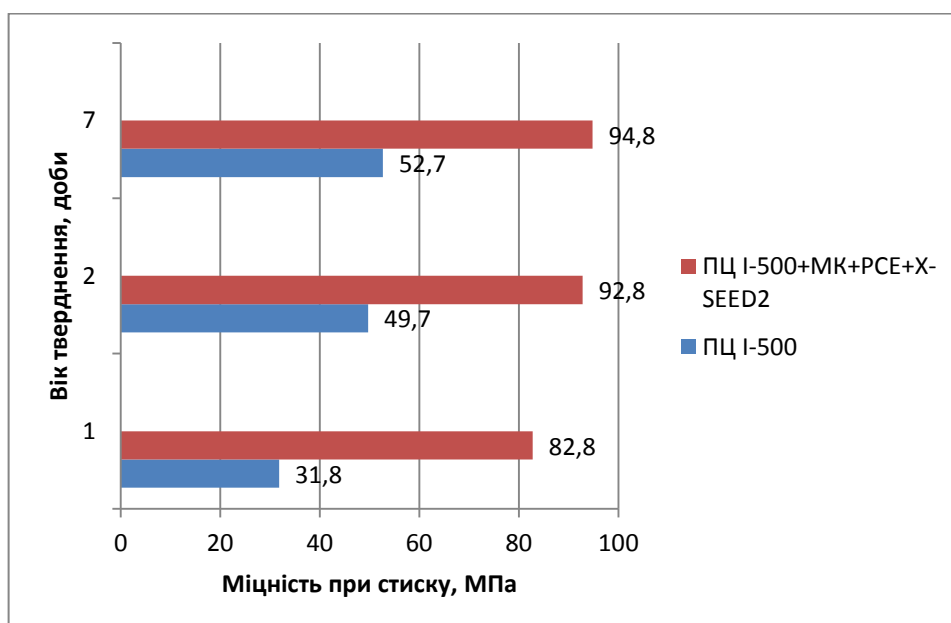


Рисунок 4.13 – Міцність дрібнозернистого бетону після сушіння та витримування при $t = 200$ °C

Міцність бетонів, які після 7 діб тверднення в нормальних умовах піддавали температурним впливам, зростає меншою мірою. Зростання міцності дрібнозернистого бетону на основі ПЦ I-500P-H становить 21,1% і 29,8% від міцності бетону у віці 7 діб у нормальних умовах, а модифікованого бетону – 11,7% і 13,6% при температурах витримки 105 ± 5 °C і 200 °C відповідно. Такий приріст міцності пояснюється тим, що при дії температури 105 ± 5 °C проходить «самозапарювання» бетону. При цьому мінерали портландцементу гідратуються, що сприяє підвищенню міцності бетону.

Результати випробувань бетонів, що піддавали дії температури 400 °C, показали, що зразки модифікованого бетону, які тверднули 1 добу, характеризуються приростом міцності на 7,7 % порівняно із зразками, що піддавали дії 200 °C (рисунок 4.14). При цьому міцність бетону на основі надшвидкотверднучої композиції в 2,2 рази більша порівняно з бетоном на основі ПЦ I-500P-H. Після нагрівання до 400 °C з наступним охолодженням до кімнатної температури, спостерігається значне підвищення міцності для зразків модифікованого дрібнозернистого бетону на основі ПЦ I-500. Так, бетон на основі портландцементної композиції ПЦ I-500P-H+МК+PCE+X-SEED досягає міцності 89,8-109,4 МПа, що відповідає класу B85 згідно з ДСТУ Б В.2.7-249:2011.

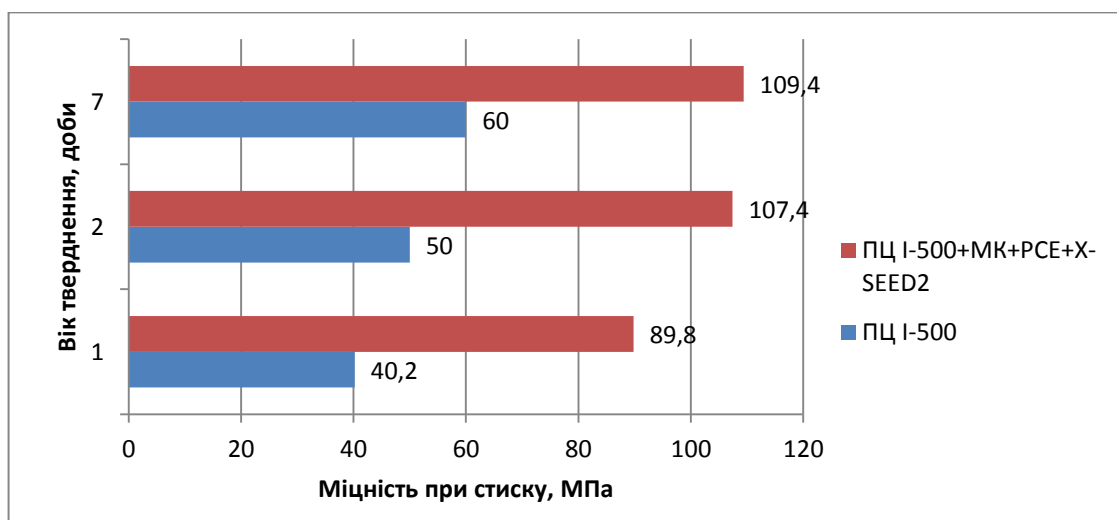
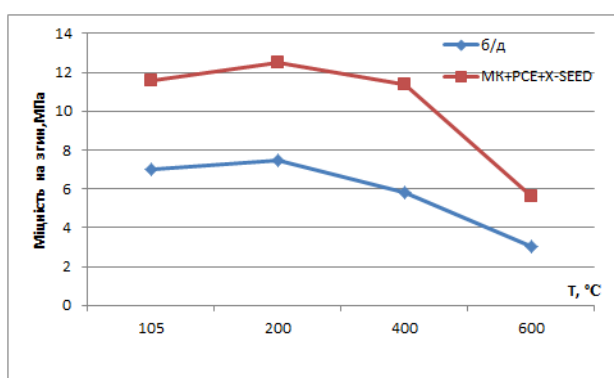


Рисунок 4.14 – Міцність дрібнозернистого бетону після нагрівання і витримки при 400 °C

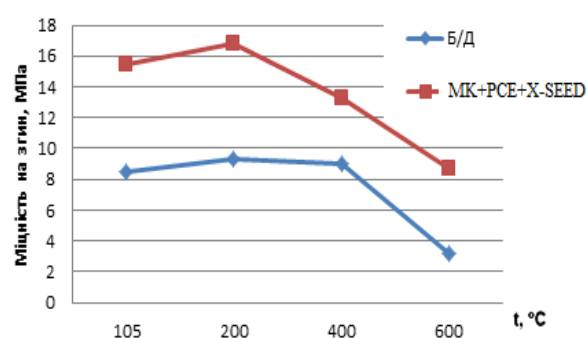
Після нагрівання до 600 °С спостерігається зниження міцності на 6,7%, для модифікованих бетонів, які тверднули 2 доби, тоді як бездобавочний бетон втрачає 35,6% міцності. Після витримування при температурі 600 °С міцність бетону на основі ПЦ І-500Р-Н через 7 діб тверднення в нормальних умовах знижується на 25% порівняно з міцністю при температурі 400 °С, тоді як для модифікованих бетонів спостерігається зниження міцності на 19,4%.

Міцність на згин є чутливішою характеристикою порівняно з міцністю на стиск. Результати випробувань бетонів, які тверднули 1 добу в нормальних умовах, після впливу високих температур, показали, що міцність на згин знижується після 400 °С, а різкий спад міцності відбувається після 600°С, для модифікованого бетону міцність на згин становить 5,6 МПа, тоді як для бездобавочного бетону – 3,0 МПа (рисунк 4.15, а).

Результати випробувань бетонів, які через 7 діб тверднення в нормальних умовах, піддавали дії підвищених температур, показали, що міцність на згин спадає після нагрівання до 400 °С. Так, бетон на основі модифікованих композицій характеризується міцністю на згин 8,6 МПа після витримування при температурі 400 °С, тоді як для бездобавочного бетону – 3,4 МПа (рисунк 4.15, б).



а



Б

Рисунок 4.15 – Міцність на згин бетонів, що тверднули 1 (а) та 7 (б) діб в нормальних умовах, після дії підвищених температур

При нагріванні дрібнозернистого бетону проходять деформації зсідання, які викликані ущільненням гелеподібних продуктів гідратації портландцементу, а також відбувається процес випаровування води, який спричиняє втрату маси бетону, тому в роботі проводили визначення термічних деформацій дрібнозернистого бетону на основі ПЦ І-500 та бетону, модифікованого органо-мінеральними добавками (рисунок 4.16). Зразки піддавали температурним впливам після 1 доби тверднення в нормальних умовах.

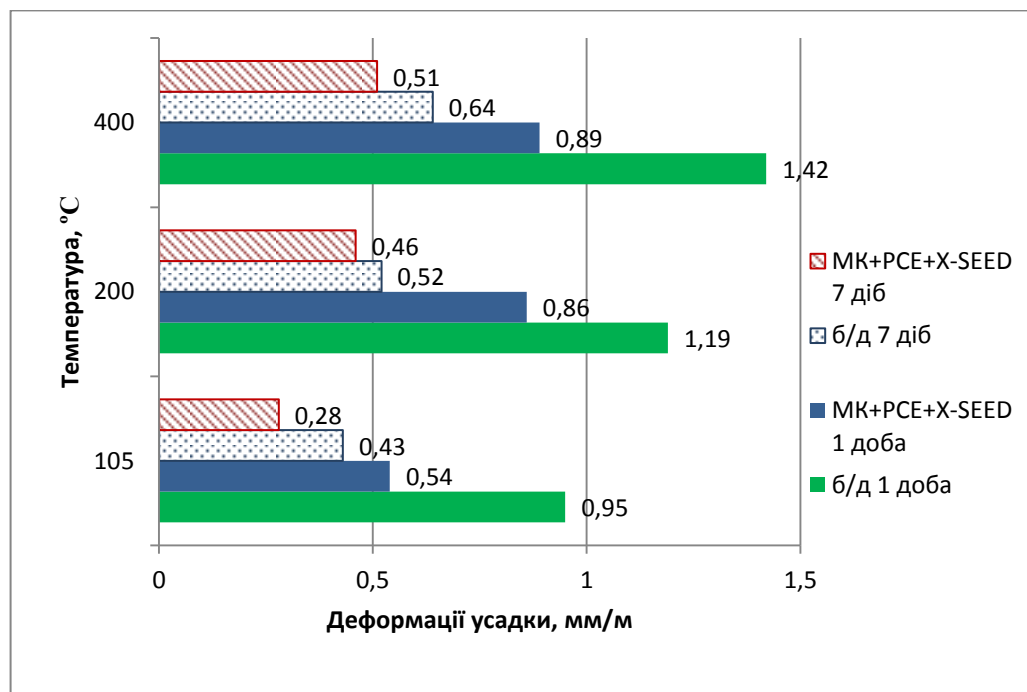


Рисунок 4.16 - Деформації бетонів, що піддавалися впливу підвищених температур, через 1 та 7 дiб тверднення в нормальних умовах

Температурні деформації дрібнозернистого бетону на основі ПЦ І-500Р-Н через 1 добу тверднення після сушіння ($105 \pm 5^{\circ}\text{C}$) складають 0,95 мм/м, а після витримування при температурі 200°C – 1,19 мм/м, які відповідно на 75,9% і 38,4% більші, ніж деформації бетону на основі наномодифікованих цементуючих систем. При 400°C деформації усадки бетону контрольного складу збільшуються до 1,42 мм/м, а модифікованого – до 0,89 мм/м. Використання у складі бетону наномодифікованих надшвидкотверднучих цементуючих систем дозволяє підвищити щільність

бетону, інтенсифікувати процеси гідратації портландцементу, внаслідок чого деформації наномодифікованого бетону зменшуються через 7 діб тверднення. Максимальними деформаціями усадки після нагрівання до 400 °С характеризується бетон без добавок (0,64 мм/м). Для наномодифікованого бетону деформації зсідання знижуються на 20 % порівняно з бездобавочним.

Середня густина дрібнозернистого бетону на основі ПЦ І-500Р-Н становить 2420 кг/м³, а модифікованого – 2495 кг/м³, що відповідає вимогам до важких бетонів (таблиця 4.10). Водопоглинання бетону на основі модифікованих портландцементних композицій після витримання при $t=105\pm5^{\circ}\text{C}$ і $t=200^{\circ}\text{C}$ становить 1,59% та 3,58% відповідно. Дрібнозернистий бетон контрольного складу характеризується вищими значеннями водопоглинання, а саме: при $t=105\pm5^{\circ}\text{C}$ – 2,94%, при $t=200^{\circ}\text{C}$ – 5,12%, що в 1,85 і 1,43 рази більше, ніж водопоглинання модифікованого бетону. Водопоглинання бездобавочного бетону, що тверднув 2 доби після витримки при 400 °С більше від модифікованого бетону в 1,27 рази. Найбільшими показниками водопоглинання характеризується бетон контрольного складу на основі ПЦ І-500Р-Н, що відповідає значенням 9,86–9,58%.

Таблиця 4.10 – Водопоглинання дрібнозернистих бетонів, що піддавались дії високих температур

В'язуче	В/Ц	Середня густина, кг/м ³	Водопоглинання за масою, %, через 2 доби після витримки при Т, °С			
			105	200	400	600
ПЦ І-500Р-Н	0,48	2420	2,94	5,12	7,56	9,79
Модифікована композиція	0,33	2495	1,59	3,58	5,23	7,35

Формування щільної структури модифікованих високоміцних бетонів у ранні терміни тверднення дозволяють протистояти зовнішній механічній

дії. Випробуваннями стираності розроблених бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій показано, що вони характеризуються підвищеною стійкістю до абразивної дії, на що вказують показники втрати маси $0,05-0,08 \text{ г/см}^2$. Після витримування при підвищеній температурі стиранність дещо знижується і втрати маси становлять $0,12-0,23 \text{ г/см}^2$ залежно від термінів тверднення.

Отже, бетони на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій характеризуються підвищеною рухливістю, швидким темпом набору міцності і високою проектною міцністю; під дією підвищених температур до 400°C вони характеризуються додатковим зростанням міцності на 20–30% внаслідок інтенсифікації процесів гідратації та процесів пуцоланової взаємодії гідроксиду кальцію з дрібнодисперсними мінеральними компонентами.

Висновки до розділу

1. При проектуванні складу бетону методом математичного планування встановлена оптимальна кількість цементу для досягнення регламентованої передавальної та проектної міцності. Здійснено моделювання складів модифікованих бетонів для збірних залізобетонних виробів, змінними факторами при цьому вибрано витрату портландцементу ПЦ І-500Р-Н ($X_1 = 350, 400 \text{ та } 450 \text{ кг/м}^3$ бетонної суміші) та кількість суперпластифікатора полікарбоксилатного типу ($X_2 = 0; 0,5; 1,0 \text{ мас.}\%$). Значення коефіцієнта ефективності добавки РСЕ в умовах низькотемпературної теплової обробки становить 1,22-1,36; що свідчить про її високу ефективність.

2. Узагальнені результати порівняльних випробувань високоміцного бетону на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції та бетону, модифікованого пластифікуючою добавкою ЛСТ показали, що за

використання надшвидкотверднучої портландцементної композиції при однаковій витраті в'язучого досягається зростання марки бетону з С45/55 до С50/60, що дозволяє класифікувати їх як високоміцні. Використання розроблених композицій забезпечує одержання бетонів з швидким наростанням міцності в нормальних умовах ($f_{cm1}/f_{cm28}=0,51$ та $f_{cm2}/f_{cm28}=0,75$), що забезпечує одержання необхідної передавальної міцності.

3. Розроблені бетони на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції характеризуються середньою густиною 2420-2430 кг/м³, водопоглинанням за масою 1,1 мас.%, підвищеними значеннями водонепроникності (W20), коефіцієнта інтенсивності напружень ($K_c^*=1,36 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$) та корозійної стійкості (КС6=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.

4. Запроектовано ефективні склади високоміцних бетонів з використанням надшвидкотверднучих портландцементних композицій на основі портландцементів II типу. Розроблені бетони характеризуються інтенсивним темпом набору ранньої міцності $f_{cm16\text{год}}/f_{cm28}=0,33-0,35$ та $f_{cm24\text{ год}}/f_{cm28}=0,44-0,50$ з досягненням проектної міцності 84,8 МПа (С50/60), що відповідає вимогам щодо швидкотверднучих високоміцних бетонів. Дослідженнями мікроструктури модифікованої цементної матриці високоміцного бетону показано формування однорідної дрібнокристалічної структури за рахунок утворення у початковий період підвищеної кількості гідросилікатів кальцію С-S-H.

5. Показано, що бетони на основі модифікованих портландцементних композицій ПЦ І-500Р-Н+МК+РСЕ+Х-SEED характеризуються підвищеною проектною міцністю та міцністю в проміжні терміни тверднення порівняно з бездобавочним бетоном. Рання міцність модифікованого бетону через 1 добу

становить 33,3 МПа, а через 2 доби - 58,4 МПа, що відповідно в 1,9 і 2,3 рази вища міцності порівняно з бетоном без добавок. Міцність дрібнозернистого бетону на основі надшвидкотверднучих композицій через 28 діб зростає до 106,8 МПа. Параметр R_{c2}/R_{c28} для наномодифікованих бетонів становить 66,9%, що дозволяє віднести запроектовані модифіковані бетони до швидкотверднучих та високоміцних.

6. За результатами випробувань встановлено, що дрібнозернистий бетон на основі портландцементу ПЦ I-500Р-Н, модифікованого органо-мінеральними добавками, характеризується проектною міцністю після нагрівання до 200 °С, що відповідає класу В 70, а після нагрівання до 400 °С одержуються бетони класу В85. При випробуванні у проміжному віці (через 2 доби тверднення в нормальних умовах) модифіковані бетони характеризуються міцністю для класу В 60, у той час як бездобавочний бетон характеризується класом за міцністю В 25 після витримування 200 °С. Бетони на основі ПЦ I-500, модифіковані органо-мінеральними добавками, характеризуються меншими деформаціями зсідання та пористістю, підвищеною міцністю та абразивною стійкістю після дії підвищених температур.

РОЗДІЛ 5

ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ МОДИФІКОВАНИХ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ НАДШВИДКОТВЕРДНУЧИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ

5.1. Промислова апробація розроблених високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій

Найпоширенішими збірними залізобетонними виробами є багатопустотні плити перекриття. Виробництво плит включає технологічні процеси: приймання, складування, зберігання і транспортування матеріалів, напівфабрикатів та комплектувальних елементів; приготування та транспортування бетонних сумішей; заготовку арматурних виробів (канатів); приготування мастила і підготування стендів; формування і опорядження; теплову обробку; розрізання плит за відповідними розмірами, доведення, приймання, складування, зберігання та транспортування готових виробів.

Однією з найважливіших технологічних операцій при виготовленні плит перекриття є теплова обробка виробів для прискорення набору передавальної міцності. Весь цикл теплової обробки на формувальному стенді плит перекриття ділять на чотири періоди: попереднє витримування, підігрів до максимальної температури, ізотермічне витримування і охолодження. Тривалість теплової обробки визначається необхідною міцністю виробів, їх товщиною, витратою цементу і його активністю, мінімальними приведеними витратами тощо.

Теплова обробка виконується шляхом підігріву бетону знизу від металевої формуючої смуги і накриття поверхні виробу водонепроникною плівкою. Практика показує, що надзвичайно важливим є герметичність

накриття бетону, що виключає випаровування вологи з-під плівки. В іншому випадку прогрівання бетону призводить до його сушіння і зневоднення поверхневого шару, в результаті чого через 14-16 год теплової обробки спостерігається зниження міцності в периферійних шарах виробів і прослизання арматури в момент передачі напруги на бетон. Для того, щоб ліквідувати цей недолік на ряді підприємств йдуть на перевитрату цементу, завищення проектної міцності бетону і зниження температури ізотермічного витримування та спричиняє зростання енергоємності та собівартості продукції.

Вирішення проблеми переходу на мало- та безпропарювальні технології значною мірою реалізується за рахунок впровадження надшвидкотверднучих портландцементних композицій, модифікованих комплексною добавкою на основі інноваційного прискорювача тверднення, що містить нанорозмірні гідросилікати кальцію, та суперпластифікатора – ефірів полікарбоксилатів (проект технічних умов ТУ У 23.5-02071010-174:2018 «Наномодифіковані надшвидкотверднучі портландцементи» – додаток А).

Промислову апробацію надшвидкотверднучих портландцементних композицій проведено у виробничих умовах ДП «Спецзалізобетон» для бетонів класу міцності С30/35 пустотілих плит перекриття ПБ 60-15.22.8 методом безопалубного формування на стендах технологічної лінії італійської фірми «Nordimpianti». При цьому вирішено завдання забезпечення необхідних передавальної та проектної міцностей бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій в умовах низькоізотермічного прогріву за скороченим режимом. Загальний об'єм виготовленого бетону склав 280 м³ (Додаток Б). Процес термообробки виробів в зимових умовах проходить за таким режимом 2 год попереднє витримування, підйом температури до 50°C, 8 год витримування, 2 год охолодження. Використання надшвидкотверднучих портландцементних композицій дозволило зменшити час витримування до 4 год, а максимальну

температуру витримування до 30-40 °С, а в літній період відмовитись від теплової обробки.

Результати випробувань бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, що тверднули в нормальних умовах, а також при скороченому режимі теплової обробки (1 год попередньої витримки, 2 год нагрівання та 4 год витримки при температурі 30-40 °С) на лінії виготовлення плит перекриття, свідчать, що через 24 год тверднення в нормальних умовах бетон досягає проектної міцності для класу за міцністю С30/35, а при скороченому режимі низькотемпературної обробки міцність перевищує проектну і досягає міцності для класу С35/40 (таблиця 5.1). Проведеними випробуваннями встановлено, що використання надшвидкотверднучої портландцементної композиції дає змогу одержувати бетонні суміші марки за жорсткістю Ж2, а також забезпечує одержання бетонів на їх основі класу С30/35.

Після досягнення бетоном передавальної міцності знімається покривний матеріал, і смуга обстежується працівниками заводської лабораторії, які проводять розмітку смуги на відрізки проектної довжини для подальшого розрізання (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 - Технологічна лінія “Nordimpianti” з виготовлення багатопустотних плит перекриття безперервним формуванням на ДП “Спецзалізобетон”

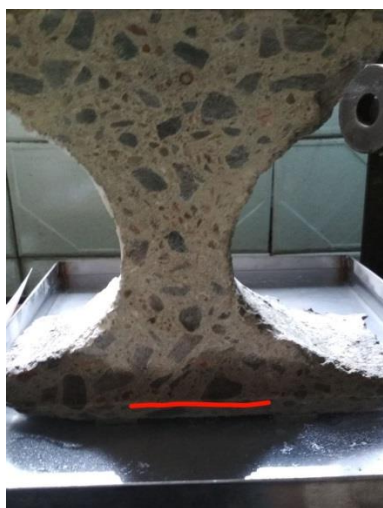
Таблиця 5.1 – Результати випробувань важкого бетону

Найменування показника	Значення показника
В/Ц	0,28
Жорсткість бетонної суміші, с / марка за жорсткістю	20/Ж2
Середня густина бетонної суміші, кг/м ³	2435
Міцність на стиск після ТВО, R _{ст} , МПа	54,7

Випробуваннями будівельно-технічних властивостей зразків бетону, вирізаних з плити перекриття промислового виготовлення, встановлено, що композит характеризується високими показниками середньої густини (2490 кг/м³), що зумовлене низькою пористістю бетону (таблиця 5.2). Так, відкрита та загальна пористість становить 4,7 та 5,0 % відповідно, а показник середнього розміру пор – 0,85. Показник індекса сорбції, визначений при капілярному підсмоктуванні (рисунок 5.2, а), відповідає вимогам довговічності. Глибина карбонізації бетону плити перекриття, визначена колориметричним методом, становить 3 мм (рисунок 5.2, б).

Таблиця 5.2 – Будівельно-технічні властивості бетону плити перекриття

Показник	Одиниці вимірювання	Значення показника для високоміцного бетону	
		нормативне	фактичне
Середня густина бетону, $\rho_{\text{сер}}$	кг/м ³	2200-2500	2490
Водопоглинання за масою, W_m	%	-	1,85
Відкрита пористість	%	-	4,7
Пористість бетону, П	%	-	5,0
Показник середнього розміру пор		0–10	0,85
Показник однорідності розмірів пор		0–0,9	0,35
Капілярне підсмоктування – індекс сорбції, SI	мм/год ^{0,5}	3,0	0,2
Глибина карбонізації	мм	-	3



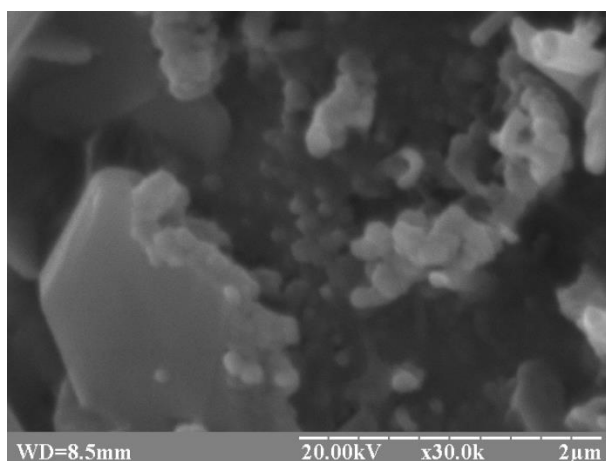
а



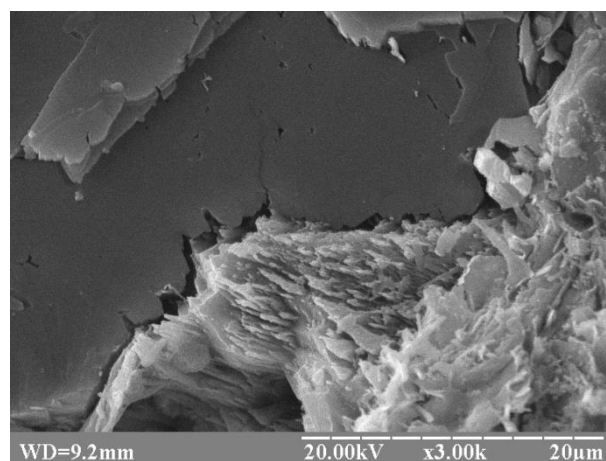
Б

Рисунок 5.2 – Визначення капілярного підсмоктування (а) та глибини карбонізації (б) бетону плити перекриття

Дослідженнями мікроструктури бетону показано, що омоноличування структури цементуючої матриці відбувається за рахунок гелевої гідросилікатної складової наномасштабного рівня, у порах кристалізуються кристали портландиту (рисунок 5.3, а). Транзитна зона заповнювач-цементний камінь ущільнюється гідросилікатною фазою (рисунок 5.3, б).



а



б

Рисунок 5.3 – Мікроструктура цементної матриці (а) та перехідної зони (б) високоміцного бетону плит перекриття

Високоміцний бетон на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій застосовано для ремонту проїжджої частини

мостів на автодорозі Львів–Пустомити–Меденичі км 17+200 до км 28+200, що здійснювався ТзОВ «Волинська мостобудівельна компанія» (додаток В). Використання надшвидкотверднучих портландцементних композицій, модифікованих на нанорівні, дало змогу отримати високотехнологічні бетонні суміші з підвищеною однорідністю, а бетони на їх основі з швидким наростанням міцності, які характеризуються показниками питомої міцності $f_{cm1}/f_{cm28}=0,54$; $f_{cm2}/f_{cm28}=0,78$ та регламентованими значеннями проектної міцності для класу за міцністю C50/60. Це дозволило скоротити терміни виконання ремонтних робіт та високу якість їх проведення.

5.2. Техніко-економічні показники модифікованих високоміцних бетонів

Виявлення, призначення та область застосування нової технології

Запропонована технологія виготовлення залізобетонних пустотних плит перекриття базується на використанні високоміцних бетонів класу C35/45, на основі портландцементу ПЦ I-500P-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент», модифікованого хімічною добавкою пластифікувальної дії на основі лігносульфонатів, що дозволяє зменшити водоцементне відношення та одержувати бетонні суміші на їх основі класу за міцністю на стиск C35/45. Проте така технологія характеризується певними недоліками, зокрема висока вартість ПЦ I-500-Н та використання хімічної добавки пластифікуюче-сповільнюючої дії – Centrament N3, що може не забезпечувати необхідної ранньої міцності і, як наслідок, затримку нарізання панелей та всього технологічного процесу.

Новий варіант передбачає застосування надшвидкотверднучої портландцементної композиції ПЦ I-500P-Н+PCE+X-SEED, модифікованої хімічною добавкою пластифікуюче-прискорюючої дії. Використання надшвидкотверднучої портландцементної композиції у складі бетону

дозволить забезпечити високі показники ранньої міцності, що є необхідним при виготовленні багатопустотних панелей перекриття за екструдерною технологією, оскільки дозволяє нарізати плити за період, передбачений технологією, та не затримувати технологічний процес. Крім того, композиція характеризується підвищеним внутрішнім тепловиділенням та прискореними темпами набору міцності, що дозволяє скоротити тривалість теплової обробки і знизити температуру ізотермічного витримування, або відмовитись від неї, зокрема у літній період. Крім того, використання портландцементної композиції дає змогу забезпечити необхідні будівельно-технічні властивості високоміцних бетонів для плит перекриття.

Вибір базового варіанту

В якості базового варіанту прийнята технологія виготовлення суміші високоміцного бетону з використанням портландцементу ПЦ І-500Р-Н та пластифікатора на лігносульфонатній основі. Режим теплової обробки плит перекриття з використанням такого бетону включає 1 год витримування, 2 год підігріву, 8 год ізотермічної витримки при температурі 50 °С.

Новий варіант

Новий варіант полягає у використанні надшвидкотверднучої портландцементної композиції, що забезпечило скорочення витрати портландцементу на 20 кг на 1 м³ бетонної суміші, зниження температури ізотермічного витримування до 40 °С та скорочення часу його тривалості до 4 год (варіант 1), або повністю відмовитись від теплової обробки (варіант 2).

Розрахунок економічного ефекту

Економічна ефективність від використання високоміцних бетонів, виготовлених на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції, в якій як модифікатори застосовані полікарбоксилатний суперпластифікатор та інноваційний прискорювач X-SEED, досягається за рахунок скорочення затрат на енергетичні ресурси, а також зменшення затрат на експлуатацію обладнання, що включає амортизацію систем контролю, мережі, котла, а також зменшення затрат на зарплату робітників.

Розрахунок теплового балансу проводили на один цикл теплової обробки. Вихідні дані для розрахунку: об'єм бетону в одному виробі ПБ 60.15.22.8 – $1,14 \text{ м}^3$, маса арматури 28,96 кг, довжина лінії – 120 м, річна продуктивність лінії 6 тис. м^3 .

Порівняно з базовим варіантом оцінку економічної ефективності використання високоміцного бетону, модифікованого хімічною добавкою пластифікуюче-прискорюючої дії – PCE+ X-SEED, проводили з врахуванням витрат на матеріали. На основі вартостей витрат основних компонентів проведено розрахунок статей витрат 1 м^3 бетону за новою та базовою технологіями (таблиця 5.3).

Отже, використання високоміцних бетонів на основі надшвидкотверднучої композиції на основі портландцементу ПЦ І-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент», модифікованих хімічними добавками пластифікуюче-прискорюючої дії забезпечує економічний ефект від впровадження розробки на ДП «Спецзалізобетон» 85 грн на 1 м^3 бетону. Економічний ефект від впровадження нової технології при випуску $280,0 \text{ м}^3$ бетону порівняно з бетоном базового варіанту складає 23,8 тис. грн в цінах на 30.10.2018 р.

Результати дисертаційної роботи щодо принципів побудови швидкотверднучих високоміцних бетонів з покращеними експлуатаційними характеристиками для ефективних технологій залізобетонних виробів використовуються у навчальному процесі при викладанні дисципліни “Інноваційні технології виготовлення сучасних будівельних матеріалів і виробів” для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізації «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів» та «Енерго- та ресурсоощадні технології у будівництві», що викладається для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (додаток Г).

Таблиця 5.3 – Техніко-економічні показники теплової обробки плит перекриття

Показник	Базовий варіант	Новий варіант	
		Варіант 1	Варіант 2
Тривалість обробки	8	4	-
Витрата в'язучого, кг/м ³	390	370	370
Вартість в'язучого, грн/м ³	1019,35	1073,2	1073,2
Теплота гідратації, кДж			
- період підігріву	43,4	43,4	-
- період ізотермічної витримки	266,8	133,4	-
Теплота на підігрів бетону, кДж	1662393,8	1129010,4	-
Теплота на підігрів арматури, кДж	9730,6	6950,4	-
Теплота на підігрів води в бетоні, кДж	21704,2	12779,5	-
Втрати в навколишнє середовище, кДж			
- період підігріву	327354,0	104800	-
- період ізотермічної витримки	2618832,4	419040	-
Невраховані втрати, кДж	454080,1	167227,0	-
Всього витрати на теплову обробку, кДж/ кДж/м³	5094095,7/ 223425,3	1839630,5/ 80685,5	-
Витрати палива на підготовку теплоносія з врахуванням ККД котла (70%), грн./м ³	100,15	36,16	-
Амортизація обладнання, грн./м ³	28,3	15,6	-
Зарплата, грн/м ³	10,5	10,5	-
Приведені затрати, грн/м ³	1158,3	1135,46	1073,2
Економічний ефект, грн/м³		22,84	85,1

Висновки до розділу

1. Проведеними випробуваннями бетонів для попередньо напружених плит перекриття на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій у заводських умовах ДП „Спецзалізобетон” показано, що їх використання дозволяє значно підвищити ранню міцність і як наслідок зменшити період технологічного циклу та знизити температуру ізотермічного витримування при одержанні бетонів заданого класу С35/45 для попередньо напружених багатопустотних плит перекриття.

2. Проведено впровадження високоміцних бетонів на основі портландцементних композицій для ремонту проїжджої частини мостів на автодорозі Львів–Пустомити–Меденичі км 17+200 до км 28+200. Впровадження надшвидкотверднучих композицій забезпечило вирішення технологічних завдань одержання однорідних високорухомих бетонних сумішей та бетонів з високою ранньою та проектною міцністю на їх основі.

3. Розроблено технічні умови ТУ У 23.5-02071010-174:2018 ”Наномодифіковані надшвидкотверднучі портландцементи”. Показана доцільність використання наномодифікованих надшвидкотверднучих систем при виготовленні товарних бетонів та для збірних залізобетонних виробів.

4. На основі ринкових цін та витрат основних компонентів проведено розрахунок статей витрат на виготовлення 1 м³ плит перекриття безопалубного формування з використанням високоміцного бетону на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій з досягненням економічного ефекту на 1 м³ $E_1=85$ грн і загального ефекту $E_{\text{заг}}=23,8$ тис. грн. за рахунок відмови від теплової обробки та зниження затрат на експлуатацію обладнання.

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 полікарбоксилатні суперпластифікатори та нанодисперсні частинки гідросилікатів кальцію, які за рахунок високого водоредукуючого ефекту полікарбоксилатів 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 І-500Р-Н – суперпластифікатор РСЕ – наночастинки С-С-Н” 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 витримання ($X_1 = 20, 40, 60$ °С) 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°С при витраті прискорювача тверднення 2,0 мас.%. Коефіцієнт ефективності використання надшвидкотверднучої портландцементної композиції становить при 20°С – $K=2,51$, при 40°С – $K=1,73$; при 60°С – $K=1,52$.

6. Досліджено будівельно-технічні властивості бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій 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 C35/45, водопоглинання за масою - 1,1 мас.%, марка за водонепроникністю W20, модуль пружності 52,6 ГПа, призмова 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 ИЗ 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 без пропарювальних технологій багатопустотних плит перекриття становить 85 грн на 1 м³ бетону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз механізмів поетапної організації мікроструктури бетонів / Коробко О. О. та ін. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2013. Вип. 25. С. 76–83.
2. Бабич Є., Рунова Р., Кріпка Л. Європейські стандарти на цемент : практика впровадження. Харків : ПП «Юнісофт», АВЦ «Укрцемент», 2017. 72 с.
3. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ, 2011. 529 с.
4. Баженов Ю. М., Алимов Л. А., Воронин В. В. Наномодифицированные цементные бетоны. М. : Изд-во АСВ, 2017. 198 с.
5. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. М. : Стройиздат, 1998. 768 с.
6. Беленцов Ю. А., Лесовик В. С., Ильинская Г. Г. Повышение надежности конструкций управлением параметрами композиционного материала // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 90–93.
7. Бикбау М. Я. Наноцемент – основа эффективной модернизации заводов сборного железобетона // ЖБИ и конструкции. 2012. № 1. С. 38–42.
8. Блажис А. Р. Сверхбыстротвердеющие высокопрочные щелочные клинкерные и шлакощелочные вяжущие и бетоны : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.23.05. Ленинград. 1990. 20 с.
9. Бліхарський З. Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2008. 108 с.
10. Болотских О. Н. Европейские методы физико-механических испытаний бетона. Харків : Торнадо, 2010. 144 с.
11. Большаков В. И., Шпырько Н. В. Управление эксплуатационными свойствами жаростойких теплоизоляционных материалов на основе кремнегеля // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. 2011. № 61. С. 54-61.

12. Будівельне матеріалознавство: підручник / П. В. Кривенко, К. К. Пушкарьова, В. Б. Барановський та ін. Київ : Видавництво Ліра-К, 2012. 624 с.

13. Бутт Ю. М., Тимашев В. В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М. : Высш. шк., 1973. 500 с.

14. Використання сонячної енергії для термосилової обробки бетону методом термосу / І. Н. Дудар, М. Ф. Друкований, В. Л. Гарнага, Яківчук С. В. // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2016. №1. С. 27-30.

15. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони : монографія / Л. Й. Дворкін, Є. М. Бабич, В. В. Житковський, О. М. Бордюженко, С. В. Філіпчук, Д. В. Кочкар'юв, І. В. Ковалик. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.

16. Високорухомі шлаколузні бетони з підвищеною ранньою міцністю / П. В. Кривенко, І. І. Руденко, О. М. Петропавловський, О. П. Константиновський // Науковий вісник будівництва. 2018. Т. 94, № 4. С. 117–124.

17. Виробництво методом екструзії. URL: <https://koncern-podillya.com.ua/news/novitni-tehnologii-virobnictva-ekstrudera> (Дата звернення 3.11.2018 р.)

18. Влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на структурообразование цементных паст / Л. М. Добшиц, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов // Фундаментальные исследования. 2014. № 5 (часть 5). С. 945–948.

19. Вплив підвищених температур на властивості цементних розчинів з добавкою нанокремнезему / Р. Sikora, Х. Р. Граб'юк, Е. Horszczaruk, М. А. Саницький // Будівельні матеріали і вироби. 2016. №1. С. 28–30.

20. Выровой В. Н., Дорофеев В. С., Суханов С. Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. Одесса : ГЕС, 2010. 169 с.

21. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками для дорожного и аэродромного строительства / А. Г. Шургая, И. П. Гамеляк, Я. Н. Якименко и др. // Автомобильные дороги и мосты. 2015. № 2 (16).
22. В'яжучі речовини / Р. Ф. Рунова, Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, Ю. Л. Носовський Київ : Основа, 2012. 448 с.
23. Горшков В. С., Тимашев В. В., Савельев В. Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М. : Выс. шк., 1981. 335 с.
24. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шпилюк П. С. Бетони і будівельні розчини : підручник. Київ : Основа, 2016. 568 с.
25. Давидюк А. Н., Несветаев Г. В. Эффективные бетоны для современного высотного строительства. М. : ООО «НИПКЦ Восход-А», 2010. 148 с.
26. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язання будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.
27. Деревянко В. Н., Скидан Л. В., Али М. Н. Определение эффективности добавок пластификаторов отечественного производства // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2007. №11. С. 28–35.
28. Добавки в бетон : технический каталог. М. : BASF Construction Chemicals, 2009. 136 с.
29. Добшиц Л. М., Кононова О. В., Анисимов С. Н. Кинетика набора прочности цементного камня с модифицирующими добавками // Цемент и его применение. 2011. № 4. С. 104–107.
30. Дудар І. Н., Гарнага В. Л., Яківчук С. В. Економічна ефективність застосування сонячної енергії для термосилової обробки бетону // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2014. № 17 (2). С. 21-25.
31. Дудар І. Н., Гарнага В. Л., Яківчук С. В. ТВО бетонних виробів із використанням сонячної енергії і тиску // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2017. №1. С. 11-16.

32. Дудар І. Н., Краєвський С. О. Створення і удосконалення тонкозернистих дисперсно-армованих порошкових бетонів // Будівельні матеріали та вироби. 2011. №70 (5). С. 8–10.

33. ДСТУ Б В.2.7-171:2008. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови. Київ, 2010. 93 с.

34. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. Київ, 2011. 14 с.

35. Експрес-випуск. Промислове виробництво у 2018 р. URL : <http://www.ukrstat.gov.ua/express/expr2019/01/09.pdf> (Дата звернення 3.11.2018 р.)

36. Ефективність пластифікуючих поверхнево-активних речовин у розчинах і бетонах на основі лужних цементів / Р. Ф. Рунова, В. І. Гоц, О. В. Ластівка та ін. // 36. наук. праць УкрДУЗТ. 2018. Вип. 182. С. 18-27.

37. Ефективні швидкотверднучі бетони для монолітного та дорожнього будівництва / У. Д. Марущак, 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.

38. Загребя В. П., Дудар І. Н. Формування бетонних і залізобетонних виробів методом пульсуючого пресування бетонних сумішей : монографія / Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. 104 с.

39. Ємність ринку цементів та бетону в Україні збільшилася – дослідження. URL: Pro-Consulting.ukrcement.com.ua/novini/informatsiya-2/341-https-pro-consulting-ua-ua-issledovanie-rynka (Дата звернення 18.10.2018 р.)

40. Калашников В. И. Бетоны : макро-, микро-, нано- и пикомасштабные сырьевые компоненты. Реальные нанотехнологии бетонов // Праці конф. «Дні сучасного бетону. Від теорії до практики». Хортиця, 2012. С. 38–49.

41. Коваль С. В. Моделирование и оптимизация состава и свойств модифицированных бетонов. Одесса : Астропринт, 2012. 424 с.

42. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов Т. 1 / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, Л. В. Трикоз и др. Київ : Наукова думка, 2011. 330 с.
43. Кондратьева Н. В. Нанотехнологии в производстве строительных материалов // Будівництво України. 2012. № 6. С. 2–9.
44. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження в будівництво / Р. Ф. Рунова, В. І. Гоц, М. А. Саницький та ін. К. : УВПК „ЕксОб”, 2008. 360 с.
45. Королев Е. В. Нанотехнологии в строительном материаловедении. Анализ состояния и достижений. Пути развития // Строительные материалы. 2014. № 11. С. 47–78.
46. Коц І. В., Колісник О. П. Тепловологісна обробка бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагрівання : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 100 с.
47. Кривенко П. В., Петропавловский О. Н., Лакуста С. О. Роль технологических факторов в формировании структуры и свойств шлакощелочных бетонов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2015. Вип. 57. С. 233–242.
48. Кривенко П. В., Ковальчук Г. Ю. Жаростойкий газобетон на основе щелочного алюмосиликатного связующего // Строительные материалы. 2001. № 7. С. 26–28.
49. Кузнецова Т. В., Кривобородов Ю. Р. Состав, свойства и применение специальных цементов // Технологии бетонов. 2014. № 2 (91). С. 8–11.
50. Кузьмина В. П. Нанобетоны в строительстве // Нанотехнологии в строительстве : Интернет-журнал. № 1/2010. С. 61–70.
51. Кугаєвська Т. С., Шульгін В. В., Сопов В. П. Аналіз міцності бетону при м'якому режимі теплової обробки нагрітим повітрям // Науковий вісник будівництва, Харків : ХНУБА. 2018. Т. 91. №1. С. 179–185.

52. Ластівка О. В. Модифіковані бетони на основі лужного шлакопортландцементу для монолітного будівництва : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Київ, 2015. 21 с.

53. Лесовик В. С., Федюк Р. С. Теоретические предпосылки создания цементных композитов повышенной непроницаемости // Вестник СибАДИ. 2016. Вып. 1 (47). С. 65–72.

54. Мазурак Т. А. Наномодифіковані портландцементні композиції та швидкотверднучі бетони на їх основі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Львів, 2017. 21 с.

55. Марущак У. Д. Концепція наномодифікування цементуючих систем для швидкотверднучих високофункціональних бетонів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" : Теорія і практика будівництва. 2016. № 844. С. 148–151.

56. Марущак У. Д., Олевич Ю. В. Модифіковані бетони для енергоефективних технологій збірного залізобетону // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Т. 1. Тернопіль, 2017. С. 138–139.

57. Механоактивация в технологи бетонов / В. Н. Выровой, И. В. Барабаш, А. В. Дорофеев, И. Н. Бабий и др. Одеса : ОГАСА, 2014. 148 с.

58. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформативными характеристиками / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд, Г. С. Кардумян, В. Г. Дондуков // Бетон и железобетон. 2006. № 2. С. 2–7.

59. Несветаев Г. В. Оценка эффективности суперпластификаторов // Дни современного бетона : Междунар. науч.-практ. конф. Запорожье : ООО „Будиндустрия ЛТД”, 2012. С. 19–27.

60. Ожищенко О. А., Савицький М. В. Ускорение твердения портландцемента вяжущими этtringитового типа // Будівельні конструкції. К. : НДІБК, 2011. Вип. 74. кн. 2. С. 84–89.

61. 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, 2018. Одеса. 2018. С. 112.

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

63. Опыт производства жаростойких вяжущих и бетонов на основе отходов производств / А. П Приходько, Н. В. Шпирько, А. В. Дзюбан и др. // «Стародубовские чтения - 2013». 2013. С. 71-76.

64. Пат. №121367 Україна, Зв'язуюче. М. А. Саницький, У. Д. Марущак, О. Р. Позняк, І. І. Кіракевич, Ю. В. Олевич. u201612966; заявл. 10.01.2017; опубл. 11.12.2017; №23. 4 с.

65. Плугин А. А., Лобяк А. В., Головкин Д. В. Моделирование ползучести бетона при оценке напряженно-деформированного состояния сталебетонных плит перекрытия // Вісник ОДАБА. 2016. Вип. 63. С. 79–83.

66. Плугин А. Н., Плугин А. А. Коллоидно-химические основы прочности и долговечности бетона и конструкций // Строительные материалы. 2007. № 7. С. 68–71.

67. Пономарев А. Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. 2009. №6. С. 25–33.

68. Пушкарьова К. К., Каверин К. О., Калантаєвський Д. О. Дослідження високоміцних цементних композицій, модифікованих комплексними органо-кремнеземистими добавками // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. Т. 5. № 5(77). С. 42–51.

75. Пушкарьова К. К., Каверин К. О. Дослідження впливу температури твердіння на зміну міцності при стиску модифікованих керамзитобетонів //

Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2018. № 71. С. 125-129.

69. Риффель З. Быстротвердеющий бетон для ремонта дорожного полотна, объектов в аэропортах и на железных дорогах // Цемент и его применение. 2014. № 5. С. 26–30.

70. Роль хімічних добавок у формуванні властивостей лужних цементів / В. І. Гоц, І. І. Руденко, О. В. Ластівка, Є. В. Волинська // Кераміка : наука і життя. 2017. № 3. С. 5-14.

71. Рунова Р. Ф., Троян В. В., Руденко І. І. Формування ефективної мезоструктури бетонів з використанням активованих заповнювачів // Будівельні конструкції. К. : ДП НДІБК, 2013. Вип.78, кн. 2. С. 408–413.

72. Русин Б. Г. Високофункціональні бетони на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Львів, 2014. 21 с.

73. Саницкий М. А. Некоторые вопросы кристаллохимии цементных минералов. К. : УМК ВО, 1990. 64 с.

74. Саницкий М. А., Марущак У. Д., Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції для високофункціональних бетонів // Будівельні матеріали і вироби. 2018. №3–4. С. 36–39.

75. Саницкий М. А., Марущак 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». Харків, 2017. С.87–88.

76. Саницкий М. А., Позняк О. Р. Жаростійкий бетон на основі модифікованого багатокомпонентного цементу // Будівельні матеріали та вироби. 2002. №1. С. 17–18.

77. Саницький М. А., Соболев Х. С., Марків Т. Є. Модифіковані композиційні цементи. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. 132 с.
78. Санчес Ф., Соболев К. Нанотехнологии в производстве бетонов : Обзор // Вестник ТГАСУ. 2013. № 3. С. 262–289.
79. Солодкий С. Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2008. 144 с.
80. Старчук В. Н., Старчук Я. В. Ефективні залізобетонні конструкції безопалубного формування для економічного житлового будівництва // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2012. Вип. 45. С. 30–36.
81. Суханевич М. В. Порівняння ефективності застосування різних вуглецевих нанодобавок для модифікації цементних композиційних матеріалів // Строительные материалы и изделия. 2017. № 3-4. С. 46-49.
82. Тейлор Х. Химия цемента // пер. с англ. М. : Мир, 1996. 560 с.
83. Теория цемента / А. А. Пащенко, Е. А. Мясникова, М. А. Саницкий и др. / под ред. А. А. Пащенко. К. : Будівельник, 1991. 169 с.
84. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів // В. І. Гоц, В. М. Кокшарьов, В. В. Павлюк, С. А. Тимошенко. Київ : Основа, 2014. 360 с.
85. Толмачев С. Н., Беличенко Е. А. Перспективы применения наночастиц в бетонах транспортного назначения // Будівельні матеріали та вироби. 2017. № 1–2. С. 38–41.
86. Троян В. В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Ніжин : Аспект-Поліграф, 2010. 228 с.
87. Ушеров-Маршак О. В., Кабусь О. В. Функціональна сумісність компонентів – фактор розвитку сучасного бетону (на прикладі добавок до бетону) // Наука та будівництво. 2018. № 1. С. 27–33.
88. Ушеров-Маршак А. В. Кабусь А. В. Калориметрический мониторинг ранних стадий твердения цементов в присутствии добавок // Неорганические материалы. 2013. Т. 49. № 4. С. 449-452.

89. Фаликман В. Р. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах. Промышленное и гражданское строительство. 2013. №1. С. 31–34.
90. Фаликман В. Р. Поликарбоксилаты : вчера, сегодня, завтра // Дни современного бетона : IX Междунар. науч.-практ. конф., Запорожье : Будиндустрия ЛТД, 2008. С. 72–76.
91. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Л. Г. Шпынова, В. И. Чих, М. А. Саницкий и др. Львов : Высш. шк., 1981. 160 с.
92. Чарнецки Л., Курдовски В. Будущее бетона // IX Міжнар. наук.-практ. конф. Запоріжжя, 2007. С. 13–21.
93. Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема (вопросы теории и приложений) // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. 2008. № 5. С. 30–32.
94. 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.
95. Шейнич Л. А., Пушкарева Е. К. Процессы самоорганизации структуры строительных композитов. Київ : Гамма-принт, 2009. 153 с.
96. Шишко Н. С., Корх О. І., Сопов В. П. Застосування методу щільної упаковки компонентів при проектуванні складу бетону // Будівельні матеріали і вироби. 2018. № 1. С. 21–25.
97. Штарк Й., Вихт Б. Цемент и известь / пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. Київ, 2008. 480 с.
98. Щелочные цементы : монография / П. В. Кривенко, Р. Ф. Рунова, М. А. Саницкий, И. И. Руденко. Київ : «Основа», 2015. 448 с.
99. Aitcin P. C. The art and science of high performance concrete // Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers. Bucharest (Romania), 2003. P. 69–88.

100. Analysis of plasticizer effectiveness during alkaline cement structure formation / P. Kryvenko, R. Runova, I. Rudenko, V. Skoryk, V. Omelchuk // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2017. №4(6). P. 35–41.
101. Behavior and design of high-strength prestressed concrete girders / W. Choi, S. Rizkalla, P. Zia, A. Mirmiran // PCI Journal. 2008. №5. P. 54–69.
102. Bhuvaneshwari B., Saptarshi S., Nagesh R. I. Nanoscience to Nanotechnology for Civil Engineering – Proof of Concepts // Recent Researches in Geography, Geology, Energy, Environment. 2014. № 2. P. 230–235.
103. Bost P., Regnier M., Horgnies M. Comparison of the accelerating effect of various additions on the early hydration of Portland cement // Construction and Building Materials. 2016. №113. P. 290–296.
104. Campillo I., Dolado J. S., Porro A. High performance nanostructured materials for construction // Nanotechnology in construction RSC publications. 2004. P. 215–225.
105. Chatterjee A. K. Chemistry and engineering of the clinkerization process. Incremental advances and lack of breakthroughs // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Issue 7. P. 624–641.
106. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles / B.-W. Jo, C.-H. Kim, G. Tae, J.-B. Park // Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21, Issue 6. P. 1351–1355.
107. Colloidal chemistry examination the steric effect of polycarboxylate superplasticizers / J. Plank, D. Vlad, A. Brandl et al. // Cement international. 2005. № 2. P. 100–110.
108. Czarnecki L., Kurdowski W. Tendencje kształtujące przyszłość betonu // Konferencja „Dni Betonu”. Wisła, 2006. S. 3–18.
109. Development of nano SiO₂ based admixtures for High Performance Cement-based Materials / K. Sobolev et al. // Nanotechnology in Construction. 2009. Part 2. P. 139–148.

110. Design of rapid hardening quaternary zeolite-containing Portland-composite cements / M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, T. Kruts, O. Horpynko, I. Geviuk // *J. Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 761. P. 193–196.

111. Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing / Martí J. V., Gonzalez-Vidoso F., Yepes V., Alcalá J. // *Engineering Structures*. 2013. №48. P. 342–352.

112. Domone P., Illston J. *Construction Materials : Their Nature and Behaviour*, Fourth Edition, CRC Press, 2010. 567 p.

113. Effect of incorporation route on dispersion of mesoporous silica nanospheres in cement mortar / E. Horszczaruk, E. Mijowska, K. Cendrowski, S. Mijowska, P. Sikora // *Construction and Building Materials*. 2014. № 66. P. 418–421.

114. Effectiveness of polycarboxylate superplasticizers in ultra-high strength concrete : The importance of PEC compatibility with silica flume / J. Plank, C. Schroeﬂ, M. Gruber, N. Lesti, R. Sieber // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2009. Vol. 7. № 1. P. 5–12.

115. Experimental study on the development of compressive strength of early concrete age using calcium-based hardening accelerator and high early strength cement / Tae-Beom Min et al. // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 64. P. 208–214.

116. Garrault S. Study of C-S-H growth on C_3S surface during its early hydration // *Materials and Structures*. 2005. №. 38. P. 435–442.

117. Hajok D. Gdy liczy się jakość i szybkość wiązania. Polski cement // *Budownictwo, technologie, architektura*. 2011. № 3 (55). S. 42–43.

118. Hydrate failure in ITZ governs concrete strength : A micro-to-macro validated engineering mechanics model / M. Königsbergera, M. Hlobila, B. Delsauteb et al. // *Cement and Concrete Research*. 2018. № 103. P. 77–94.

119. Ilerisoy Z. Y., Takva Y. *Nanotechnological Developments in Structural Design : Load-Bearing Materials / Engineering, Technology and Applie*. 2017. Vol. 7. №. 5. P. 1900–1903.

120. Influence of superplasticizers on the hydration of cement and pore structure of hardened cement / Sakai E., Kasuga T., Sugiyama T. at el. // *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. № 11. P. 2049–2053.

121. Influence of the new method of nanosilica addition on the mechanical properties of cement mortars / E. Horszczaruk, E. Mijowska, K. Cendrowski, P. Sikora // *Cement Wapno Beton*. 2014. Issue 5. P. 308–316.

122. Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T. *Betony ultrawysokowartosciowe. Wlasciwosci, technologie, zastosowania*. Krakow : SPC, 2008. 157 s.

123. John E., Matschei T., Stephan D. Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – A review. // *Cement and Concrete Research*. 2018. №113. P. 74–85

124. Kanchanason V., Plank J. C-S-H – PCE Nanocomposites for Enhancement of Early Strength of Cement // *Proceedings of the 19th International Conference on Building Materials (IBAUSIL 2015)*. Weimar. Germany, 2015. Band 1. P. 0759–0766.

125. Kani E. Najafi, Allahverdi A. Fast Set and High Early Strength Cement from Limestone, Natural Pozzolan, and Fluorite // *International Journal of Civil Engineering*. 2010. Vol. 8. №. 4. P. 362–369.

126. Kaprielov S., Sheynfeld A., Kardumian H. Characteristics of the structure and properties of high-strength concrete, containing multicomponent modifiers including silica fume, fly ash and metakaolin // *Proceedings of the 16th International Conference on Building Materials (IBAUSIL 2006)*. Weimar. Germany, 2006. Band 2. P. 77–84.

127. Kim J. J., Foley E. M., Taha M. M. R. Nano-mechanical characterization of synthetic calcium–silicate–hydrate (C-S-H) with varying CaO/SiO₂ mixture ratios // *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 36. P. 65–70.

128. Krivenko P. Why alkaline activation – 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials // *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2017. Vol. 8, №. 3. P. 323–333.

129. Kurdowski W. Chemistry of cement and concrete. Scientific Publishing PWN. Warsaw, 2010. 728 p.

130. Land G., Stephan D. The acceleration of the hydration of cements with and without supplementary cementitious materials by C-S-H seeds // Proceedings of the 19th International Conference on Building Materials (IBAUSIL 2015). Weimar. Germany, 2015. Band 2. P. 1011–1017.

131. Land G., Stephan D. The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement // Journal of Material Science. 2011. № 47(2). P. 1011–1017.

132. Ludwig H.-M. Future cements and their properties // Cement International. Verlag Bau + Technik GmbH, 2012. № 4. P. 81–89.

133. Manual for the design of hollowcore slabs. URL: http://www.fpcaweb.org/notebook/HC_Manual.pdf. (дата звернення 27.08.2017).

134. Marushchak U., Olevych Y. Effective rapid-hardening concretes based on nanomodified cement systems // Міжнародна науково-технічна конференція «Еко-комфорт». Львів, 2016. С. 49–50.

135. Marushchak U., Sanytsky M., Olevych Y. Effects of elevated temperatures on the properties of nanomodified rapid hardening concretes // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 116. P. 01008.

136. Marushchak U., Rusyn B., Olevych Y. The properties of Rapid hardening fiber-reinforced concretes at elevated temperatures // 20 Internationale Baustofftagung. 12–14 September 2018. Weimar. Deutschland, 2018. P. 905–912.

137. Mendes T. M., Hotza D., Repette W. L. Nanoparticles in cement based materials : A review // Reviews on advanced materials science. 2015. № 40 P. 89–96.

138. Middendorf B., Singh N. B. Nanoscience and nanotechnology in cementitious materials // Cement international. 2006. № 4. P. 80–86.

139. Modification of cement-based materials with nanoparticles / S. Kawashima, P. Hou, D. J. Corr, S. P. Shah // *Cement and Concrete Composites*. 2013. № 36, 2. P. 8–15.
140. 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) P. 61–66.
141. Nanotechnological improvement of structural materials – impact on material performance and structural design / Schmidt M. et al. // *Cement Concrete Composites*. 2013. № 36. P. 3–7.
142. Neville A. M. *Properties of concrete*. Kraków : Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2012. 931 p.
143. Nicoleau L. The Acceleration of Cement Hydration by Seeding : Influence of the Cement Mineralogy // 18th International Conference on Building Materials (IBAUSIL 2012). Weimar, Germany. 2012. Band 2. P. 0368-0376.
144. Optimization of Post-Fire Residual Compressive Strength of Concrete by Taguchi Method / A. Rahim, U. Sharma, K. Murugesan, A. Sharma, P. Arora // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2012. Vol. 3. Issue 2. P. 169–180.
145. Pizoń J. Long-term compressive strength of mortars modified with hardening accelerating admixtures // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 195. P. 205–211.
146. Plank J. Concrete Admixtures – Where Are We Now and What Can We Expect in the Future? // *Proceedings of the 19th International Conference on Building Materials*. Weimar, Germany, 2015. Band 2. P. 11–17.
147. Pushkarova K., Sukhanevych M., Marsikh A. Using of untreated carbon nanotubes in cement composition // *Materials Science Forum*. Brno, Czech Republic, 2016. Vol. 865. P. 6–11.
148. Quercia G., Brouwers H. J. H., Hüskén G. Water demand of amorphous nano-silica and their impact on the workability of cement paste // *Cement and Concrete Research*. 2012. № 42. P. 344–357.

149. Rana N., Tiwari A., Srivastava A. K. High performance concrete and its applications in the field of civil engineering construction // International Journal of Current Engineering and Technology. 2016. Vol. 6, Issue 3. P. 982–985.

150. Rapid-hardening cements with addition of anhydrite-lime sinters / J. Malolepshy, L. Kotwica, Z. Konyk, R. Zak // Cement-Wapno-Beton. 2014. №1. P. 40–45.

151. 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. P. 50–57.

152. Residual strength and deformation characteristics of confined concrete subjected to elevated temperature / U. K. Sharma, K. A. Zaidi, P. Bhargava, N. M. Bhandari // Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. 2010. P. 2178–2187.

153. Role of Nanotechnology in Concrete a Cement Based Material : A Critical Review On Mechanical Properties and Environmental Impact / R. A. Hitesh, P. Sachin, C. Parikh, J. H. Markna // International Journal of Nanoscience and Nanoengineering. 2015. Vol. 2. №. 5. P. 32–35.

154. 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.

155. Scrivener K. L., Nonat A. Hydration of cementitious materials, present and future // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Issue 7. P. 651–665.

156. Setzer M. J. From nanoscopic surface science to macroscopic performance of concrete - a challenge for scientists and engineers // Proceedings of the 17th International Conference on Building Materials (IBAUSSIL 17). Weimar. Germany, 2009. Band 1. P. 1–12.

157. Shi C., Krivenko P. V., Roy D. Alkali-Activated Cements and Concretes. Abingdon : Taylor & Francis, 2006. 376 p.

158. Significance of Nanotechnology in Construction Engineering / Ashwani K. Rana, Shashi B. Rana, A. Kumari, V. Kiran // International Journal of Recent Trends in Engineering. 2009. Vol. 1. № 4. P. 46–48.
159. Sikora P., Elrahman M. A., Stephan D. The influence of nanomaterials on the thermal resistance of cement-based composites – A Review // Nanomaterials. 2018. № 8. P. 465–498.
160. Sobolev K., Ferrada-Gutiérrez M. How Nanotechnology Can Change the Concrete World // American Ceramic Society Bulletin. 2005. №. 10. P. 14–17.
161. Stark J., Möser B. Nano and microstructure of Portland cement paste. International workshop. Essen (Germany). 2002. P. 15–25.
162. Sustainable construction. Guide on concrete usage index. URL: www.bca.gov.sg/SustainableConstruction/others/sc_cui_final.pdf (дата звернення 12.12.2017).
163. The Future of civil engineering with the influence and impact of nanotechnology on properties of materials / N. V. Rao, M. Rajasekhar, K. Vijayalakshmi, M. Vamshykrishna // Procedia Materials Science. 2015. Vol. 10. P. 111–115.
164. The study of possibility of modification of carboxylate plasticizers in modified fine concrete mortars / S. S. Kiski, I. V. Ageyev, A. N. Ponomaryov, A. A. Kozeyev // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 42–46.
165. Thomas J., Jennings H., Chen J. Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement // Journal of Physical Chemistry. 2009. № 113 (11). P. 4327–4334.

ДКПП 23.51.12

УКНД 91.100.10



Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

Н. І. Чухрай
2018 р.

НАНОМОДИФІКОВАНІ НАДШВИДКОТВЕРДУЧІ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТИ

Технічні умови

ТУ У 23.5-02071010-174:2018
(проект)

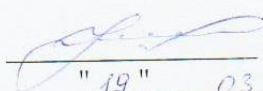
Без обмеження терміну дії

РОЗРОБЛЕНО:

Завідувач кафедри "Будівельне виробництво",
д.т.н., проф.


Саницький М. А.
"14" "03" 2018 р.

Відповідальний виконавець,
доцент кафедри "Будівельне виробництво",
к.т.н.


Марущак У. Д.
"19" "03" 2018 р.

Виконавець,
аспірант кафедри "Будівельне виробництво"


Олевич Ю. В.
"19" "03" 2018 р.

2018

ЗМІСТ

1. Сфера застосування.....	3
2. Нормативні посилання.....	3
3. Терміни понять та визначення.....	5
4. Технічні вимоги.....	6
5. Вимоги безпеки та охорони довкілля.....	7
6. Правила приймання.....	8
7. Методи випробувань.....	9
8. Пакування, маркування, транспортування і зберігання.....	10
9. Гарантії виготовлювача.....	10
Аркуш обліку змін.....	11

					ТУ У 23.5-02071010-174:2018				
Зм	Арк	№ документа	Підпис	Дата	Наномодифіковані надшвидкотверднучі портландцементи	Літ	Аркуш	Аркушів	
Розроб	Марущак			19.03.2018					
	Олевич			19.03.2018			2	11	
Перев	Саницький			19.03.2018		НУ «Львівська політехніка»			
Н контр	Кропивницька								
Затв									

1. СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Ці технічні умови поширюються на наномодифіковані надшвидкотверднучі портландцементи (далі – наномодифіковані портландцементи), що виготовляються на основі портландцементу ДСТУ Б EN 197-1 – СЕМ І 42,5 з добавками-модифікаторами (суперпластифікатор, нанодисперсний прискорювач тверднення). Наномодифіковані портландцементи призначені для швидкотверднучих високоміцних бетонів збірних звичайних і попередньонапружених залізобетонних виробів з підвищеною відпускною міцністю, а також одержання високорухливих бетонних сумішей для монолітних конструкцій, в т. ч. густоармованих, складної форми, тонкостінних, за необхідності скорочення термінів оборотності опалубки, зменшення витрат в'язучого, бетонування у зимових умовах, при ремонтних та аварійно-відновлювальних роботах. Вимоги щодо безпечності продукції для здоров'я і життя населення та охорони довкілля викладені в розділі 5.

2. НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

У цих технічних умовах є посилання на такі нормативні документи:

ДСТУ 3835-98 (ГОСТ 28507-99) Взуття спеціальне з верхом із шкіри для захисту від механічного діяння. Технічні умови

ДСТУ 7239:2011 ССБП. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація

ДСТУ Б А.3.2-12:2009 ССБП. Системи вентиляційні. Загальні вимоги

ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови

ДСТУ Б В.2.7-112-2002 Будівельні матеріали. Цементи. Загальні технічні умови

ДСТУ Б В.2.7-124-2004 Будівельні матеріали. Цемент для будівельних розчинів. Технічні умови

ДСТУ Б В.2.7-126:2011 Будівельні матеріали. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови

ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови (EN 934-2:2008, NEQ)

ДСТУ Б В.2.7-185:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму

ДСТУ Б В.2.7-186:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Метод визначення водовідділення

ДСТУ Б В.2.7-187:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск

ДСТУ Б В.2.7-202:2009 Будівельні матеріали. Цементи та матеріали цементного виробництва. Методи хімічного аналізу

ДСТУ Б В.2.7-239:2010 Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань (EN 1015-11:1999, NEQ)

ДСТУ Б В.2.7-274:2011 Добавки для цементів. Класифікація (ГОСТ 24640-91, MOD)

ДСТУ Б В.2.7-281:2011 Цементи. Класифікація

ДСТУ ГОСТ 12.4.041:2006 ССПБ. Засоби індивідуального захисту органів дихання фільтрувальні. Загальні технічні вимоги

ДСТУ EN 133:2005 Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація

ДСТУ EN 340-2001 Одяг спеціальний захисний. Загальні вимоги (EN 340:1993, IDT)

ДСТУ Б EN 196-1:2007 Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2005, IDT)

ДСТУ Б EN 196-2:2015 Методи випробування цементу. Частина 2. Хімічний аналіз цементу (EN 196-2:2005, IDT)

ДСТУ Б EN 196-3:2015 Методи випробування цементу. Частина 3. Визначення строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму (EN 196-3:2005)

ДСТУ Б EN 196-6:2015 Методи випробування цементу. Частина 6. Визначення тонкості помолу (EN 196-6:1989, IDT)

ДСТУ Б EN 196-9:2015 Методи випробування цементу. Частина 9. Теплоота гідратації. Напівадіабатичний метод (EN 196-9:2010, IDT)

ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197-1:2011, IDT)

ДБН А.3.2-2-2009 ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення

ДБН В.2.5-28-2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення

ДГН 6.6.1-6.5.001-98 Державні гігієнічні нормативи. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)

ДСН 3.3.6.042-99 Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень

ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (ССБП. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря виробничної зони)

ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (ССБП. Шкідливі речовини. Класифікація та загальні вимоги безпеки)

ГОСТ 12.3.009-76 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности (ССБП. Роботи завантажувально-розвантажувальні. Загальні вимоги безпеки)

ГОСТ 12.4.010-75 ССБТ. Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия (ССБП. Засоби індивідуального захисту. Рукавиці спеціальні. Технічні умови)

ГОСТ 12.4.013-85 ССБТ. Очки защитные. Общие технические условия (ССБП. Окуляри захисні. Загальні технічні умови)

ГОСТ 27574-87 Костюмы женские для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий. Технические условия (Костюми жіночі для захисту від загальних виробничих забруднень і механічних впливів. Технічні умови)

ГОСТ 27575-87 Костюмы мужские для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий. Технические условия (Костюми чоловічі для захисту від загальних виробничих забруднень і механічних впливів. Технічні умови)

Державні санітарні норми та правила утримання територій населених місць, затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України від 17.03.2011 № 145 зареєстровані в Міністерстві юстиції України 05.04.2011 за № 457/19195

Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України, затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України від 02.02.2015 № 54, зареєстровані в Міністерстві юстиції України 20.05.2015 за № 552/10832

3. ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

У цих технічних умовах використано терміни, установлені в ДСТУ Б В.2.7-46, ДСТУ Б В.2.7-112, ДСТУ Б В.2.7-281, ДСТУ Б EN 197-1: портландцемент, надшвидкотверднучий цемент, високоміцний цемент, речовинний склад, нормальна густота, цементне тісто, водоцементне відношення, рання міцність, стандартна міцність, клас за міцністю,

будівельно-технічні властивості; ДСТУ Б В.2.7-126: добавка-модифікатор; ДСТУ Б В.2.7-274: пластифікатор, прискорювач тверднення.

Нижче подано терміни та визначення понять, додатково використані в цих технічних умовах.

Наномодифікований портландцемент – портландцемент, модифікований нанодисперсними добавками, які дозволяють направлено керувати процесами структуроутворення та спектром властивостей в'язучого.

Нанодисперсні добавки – матеріали, що містять структурні елементи, розміри яких хоч би в одному вимірі не перевищують 100 нм, і характеризуються якісно новими функціональними і експлуатаційними властивостями.

4.ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

4.1. Загальні положення

4.1.1. Наномодифіковані портландцементи повинні виготовлятися відповідно до вимог цих технічних умов і технологічними регламентами виробництва, затвердженими у встановленому порядку.

4.1.2. Для виробництва наномодифікованих портландцементів використовують портландцемент СЕМ І 42,5 та добавки-модифікатори, в т.ч. нанодисперсні, що регулюють властивості в'язучого.

4.2. Вимоги до матеріалів

4.2.1. Матеріали, що використовують при виготовленні наномодифікованих портландцементів, повинні відповідати діючим стандартам. Для виготовлення наномодифікованих портландцементів застосовують:

- портландцемент ДСТУ Б EN 197-1 – СЕМ І 42,5.

Добавки-модифікатори:

- прискорювач тверднення, що містить нанодисперсні синтетичні гідросилікати кальцію, згідно з ДСТУ Б В.2.7-171;

- суперпластифікатор на основі полікарбоксилатного ефіру згідно з ДСТУ Б В.2.7-171.

4.2.2. Сумарна питома активність природних радіонуклідів у матеріалах, що застосовуються, не повинна перевищувати встановленої ДГН 6.6.1-6.5.001 для відповідного виду будівництва.

4.2.3. Питома поверхня портландцементу СЕМ І 42,5 повинна бути не менше, ніж $350 \text{ м}^2/\text{кг}$.

4.2.4. Дозування всіх складників при виготовлені наномодифікованих портландцементів ведеться за масою.

4.3. Класифікація і позначення

4.3.1. За речовинним складом наномодифіковані портландцементи відносяться до типу СЕМ І портландцементи без добавок згідно з ДСТУ Б EN 197-1.

4.3.2. За стандартною міцністю з нормуванням ранньої міцності при стиску у віці 1 та 2 діб наномодифіковані портландцементи поділяють на класи 55; 60; 65; 70; 75 з позначенням надшвидкотверднучого ER (extra rapid).

4.3.3. Умовне позначення наномодифікованих надшвидкотверднучих портландцементів повинне включати позначення NCEM І, клас за міцністю згідно з 4.3.2, номер цих технічних умов:

портландцемент NCEM І 60 ER ТУ У 23.5-02071010-174:2018

4.4. Вимоги до наномодифікованих портландцементів

4.4.1. Для модифікування портландцементу вводяться добавки-модифікатори (пластифікуючі поверхнево-активні речовини та прискорювач тверднення, що містить нанодисперсні частинки кальцію гідросилікатів) в кількості не більше 4 % від маси цементу.

4.4.2. Фізико-механічні характеристики наномодифікованих портландцементів повинні відповідати вимогам, наведеним у таблиці 1.

Таблиця 1 – Фізико-механічні вимоги

Клас за міцністю портландцементу	Міцність при стиску, МПа, у віці, діб				Початок тужавлення, хв	Рівномірність зміни об'єму, мм
	1	2	28			
55 ER	≥ 25,0	≥ 35,0	≥ 55	≤ 65	≥ 45	≤ 10
60 ER	≥ 30,0	≥ 40,0	≥ 60	≤ 70		
65 ER	≥ 32,5	≥ 45,0	≥ 65	≤ 75		
70 ER	≥ 35,0	≥ 50,0	≥ 70	≤ 80		

4.4.3. Наномодифіковані портландцементи повинні витримувати випробування на рівномірність зміни об'єму кип'ятінням у воді зразків цементного тіста. При визначенні рівномірності зміни об'єму згідно ДСТУ Б EN 196-3 розширення наномодифікованих портландцементів не повинно перевищувати 10 мм.

4.4.5. За показниками втрати маси при прожарюванні, нерозчинного залишку, вмісту хлорид-іонів, вмісту сульфур триоксиду наномодифіковані портландцементи повинні відповідати вимогам ДСТУ Б EN 197-1.

4.4.6. Замовник має право проводити контрольну перевірку вказаних характеристик на відповідність даним.

5. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ

5.1. Наномодифіковані портландцементи є пожежовибухобезпечними, не утворюють токсичних сполук в повітряному середовищі та стічних водах в присутності інших речовин та матеріалів. В стічних водах дають слаболужну реакцію.

5.2. Наномодифіковані портландцементи відносяться до IV класу небезпечності згідно з класифікацією за ГОСТ 12.1.007. Цементний пил виявляє фіброгенну і шкіроподразнюючу дію.

5.3. У виробничих приміщеннях вміст цементного пилу не повинен перевищувати 6 мг/м³. Середньозмінний вміст пилу не повинен перевищувати величину гранично допустимої концентрації (ГДК). Періодичність контролю вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони повинна відповідати вимогам ГОСТ 12.1.005.

5.4. Наномодифіковані портландцементи за радіонуклідним складом і радіаційною безпекою повинні відповідати вимогам ДГН 6.6.1-6.5.001. Радіаційний контроль виконують згідно з Основними санітарними правилами забезпечення радіаційної безпеки України.

5.5. Працюючі повинні застосовувати засоби індивідуального захисту згідно з ДСТУ ГОСТ 12.4.041, спецодяг згідно з ДСТУ EN 340, ГОСТ 27574 та ГОСТ 27575, спецвзуття – ДСТУ 3835, захисні окуляри – ГОСТ 12.4.013, засоби захисту органів дихання – ДСТУ EN 133.

5.6. Параметри мікроклімату виробничих приміщень повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042.

5.7. Виробничі приміщення повинні бути обладнані системами припливно-витяжної вентиляції, аспірації та опалення, елеватори і шнекові транспортери загерметизовані згідно з ДСТУ Б А.3.2-12, освітлення – згідно з ДБН В.2.5-28.

5.8. Вантажно-розвантажувальні роботи повинні здійснюватись відповідно до ДБН А.3.2-2 і ГОСТ 12.3.009. При проведенні цих робіт повинні виконуватись загальні вимоги захисту працюючих згідно з ДСТУ 7239, а для захисту шкіри рук працюючих слід використовувати засоби індивідуального захисту за ГОСТ 12.4.010.

5.9. Охорона ґрунту і поверхневих вод від забруднення промисловими відходами повинна здійснюватись відповідно до Державних санітарних норм та правил утримання територій населених місць.

6. ПРАВИЛА ПРИЙМАННЯ

6.1. Приймання наномодифікованих портландцементів проводять згідно з ДСТУ Б В.2.7-112 виготовлювачем за результатом технічного контролю на виробництві.

6.2. Виготовлювач забезпечує проведення контролю всіх властивостей наномодифікованих портландцементів, що гарантуються, у визначені терміни і у встановлених обсягах за стандартними методиками.

6.3. Приймально-здавальні випробування включають випробування кожної партії наномодифікованих портландцементів за всіма показниками якості з мінімальною періодичністю згідно з ДСТУ Б В.2.7-46. Партією вважають кількість портландцементу одного складу, виготовлену з одних вихідних матеріалів на одному технологічному обладнанні протягом однієї зміни.

6.4. Кожна партія наномодифікованих портландцементів (або частина її, що відвантажується одному споживачу) супроводжується документом про якість, в якому вказують:

- найменування і призначення продукції;
- найменування підприємства-виробника та його адресу;
- номер і дату видачі документа;
- дату виготовлення (число, місяць, рік);
- номер партії;
- масу нетто партії, що відвантажується, кг;
- запис про відповідність результатів приймально-здавальних випробувань;
- штамп служби технічного контролю (підпис представника підрозділу підприємства-виробника, який відповідає за технічний контроль).

7. МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ

7.1. Терміни тужавлення, нормальну густоту цементного тіста, рівномірність зміни об'єму наномодифікованих портландцементів визначають згідно з ДСТУ EN 196-3, тонину розмелювання – ДСТУ EN 196-6. Визначення рівномірності зміни об'єму допускається відповідно до ДСТУ Б В.2.7-185 і забезпечує співставлення результатів випробувань, отриманих при використанні методу згідно з ДСТУ EN 196-3.

7.2. Фізико-механічні випробування наномодифікованих портландцементів проводять згідно з ДСТУ EN 196-1 з такими змінами:

7.2.1. Для визначення характеристики міцності наномодифікованих портландцементів виготовляють зразки-балочки з цементно-піщаного розчину 1:3, який складається з однієї частини цементу і трьох частин стандартного піску СЕН згідно з ДСТУ EN 196-1 за масою. При цьому для замішування такого розчину використовують розчини добавок-модифікаторів.

7.2.2. Рухливість цементно-піщаного розчину визначають методом розпливу стандартного конуса на струшувальному столику. Для цього приготовлений розчин згідно 7.2.1 цих технічних умов вкладають у форму-конус відповідно до ДСТУ Б В.2.7-187. При цьому підбирають таке водоцементне відношення, яке б забезпечило розтікання стандартного конуса в межах від 140 мм до 160 мм.

7.2. Хімічний аналіз наномодифікованих портландцементів здійснюють за ДСТУ Б В.2.7-202 та ДСТУ Б EN 196-2.

7.3. Будівельно-технічні властивості наномодифікованих портландцементів визначають:

- водовідділення згідно з ДСТУ Б В.2.7-186;
- водоутримання згідно з ДСТУ Б В.2.7-124;
- тепловиділення згідно з ДСТУ EN 196-9;
- розшарування згідно з ДСТУ Б В.2.7-239;
- деформації усадки і набухання згідно з чинною нормативно-технічною документацією;
- морозостійкість згідно з чинною нормативно-технічною документацією на зразках, виготовлених та випробуваних на міцність згідно з ДСТУ EN 196-1;
- корозійну стійкість згідно з чинною нормативно-технічною документацією;
- тріщиностійкість згідно з чинною нормативно-технічною документацією.

8. ПАКУВАННЯ, МАРКУВАННЯ, ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗБЕРІГАННЯ

8.1. Пакування наномодифікованих портландцементів здійснюють згідно з ДСТУ Б В.2.7-112 та ДБН А.3.2-2.

8.2. Маркування наномодифікованих портландцементів в мішках виконують з врахуванням ДБН А.3.2-2 на лицевій стороні мішка з обов'язковою позначкою зеленим кольором згідно з ДСТУ Б В.2.7-281. Маркування має містити:

- назву, товарний знак, адресу підприємства-виробника та постачальника;
- умовну позначку наномодифікованого портландцементу згідно з 4.3.3;
- кількість портландцементу в тарі;
- номер партії і дату виготовлення портландцементу;
- гарантійний термін та умови зберігання;
- застережні написи, знаки.

8.3. Транспортування і зберігання наномодифікованих портландцементів проводять згідно з ДСТУ Б В.2.7-112. При завантаженні, транспортуванні і розвантаженні повинні бути прийняті заходи захисту від механічних пошкоджень.

8.4. Підприємство-виробник зобов'язане супроводжувати партію готової продукції документом, що засвідчує її якість.

9. ГАРАНТІЇ ВИГОТОВЛЮВАЧА

9.1. Підприємство-виробник гарантує відповідність наномодифікованих портландцементів всім вимогам цих технічних умов та діючих стандартів при дотриманні правил його транспортування і зберігання: при поставці в тарі – протягом 45 діб після відвантаження; при поставці навалом – на момент одержання споживачем, але не більше 45 діб після відвантаження.

9.2. Замовник за домовленістю з виготовлювачем може одержати додаткову, крім зазначеної в паспорті, інформацію про характеристику партії цементу, що відвантажуються на його адресу.

**АРКУШ ОБЛІКУ ЗМІН ТЕХНІЧНИХ УМОВ
ТУ У 23.5-02071010-174:2018**

[illegible]


 «ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ДП «Спецзалізобетон»
 Кшановський Я.М.
 » _____ 2017 р.

А К Т

про випуск дослідної партії високоміцного бетону
на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій

Ми, що нижче підписалися начальник управління з якості ПрАТ «Івано-Франківськцемент» Горпинко О.Ф., начальник лабораторії ДП «Спецзалізобетон» Курцеба Л.О. та представники Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., професор Саницький М.А., к.т.н., доцент Марушак У.Д., аспірант Олевич Ю.В., склали даний акт про те, що в період березень-квітень 2017 р. відповідно до договору № 0532 згідно з НДР «Розробка та дослідження модифікованих бетонів різного функціонального призначення на основі портландцементів ПАТ «Івано-Франківськцемент» проведено випуск партії бетонів класу міцності С30/35 з використанням надшвидкотверднучих портландцементних композицій «портландцемент ПЦ І-500Р – полікарбоксилатний суперпластифікатор – прискорювач тверднення» для виготовлення пустотілих плит перекриття ПБ 60-15.22.8 методом безопалубного формування на стендах технологічної лінії італійської фірми «Nordimpianti». При цьому вирішено завдання забезпечення необхідних передавальної та проектної міцностей бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій в умовах низькоізотермічного прогріву за скороченим режимом теплової обробки плит перекриття (1 год попередньої витримки, 2 год нагрівання та 4 год витримки при температурі 30-40°C з подальшим витримуванням без прогріву на стендах під покриттям). Загальний об'єм виготовленого бетону склав 280 м³.

Для виробництва бетону застосовували портландцемент ПЦ І-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (витрата цементу – 370 кг/м³ бетонної суміші). Для оптимізації складу бетонної суміші як заповнювачі використовували кварцовий пісок Побережанського родовища Івано-Франківської області ($M_k=2,86$), гранітний щебінь Коростенського родовища фракцій 5-20 мм; 5-10 мм. З метою досягнення заданої жорсткості бетонних сумішей, а також отримання бетонів з необхідними передавальною та проектною міцністю на їх основі в умовах малопрогрівної технології за скороченим режимом ізотермічної витримки при температурі 30-40 °C використовували надшвидкотверднучі портландцементні композиції, модифіковані комплексною добавкою пластифікуюче-прискорюючої дії на основі полікарбоксилатного суперпластифікатора Sika 1020 та прискорювача

тверднення X-SEED, що містить нанорозмірні синтетичні частинки гідросилікатів кальцію. Рекомендована витрата даної добавки складає 2,0 мас. %.

Результати випробувань бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій, що тверднули в нормальних умовах, а також при скороченому режимі теплової обробки на лінії виготовлення плит перекриття, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Результати випробувань високоміцного бетону на основі
надшвидкотверднучих портландцементних композицій**

Найменування показника		Значення показника
В/Ц		0,33
Жорсткість бетонної суміші, с / марка за жорсткістю		20/Ж2
Середня густина бетонної суміші, кг/м ³		2435
Міцність на стиск після ТВО, МПа, у віці, діб	1	54,7
	28	71,3
Міцність на стиск у нормальних умовах, МПа, у віці, діб	1	48,9
	28	88,6

Проведеними випробуваннями встановлено, що використання надшвидкотверднучих портландцементних композицій забезпечує одержання бетонів на їх основі з необхідною передавальною міцністю після теплової обробки за скороченим низькотемпературним режимом термообробки. Використання модифікованих високоміцних бетонів дає змогу скоротити час витримування та знизити температуру обробки пустотілих попередньо напружених плит перекриття, що забезпечує підвищення оборотності технологічних ліній та зниження енергопотреб при виготовленні збірних залізобетонних виробів.

Акт підписали:

Начальник управління з якості
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

 Горпинко О.Ф.

Начальник лабораторії
ДП «Спецзалізобетон»

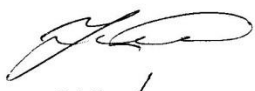
 Курцеба Л.О.

Представники Національного університету «Львівська політехніка»

Професор, д.т.н.

 Саницький М.А.

Доцент, к.т.н.

 Марущак У.Д.

Аспірант

 Олевич Ю.В.



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор ТзОВ «Волинська
мостобудівельна компанія»

Мандзій М.Я.

5.06.2018р.

А К Т

про впровадження високофункціонального дрібнозернистого бетону на основі
надшвидкотверднучого портландцементу

Ми, що нижче підписалися, представник ТзОВ «Волинська мостобудівельна компанія» виконроб Мателега В.І. та представники Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., професор Саницький М.А., к.т.н., докторант Марущак У.Д., аспірант Олевич Ю.В. склали даний акт про те, що у період травень 2018 року проведено впровадження високофункціональних бетонів на основі спеціального надшвидкотверднучого портландцементу СЕМ П/А-Q 52,5R у поєднанні з високоефективним суперпластифікатором полікарбоксилатного типу для ремонту мостів на автомобільній дорозі Львів – Пустомити – Меденичі км 17+200 до км 28+200. Загальний обсяг використаного дрібнозернистого бетону становив 5 м³.

Основними технологічними завданнями при проведенні ремонтних робіт були забезпечення однорідності та відсутності розшаровуваності бетонної суміші в умовах підвищеної рухливості, одержання необхідних ранньої, проектної міцності дрібнозернистих бетонів. У результаті випробувань встановлено, що міцність при стиску дрібнозернистих бетонів через 1, 2 та 28 діб становить 45,7; 65,6 та 83,8 МПа відповідно, а за показником питомої міцності дані бетони відносяться до композитів з швидким наростанням міцності ($f_{cm1}/f_{cm28}=0,54$; $f_{cm2}/f_{cm28}=0,78$).

Застосування наномодифікованих надшвидкотверднучих цементних композицій дозволило одержати однорідні високотехнологічні бетонні суміші, бетони з швидким наростанням міцності та регламентованою проектною міцністю, що забезпечило високу якість проведення ремонтних робіт.

Акт підписали:

Представник ТзОВ «Волинська мостобудівельна компанія»

Виконроб

Мателега В.І.

Представники Національного університету «Львівська політехніка»

Професор, д.т.н.

Саницький М.А.

Докторант, к.т.н.

Марущак У.Д.

Аспірант

Олевич Ю.В.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи молодшого наукового співробітника кафедри будівельного виробництва
Олевича Юрія Володимировича
на тему **“Надшвидкотверднучі портландцементні композиції та модифіковані високоміцні бетони на їх основі”**

Нами, головою науково-методичної комісії спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія», к.т.н., доцентом Холодом П.Ф., завідувачем кафедри будівельного виробництва, д.т.н., професором Саницьким М.А. складено даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Олевича Ю.В. впровадженні в навчальний процес на кафедрі будівельного виробництва, зокрема

- в курсі «Інноваційні технології виготовлення сучасних будівельних матеріалів і виробів» (розділ «Загальні принципи побудови сучасних композиційних матеріалів»), що викладається для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізації «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів» використовуються результати дисертаційної роботи щодо принципів побудови швидкотверднучих високоміцних композитів з покращеними експлуатаційними характеристиками для ефективних технологій залізобетонних виробів;

- в курсі «Енерго- та ресурсоощадні технології у будівництві» (розділ «Ресурсоощадні технології при виробництві бетону»), що викладається для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» використовуються результати дисертаційної роботи щодо створення мало- та безпрогрівних технологій залізобетонних виробів з використанням швидкотверднучих високоміцних бетонів.

Голова науково-методичної комісії
спеціальності 192 «Будівництво та
цивільна інженерія», к.т.н., доцент

Холод П.Ф.

Завідувач кафедри будівельного
виробництва, д.т.н., професор

Саницький М.А.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА*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.

2. Саницький М. А., Марущак У. Д., Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції для високофункціональних бетонів // Будівельні матеріали і вироби. 2018. № 3–4. С. 3639. ISSN 2413-9890.

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.

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.

Патенти України на корисну модель:

6. Пат. №121367 Україна, Зв'язуюче / М. А. Саницький, У. Д. Марущак, О. Р. Позняк, І. І. Кіракевич, Ю. В. Олевич. – u201612966; заявл. 10.01.2017; опубл. 11.12.2017; №23.

Матеріали і тези міжнародних та всеукраїнських конференцій:

7. Эффективні швидкотверднучі бетони для монолітного та дорожнього будівництва / У. Д. Марущак, 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.

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.

9. Marushchak U., Sanytsky M., Olevych Y. Effects of elevated temperatures on the properties of nanomodified rapid hardening concretes / U. Marushchak, // 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.

10. Саницький М. А., Марущак 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.

11. Марущак 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 р., Тернопіль, Україна. Т. 1. 2017. С. 138.

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 р., Одеса, Україна. 2018. С. 112.

13. Nanomodified composites based on the extra rapid hardening Portland cement / M. A. Sanytsky, U. D. Marushchak, Y. V. Olevych // International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Nano-2018), 27–30 August 2018. Kyiv, Ukraine. P. 406.

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 fur Baustoffkunde. 12–14 September 2018. Bauhaus-Universitat Weimar. (Bundesrepublik Deutschland). 2018. P. 905–912.

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

Міжнародній науково-практичній конференції “Ефективні технологічні рішення в будівництві з використанням бетонів нового покоління” (Харків, 2015) – заочна участь;

Міжнародній науково-технічній конференції “Еко-комфорт” (Львів, 2016) – очна участь;

XIII Міжнародній науково-практичній конференції “Budownictwo o zoptymalizowanym potenciale energetycznym” (Ченстохова, Польща, 2016) – заочна участь;

VI Міжнародній конференції “Геодезія, архітектура та будівництво 2016” (GAC-2016) (Львів, 2016) – очна участь;

6-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті” (Харків, 2017) – заочна участь;

VI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій” (Тернопіль, 2017) – заочна участь;

Міжнародній конференції “Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій” (Одеса, 2018) – очна участь;

Міжнародній науково-практичній конференції “Наноматеріали і нанотехнології у виробництві будівельних матеріалів” (Київ, 2018) – заочна участь;

20 Internationale Baustofftagung (Веймар, Німеччина, 2018) – заочна участь.