

Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Гуняк Олексій Миколайович

УДК 691.328

ДИСЕРТАЦІЯ

**Високоміцні бетони транспортного призначення з підвищеною
довговічністю**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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



О.М. Гуняк

Науковий керівник Соболь Христина Степанівна,
доктор технічних наук, професор

Львів – 2019

АНОТАЦІЯ

Гуняк О. М. Високоміцні бетони транспортного призначення з підвищеною довговічністю. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступення кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2019.

Дисертаційна робота присвячена питанням підвищення довговічності високоміцних бетонів транспортного призначення шляхом системного поєднання пуцоланових полідисперсних компонентів, суперпластифікатора та повітровтягувальної добавки для покращення їх мікро- та мезоструктури. Встановлена багатофункціональна роль полідисперсного цеолітового компоненту, що полягає в оптимізації гранулометричного складу бетону на мезоструктурному рівні, формуванні щільної однорідної мікроструктури цементної матриці, а також в створенні внутрішнього резерву води для запобігання самообезводненню бетону. Розроблено та оптимізовано за критеріями міцності склади цементних бетонів для транспортного будівництва з використанням пористих пуцоланічних мінеральних компонентів та доведена їх ефективність у здійсненні функції внутрішнього догляду. Досліджено їх вплив на фізико-механічні властивості, тріщиностійкість та показники довговічності бетонів на основі сумішей різної рухливості. Проведено дослідно-промислове впровадження розроблених високоміцних бетонів транспортного призначення та обґрунтовано їх техніко-економічну ефективність.

Ключові слова: високоміцні бетони, полідисперсні пуцоланові компоненти, внутрішній догляд, довговічність бетонів транспортного призначення, будівельно-експлуатаційні властивості.

ABSTRACT

Hunyak O. M. High-strength concrete with increased durability for transportation construction. – On the rights of the manuscript.

Thesis for the candidate degree of engineering science (Doctor of Philosophy) in specialty 05.23.05 - Building Materials and Products. - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The thesis is devoted to the development of high-strength concrete with the enhanced durability for highway engineering. The incorporation of both pozzolanic polydisperse components and chemical admixtures of plasticizing and air-entraining action allows to obtain the improved meso- and microstructure of concrete.

The role of particle size distribution, chemical composition and structure of zeolitic component in the realization of its properties as a porous pozzolanic mineral additive has been shown. It has been established that the polydisperse zeolitic component is characterized by higher activity in comparison with the polydisperse perlitic component as well as the pozzolanic activity coefficient of polydisperse mineral components exceeds fine-dispersed ones. The polydispersity of zeolitic component also provides the optimization of particle size distribution at the mesostructure level of concrete by compensating the absence of grains in the range of 60-160 μm .

The formation of dense, fine-porous and fine-crystalline structure of cement paste has been confirmed. It is provided by the presence of fibrous needle-like calcium hydrosilicates CSH (I), which lead to colmatation of pores and reinforcement of contact zones. It has been proved that high strength of fine-grained concrete containing polydisperse zeolitic component is achieved due to its active role in the formation of both microstructure and mesostructure of the hardening system.

Natural polydisperse porous mineral component with unique properties such as zeolitic tuff can be also used for incorporation of internal curing water with minor or without detrimental effect on the mechanical properties of high-strength concrete. It was found that the internal relative humidity of concrete with addition of

polydisperse zeolitic component is 10% higher compared to the control concrete after 14 days of curing in dry conditions. The addition of polydisperse zeolitic component mitigates self-dessication of concrete and prolongs the hydration of cement.

The mix proportions of concrete incorporating porous polydisperse mineral component and chemical admixtures for highway engineering have been designed and optimized. Such complex modification leads to 7-15% higher bending strength, better resistance to freeze-thaw cycles (F150), higher fracture energy ($\Delta G_F = 67 \text{ J/m}^2$) and lower carbonation depth ($h=2 \text{ mm}$) of the optimized concrete composition. The addition of both zeolitic component and air-entraining agent results in 5,4 times lower shrinkage deformation of concrete. The water penetration depth of hardened concrete is 3,5 mm, therefore it can be attributed to waterproof. Total porosity and average pore diameter are reduced by 37 and 33% respectively for concrete with the addition of polydisperse zeolitic component. The combination of air-entraining agent together with polydisperse zeolitic component and superplasticizer results in optimal content and uniform distribution of fine air bubbles, which act as stress dampers, contributing to slow down both the process of microcrack formation in pre-peak stage ($G_i=247 \text{ J/m}^2$) and crack propagation in the post-peak stage ($W_L=295 \text{ J/m}^2$).

The pilot industrial application of the developed high-strength concrete for highway engineering was carried out constructing concrete pavement and manufacturing concrete interlocking blocks. The economic efficiency of the industrial application of high-strength concrete is UAH 92 000 per 1000 m² of pavement. The estimated annual economic impact of reducing the manufacturing cost of concrete interlocking blocks is UAH 656 640.

Keywords: high-strength concrete, polydisperse pozzolanic components, internal curing, the durability of concrete for highway engineering, concrete structural properties.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Markiv, T., Sobol, K., Petrovska, N., & Hunyak, O. The Effect of Porous Pozzolanic Polydisperse Mineral Components on Properties of Concrete. In International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów. 2020. Springer, Cham. P. 275-282. (Scopus).

2. Hunyak, O., Sobol, K., Markiv, T., & Bidos, V. The effect of natural pozzolans on properties of vibropressed interlocking concrete blocks in different curing conditions. Production Engineering Archives, 2019. 22(22), P. 3-6. DOI:10.30657/pea.2019.22.01 (BazTech).

3. Гуняк О. М. Пуцоланічні добавки для портландцементів транспортного будівництва. Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. — № 877. — С. 88–93. (Index Copernicus).

4. Sobol, K., Markiv, T., Hunyak, O. Effect of mineral additives on structure and properties of concrete for pavements. Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering. 2017. Vol.12 №2. – P.95-100. (BazTech).

Статті у наукових фахових виданнях України:

5. Шевчук Г. Я., Гуняк О. М., Гнип О. П., Мішин В. М. Розробка бетонів для дорожніх покриттів підвищеної довговічності з використанням добавок полікарбосилатного типу. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. Вип. 46. С. 371–376.

6. Markiv T., Huniak O., Sobol Kh. Optimization of concrete composition with addition of zeolitic tuff. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. 2014. № 781. С. 116–120.

7. Гуняк О. М., Соболев Х. С., Марків Т. Є. Оптимізація складів спеціальних цеолітовмісних портландцементів. Містобудування та територіальне планування. 2014. № 54. С. 139–143.

8. Марків Т. Є., Соболев Х. С., Бліхарський З. Я., Гуняк О. М. Дослідження будівельних розчинів з добавкою цеолітів. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2015. № 823. С. 222–228.

9. Солодкий С. Й., Гуняк О. М., Марків Т. Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 98. С. 247–255.

Наукові праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:

10. Solodkyu, S., Markiv, T., Sobol, K., Hunyak, O. Fracture properties of high-strength concrete obtained by direct modification of structure. In MATEC Web of Conferences. Vol. 116, p. 01016 -2017. EDP Sciences. eISSN: 2261-236X (SCOPUS)

11. Markiv T., Hunyak O., Sobol K., Blikharskyu Z. The effect of active mineral additives on properties of HSC in different hardening conditions // 20. Internationale Baustofftagung ibausil, Weimar, 12-14 September 2018. – 2018. – P. 851–857.

12. Markiv T., Sobol K., Hunyak O., Panek R., Franus M. The effect of zeolitic tuff on the properties of concretes // The 10th International Conference on the Occurrence, Properties, and Utilization of Natural Zeolites (24th to 29th of June 2018 in Cracow, Poland). – 2018. – P. 155–156.

13. Солодкий С.Й., Марків Т.Є., Гуняк О.М., Гостинецький Б.А. Вплив органо-мінеральних добавок на властивості високоміцних бетонів // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Харків: ХНУСА. -2015. - С. 29-34.

14. Марків Т.Є., Соболев Х.С., Гуняк О.М. Цеолітовмісні цементи для бетонів транспортного призначення. Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів. - 2016, - С.97-99.

15. Hunyak O., Markiv T., Sobol K. Effect of mineral additives on structure and properties of concretes for pavements // XVI. International Scientific Conference

Košice-Lviv-Rzeszów “Current Issues of Civil and Environmental Engineering
Košice-Lviv-Rzeszów”. Book of abstracts. Kosice, 2017. – P. 21.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	17
1.1 Особливості технології високоміцних бетонів транспортного призначення.....	17
1.2 Шляхи підвищення довговічності високоміцних бетонів	25
1.3 Роль хімічних та активних мінеральних добавок у формуванні експлуатаційних властивостей бетонів транспортного призначення.....	30
1.4 Теоретичні передумови та наукова гіпотеза дослідження	37
Висновки до розділу 1.....	41
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	42
2.1 Вихідні матеріали.....	42
2.2 Методи досліджень.....	49
Висновки до розділу 2.....	54
РОЗДІЛ 3 ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МЕЗО- ТА МІКРОСТРУКТУРИ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПУЦОЛАНОВИХ ПОРИСТИХ КОМПОНЕНТІВ РІЗНОЇ ДИСПЕРСНОСТІ.....	56
3.1 Вплив полідисперсних компонентів на мезоструктуру бетонів	56
3.2 Дослідження активності мінеральних компонентів різної дисперсності.....	59
3.3 Вплив мінеральних компонентів різної дисперсності на властивості цементу.....	63

3.4 Вплив полідисперсних мінеральних компонентів на процеси гідратації і мікроструктуру цементної матриці..	67
Висновки до розділу 3.....	75
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СКЛАДІВ ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ З ФУНКЦІЄЮ ВНУТРІШНЬОГО ДОГЛЯДУ.....	
4.1 Оптимізація складу бетонів транспортного призначення за критеріями міцності	77
4.2 Дослідження високоміцних бетонів на основі пластичних бетонних сумішей	84
4.3 Роль внутрішнього догляду у формуванні будівельно-експлуатаційних властивостей високоміцних бетонів....	93
4.4 Фізико-механічні та будівельно-експлуатаційні властивості бетонів на основі малорухливих сумішей....	103
Висновки до розділу 4.....	111
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	
5.1 Виробничі випробування виробів бетонних тротуарних неармованих	113
5.2 Економічна ефективність влаштування дорожнього покриття з використанням розроблених бетонів.....	122
5.3 Промислова апробація високоміцних бетонів для дорожніх покриттів.....	127
Висновки до розділу 5.....	128
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	130
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	134
ДОДАТКИ.....	149

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

В/Ц – водоцементне відношення;

f_{ctb} – міцність на розтяг при згині, МПа;

f_{cm} – міцність при стиску, МПа;

$K_{па}$ – коефіцієнт пуцоланічної активності;

$K_{зг}^n$ – коефіцієнт корозійної стійкості у віці n діб;

LWA – пористий компонент;

SCM – додаткові цементуючі матеріали;

ЦПК – цеолітовий полідисперсний компонент;

ППК – перлітовий полідисперсний компонент;

ЦТК – цеолітовий тонкодисперсний компонент;

ПТК – перлітовий тонкодисперсний компонент;

OD – «oven dry», висушений до постійної маси;

SSD – «saturated surface dry», вологий з сухою поверхнею;

ПВПГП – пісок з відсівів дроблення гірських порід;

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток транспортної інфраструктури передбачає будівництво сучасних цементобетонних автомобільних і аеродромних покриттів з високими експлуатаційними характеристиками і є актуальним завданням для інтеграції України в європейську транспортну систему. Значний приріст інтенсивності і вантажонапруженості руху в останні роки вказує на необхідність застосування у дорожніх покриттях матеріалу із підвищеними механічними характеристиками – високоміцного бетону. Його використання надає низку вагомих переваг: зниження витрати компонентів за рахунок зменшення товщини конструкцій, підвищення ранньої міцності, щільності та зносостійкості бетону. Проте досягнення високих фізико-механічних характеристик цементобетону нерозривно пов'язано із зниженням водоцементного відношення і, як наслідок, з розвитком самообезводнення, що викликає зростання деформацій усадки цементного каменю, активізує мікротріщиноутворення, підвищує пористість і проникність бетону та значно знижує його експлуатаційні властивості та термін служби. У зв'язку з цим виникає проблема підвищення довговічності високоміцних бетонів транспортного призначення, одним із шляхів вирішення якої є використання внутрішнього догляду за бетоном. Він спрямований на забезпечення умов для розвитку процесів гідратації і структуроутворення цементного каменю за рахунок введення до складу бетону пористих компонентів, що регулюють водовміст.

Узагальнення результатів досліджень в області технології бетонів свідчить, що такі показники довговічності, як водонепроникність, морозо- і хімічна стійкість, а також тріщиностійкість безпосередньо пов'язані з поровою структурою бетонів. Тому нові прийоми і способи регулювання характеру пористості бетону на мікро- та мезоструктурному рівнях відкривають додаткові можливості підвищення його довговічності. Одним із напрямків впорядкування порової структури бетону є оптимізація розподілення зерен за розмірами для одержання неперервного гранулометричного складу за рахунок використання

компенсуючих дисперсних компонентів.

Отже, розроблення і використання високоміцних бетонів транспортного призначення з впорядкованою поровою структурою та регульованим внутрішнім вологовмістом, що забезпечує підвищення будівельно-експлуатаційних властивостей та довговічності бетону, є актуальним завданням бетонознавства в напрямку реалізації національної транспортної стратегії України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Тема дисертації є складовою частиною науково-дослідної роботи кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка» і виконувалась в межах теми «Розробка ефективних технологій і матеріалів для будівництва та ремонту дорожніх одягів» (номер держреєстрації 0112U003779).

Мета роботи та завдання дослідження. Розроблення високоміцних цементобетонів транспортного призначення з покращеними мікро- та мезоструктурою та підвищеною довговічністю шляхом модифікування пуцолановими полідисперсними компонентами та добавками пластифікувально-повітровтягувальної дії.

Для досягнення поставленої мети здобувачем вирішувались такі завдання:

- провести критичний аналіз теоретичних уявлень та експериментальних даних щодо шляхів підвищення міцності та довговічності бетонів транспортного призначення;
- встановити особливості впливу пуцоланічних мінеральних компонентів різної дисперсності на мезоструктуру бетонів;
- порівняти пуцоланову активність пористих мінеральних компонентів різної дисперсності та дослідити ефективність їх використання як додаткових цементуючих матеріалів;
- комплексом методів фізико-хімічного аналізу встановити характер формування мікроструктури бетонів з вмістом пуцоланових компонентів та пластфікувальних і повітровтягувальних добавок;

- розробити та оптимізувати за критеріями міцності склади цементних бетонів на основі сумішей різної рухливості для транспортного будівництва із вмістом полідисперсних пористих пуцоланічних добавок та визначити їх фізико-механічні та будівельно-експлуатаційні властивості;

- встановити можливість використання пористих полідисперсних компонентів для забезпечення внутрішнього догляду за бетонами та нівелювання негативного ефекту самообезводнення;

- провести дослідно-промислове впровадження розроблених високоміцних бетонів транспортного призначення та надати техніко-економічне обґрунтування їх ефективності.

Об'єкт дослідження – процеси спрямованого регулювання мікро- та мезоструктури високоміцних бетонів транспортного призначення та особливості формування комплексу їх фізико-механічних та будівельно-експлуатаційних властивостей.

Предмет дослідження – високоміцні бетони транспортного призначення з покращеною мікро- і мезоструктурою та підвищеними показниками тріщиностійкості та довговічності, отримані шляхом введення модифікувальних полідисперсних компонентів та хімічних добавок.

Методи дослідження. Експериментальні результати отримані із використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу, зокрема лазерної гранулометрії, ртутної порометрії, комп'ютерної мікротомографії, рентгенівської дифрактометрії, електронної мікроскопії з мікрозондовим аналізом. Визначення фізичних, фізико-механічних та будівельно-експлуатаційних властивостей матеріалів і виробів здійснювали згідно з чинною нормативно-технічною документацією та загальноприйнятими методиками. Оптимізацію складів високоміцних бетонів проведено із застосуванням експериментально-статистичних методів планування експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів:

- теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена

можливість одержання високоміцних бетонів транспортного призначення та регулювання їх властивостей шляхом введення полідисперсного цеолітового компоненту та хімічних добавок пластифікувально-повітровтягувальної дії;

- - вперше встановлена можливість використання полідисперсного цеолітового компонента для реалізації внутрішнього догляду за бетоном, особливо за низьких значень В/Ц та малій товщині конструкцій шляхом створення внутрішнього резерву води, іммобілізованої в процесі перемішування внутрішньою структурою цеоліту з численними мікропорами, каналами і пустотами, що сприяє розвитку процесів гідратації та структуроутворення, запобігає самообезводненню бетону;

- - встановлена багатофункціональна роль полідисперсного цеолітового компоненту, який оптимізує розподілення зерен за розміром в напрямку досягнення неперервного гранулометричного складу та забезпечує формування компактної мезоструктури бетону; одночасно є пуцоланічною добавкою, що відіграє активну роль у формуванні мікроструктури, а також, завдяки розвинутій внутрішньокристалічній системі порових каналів, адсорбує воду, виділення якої не супроводжується структурними змінами та об'ємними деформаціями цементної матриці та використовується для подальшої гідратації;

- - розроблені наукові засади ролі цеоліту різної дисперсності в процесах структуроутворення для одержання щільної однорідної структури цементної матриці з покращеними структурно-механічними властивостями, насиченої субмікрокристалічними голчасто-волокнистими низькоосновними гідросилікатами кальцію CSH (I);

- - отримало подальший розвиток дослідження закономірностей формування упорядкованого капілярного простору бетону з регульованим водно-повітряним співвідношенням за рахунок утворення щільної закритої дрібнопористої структури цементної матриці та рівномірно розподіленим в ній втягнутим повітрям, що досягається внаслідок синергічної взаємодії цеолітового полідисперсного компоненту і добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії, та забезпечує підвищення непроникності бетону, його стійкість до корозійних та

несприятливих температурно-вологісних впливів, гальмування процесів мікротріщиноутворення та створення опору руху магістральних тріщин, підвищуючи довговічність бетону.

Практичне значення одержаних результатів

- розроблено бетони транспортного призначення з впорядкованою поровою структурою, підвищеними показниками довговічності (марка за морозостійкістю не менше F200, коефіцієнт корозійної стійкості $K_c^{зг}=1,23$, глибина проникнення води $WPD=3,5$ мм), тріщиностійкості (загальні питомі ефективні витрати енергії на статичне руйнування $G_F=657,37$ Дж/м²) та міцності на розтяг при згині ($f_{ctb}=10,1$ МПа), а також із компенсованим негативним впливом самообезводнення бетону за низьких значень водоцементного відношення;

- проведено дослідно-промислову апробацію розроблених бетонів під час влаштування цементобетонного покриття проїздів на території ТОВ «Дрогобицький бетонний завод». Результати випробувань підтвердили досягнення підвищених характеристик міцності та довговічності за умови забезпечення необхідної рухливості бетонної суміші;

- впроваджені технологічні рішення з використанням полідисперсного цеолітового компоненту та хімічних добавок у складі бетону при виготовленні виробів бетонних тротуарних неармованих на ПП «Застава» (м. Червоноград Львівської обл.);

- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» у викладанні дисциплін «Фізико-хімічна механіка дорожньо-будівельних матеріалів», «Виробничі підприємства транспортного будівництва та дорожньо-будівельні матеріали» для бакалаврів і магістрів за освітньою програмою «Автомобільні дороги та аеродроми».

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень, обробленні та інтерпретації одержаних даних. Постановка завдання, планування програми досліджень,

формулювання основних положень та висновків здійснювалося під керівництвом наукового керівника – д.т.н., проф. Соболев Х.С., за наукового консультування к.т.н., доцента Марківа Т.Є.

Результати наукових досліджень, представлені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. В роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1] – дослідження впливу дисперсності пуцоланічних компонентів на фізико-механічні властивості бетонів та особливості внутрішнього догляду; [2] – вивчення властивостей виробів бетонних тротуарних неармованих у різних умовах тверднення; [3] - дослідження впливу пуцоланічних добавок на технологічні властивості модифікованих бетонних сумішей; [4] - аналіз особливостей використання дисперсних компонентів у бетонах; [5, 15] - дослідження впливу хімічних добавок на фізико-механічні та експлуатаційні властивості бетонів; [6] – проведення факторного експерименту; [7, 11, 14] – дослідження фізико-механічних характеристик цементів з добавками; [8] – вивчення впливу цеолітового полідисперсного компоненту на технологічні властивості модифікованих цементних розчинів; [9, 10, 13] – дослідження тріщиностійкості та міцності модифікованих бетонів; [12] – вивчення впливу цеолітового компоненту на експлуатаційні характеристики цементобетонів.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 15 наукових праць, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 3 – у наукових періодичних виданнях інших держав, 1 – у виданні, що включене до міжнародної наукометричної бази даних Scopus і 6 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 136 найменувань та 3 додатків. Робота викладена на 159 сторінках, у тому числі 134 сторінки основного тексту, 32 таблиці, 48 рисунків, 15 сторінок списку використаних джерел та 10 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Особливості технології високоміцних бетонів транспортного призначення

Невпинне зростання міцності бетону є однією з найпомітніших тенденцій останніх десятиліть у будівництві [7, 26]. Використання високоміцних бетонів (HSC – high strength concrete) дає ряд вагомих переваг: зниження витрати матеріалів, густоти армування, зменшення розмірів опалубки, підвищення ранньої міцності, щільності та зносостійкості конструкцій та виробів на їх основі.

Відомо, що існують декілька точок зору щодо визначення меж між звичайними і високоміцними бетонами [41, 89]. Згідно з першою, високоміцними слід вважати бетони, границя міцності яких більше, ніж у цементу яких в них застосовується, а другою - це бетони, міцність яких регламентована нормативними документами.

За формулюванням [124] Американського інституту бетону (ACI), до високоміцних відносять бетони міцність яких вища 6000 psi, тобто більше 41,4 МПа. Відповідно до діючої нормативної документації [4] в Україні високоміцним вважається бетон, відповідає класу по міцності C50/60, тобто середня міцність бетону, що визначається на зразках-кубах з гранню 150 мм, повинна становити 60 МПа.

Високоміцні бетони з підвищеною довговічністю є перспективним матеріалом для застосування в армованих та попередньо напружених конструкціях, особливо для мостових балок. Завдяки підвищеній міцності бетону можливо зменшити їх кількість, збільшити прольоти моста, знизити товщину конструктивних елементів та підвищити довговічність мосту [66, 85].

Для бетонів споруд транспортного призначення – покрить доріг та

аеродромів, дорожніх виробів, штучних споруд – у більшості випадків ставляться вищі вимоги до довговічності, що пов'язано з впливом навколишнього середовища [59, 61]. Під час експлуатації цементний бетон транспортного призначення піддається статичним і динамічним навантаженням, поперемінному зволоженню і висушуванню, заморожуванню і відтаванню у поєднанні з агресивним впливом протижелезних реагентів та ґрунтових вод. Стандарт EN 206-1 [119] передбачає 18 класів впливу за різних умов роботи бетону, в залежності від яких до складу бетонів встановлені граничні вимоги. Вони включають: вибір компонентів, максимальне водоцементне співвідношення В/Ц, вміст цементу та мінімальний клас міцності при стиску, а для дорожніх бетонів – об'єм втягнутого повітря та вимоги до якості заповнювачів.

Для отримання високоміцних бетонів слід використовувати високоактивні за міцністю на розтяг при згині портландцементи. Згідно ДСТУ Б.В.2.7-46-2010 для бетону дорожніх і аеродромних покриттів повинен застосовуватися цемент, що виготовляється на основі клінкеру нормованого складу зі вмістом трикальцієвого алюмінату (C_3A) у кількості не більше 8% по масі. Для бетонів використовуються наступні види цементу: ПЦ І-400-Н, ПЦ І-500-Н, а також ПЦ ІІ/А-Ш-400-Н і ПЦ ІІ/А-Ш-500-Н при застосуванні добавки гранульованого шлаку в кількості не більше 15%.

В останні роки за кордоном все частіше застосовують високоміцні бетони (клас за міцністю на стиск $C_{50/60}$ і вище). При одній і тій же товщині плити застосування високоміцних бетонів дозволить суттєво підвищити строк служби цементобетонного покриття [86]. Кілька відносно нових концепцій проектування жорстких покриттів із застосуванням високоміцних бетонів у Сполучених Штатах та Європі - це двошарове укладання (wet-on-wet) і тонкі вайт-топпінги (Thin Whitetopping), влаштовані методом зрошування з існуючим покриттям [125]. Такі конструктивні рішення є ефективними, оскільки бетон верхньої зони жорсткого покриття потребує підвищених характеристик міцності та довговічності, і використання вартісного матеріалу в якості довговічного

захисного шару для більш «вразливого» і дешевшого нижнього, є економічно ефективним та доцільним.

У бетонних покриттях доріг і аеродромів основними розрахунковими навантаженнями є згинальні, оскільки покриття працює як плита на пружній основі. Розтягуючі напруження при експлуатації дорожніх бетонів виникають при проїзді транспорту, при гальмуванні і наборі швидкості а також стоянці. С.М. Толмачов та ін. [51] стверджують що в останні роки підвищенню міцності бетону на розтяг при згині дослідники приділяють мало уваги, тому саме такий напрям є актуальним.

За твердженням І.П. Гамеляка [9], значення В/Ц для високоміцних бетонів при активності цементу на розтяг при згині $\geq 6,0$ МПа (М500) має бути $\leq 0,33$. А це в свою чергу призводить до того, що при сталій водопотребі для забезпечення необхідної легковкладальності бетонна суміш для високоміцного бетону вирізняється значно вищим вмістом цементу (більше 400 кг/м^3). Тому, для одержання високоміцних дорожніх бетонів слід застосовувати ефективні комплекси суперпластифікаторів з водоредукуючим ефектом більше 25 %, що надасть змогу значно зменшити витрату цементу та В/Ц і забезпечить зменшення капілярної пористості та підвищення морозостійкості і довговічності цементобетону.

Бетон для дорожніх покриттів значно відрізняється від конструктивних за своїми фізико-технічними показниками, що зумовлено «екстремальними» умовами експлуатації [19, 20]. Тому бетон для будівництва дорожніх покриттів повинен відрізнятися підвищеною зносостійкістю, механічною міцністю, тріщиностійкістю, стійкістю до впливів вологи і перепадів температур [6, 55].

Загалом, залежно від призначення дорожній бетон поділяють на три види: для одношарових дорожніх покриттів і верхнього шару двошарових покриттів, для нижнього шару двошарових покриттів і для основ капітальних удосконалених доріг.

Для одношарових і верхнього шару двошарових покриттів вимоги до бетону та його складників ставляться максимальні, так як на бетон діятиме не

тільки навантаження зі сторони транспортного потоку, але й вплив зовнішнього середовища, через велику площу відкритої поверхні. Це призводить до пришвидшеного зносу і руйнування. Проект ДСТУ 8858:2019 «Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови» визначає наступні марки бетону для верхнього шару покриття: за міцністю при стиску – від C12/15 до C50/60; за міцністю на розтяг при згині – від $V_{tb}2,0$ до $V_{tb}6,0$; за морозостійкістю – від F200 до F400; за водонепроникністю – від W4 до W12; за стираністю – від G1 до G3. Водопоглинання повинне бути менше 4% за масою.

При влаштуванні цементобетонних дорожніх покриттів важливо забезпечити достатнє ущільнення бетонної суміші, з цією метою легковкладальність призначається відповідно до устаткування для ущільнення. При використанні бетоноукладачів на колісно-рейковому ході – $OK \leq 2$ см ($Ж \leq 8$ с); бетоноукладачів з ковзним опалубленням – $OK \leq 2 \dots 4$ см ($Ж \leq 5 \dots 10$ с); площинних вібраторів і віброрейок – $OK \leq 4$ см; віброкотків – $Ж \leq 30$ с.

Класи дорожнього бетону за міцністю на стиск – C8/10...C50/60, на розтяг при згині – $V_{tb}1,2 \dots V_{tb}6,0$. Міцність і морозостійкість бетону призначають у залежності від категорії дороги, шару покриття і кліматичних умов служби, цими ж факторами визначається і необхідне В/Ц.

Морозостійкість - один із найважливіших показників якості бетону транспортного призначення, забезпечення якого особливо важливо для України у зв'язку з її географічним положенням і кліматичними умовами. Як відомо [61, 15], для видалення ожеледі з поверхні дороги використовують хімічно агресивні для будматеріалів реагенти. Морозні пошкодження захисного шару, бетон якого працює в таких складних умовах, збільшують його проникність і погіршують захисні властивості по відношенню до арматури.

Марки бетону по морозостійкості призначають відповідно до кліматичних умов району будівництва. Для забезпечення необхідної морозостійкості бетону і його стійкості проти спільної дії хлористих солей, що застосовують для боротьби з ожеледицею, і заморожування бетону при негативних температурах, водоцементне відношення слід приймати для

одношарових і верхнього шару двошарових покриттів не більше 0,5, для нижнього шару двошарових покриттів - не більше 0,6, для основ це значення не нормується.

Як дрібні заповнювачі у дорожніх бетонах рекомендується застосовувати природні або штучні піски з модулем крупності більше 2. Частка глинистих і пилюватих частинок у природному піску має не перевищувати 2%, у штучному – не більше 5%. Міцність щебеню з вивержених порід, що застосовується для бетону одношарових і верхнього шару двошарових покриттів повинна бути не менше 120 МПа, з осадових порід – не менше 100 МПа. Максимальна крупність зерен щебеню для бетону дорожніх виробів і елементів облаштування доріг, мінімальний лінійний розмір яких не менше 30 мм – 10мм, верхнього шару двошарових покриттів – 20 мм, для одношарових і нижнього шару двошарових покриттів – 40 мм, для бетону основ – 70 мм.

Також важливе значення для якості бетону має морозостійкість щебеню. Вибір великого заповнювача за морозостійкістю залежить від призначення дорожнього бетону і кліматичних умов місцевості. Для бетону верхнього шару дорожніх покриттів, а також дорожніх виробів і елементів облаштування доріг марка щебеню за морозостійкістю повинна бути не менше 200 і для основ - не менше 100. Щебінь і гравій застосовують для дорожнього бетону тільки після промивки, вміст глинистих домішок в заповнювачі має становити не більше 1%, а органічні домішки не допускаються. Щебінь для верхнього шару дорожнього покриття повинен виготовлятися з гірських порід з межею міцності при стисненні у водонасиченому стані не менше 117,0 Мн/м² (1200 кг/см²) для вивержених і 78,4 Мн/м² (800 кг/см²) - для осадових порід; при випробуванні щебеню в спеціальному поличковому барабані стиранисть повинна бути не більше 25 % за масою для вивержених і 40% - для осадових порід. Крупний заповнювач для нижнього шару дорожніх покриттів може бути отриманий з гірських порід з межею міцності при стисненні відповідно 78,4 і 58,8 Мн/м² (800 і 600 кг/см²).

Рівень мікротріщиноутворення є важливим показником, оскільки дорожньо-будівельні роботи проводяться при достатньо несприятливих умовах,

тому ризик виникнення мікроскопічних пошкоджень структури, які викликаються спільним впливом усадкових і температурних напружень досить великий протягом всього процесу твердіння матеріалу. На відміну від інших широко розповсюджених будівельних матеріалів, бетон є квазікрихким, а це означає, що він є одночасно крихким (як скло) і пружно-пластичним (як сталь) [75]. Застосування критеріїв лінійної механіки та енергії руйнування є надійними механізмами для прогнозування та запобігання передчасної відмови бетонних конструкцій [22]. Проте чинні стандарти не передбачають нормування характеристик тріщиностійкості для бетонів транспортного призначення. С.Й. Солодкий [45] пропонує оцінювати тріщиностійкість за в'язкістю руйнування (критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень) та загальними енерговитратами на деформування і статичне руйнування бетону при триточковому згині з ініційованою тріщиною.

Поверхні бетонних покриттів доріг та аеродромів піддаються впливу абразивних сил шляхом стрируючої або ковзаючої дії шин транспортних засобів [68]. Очевидно, що слабка здатність бетону опиратися стиранню призводить до зменшення товщини бетонної плити та підвищеного пилоутворення на дорожньому покритті через утворення дрібнодисперсних частинок бетону. Зменшення товщини бетонних плит спричиняє збільшення напружень розтягу матеріалу, що призводить до тріщиноутворення та скорочує термін експлуатації бетону. Крім того, недостатня стійкість до стирання бетону може вплинути на шорсткість покриття.

До основних факторів, що впливають на стійкість до стирання бетону, відносять міцність бетону на стиск, тип та дозування заповнювача [95, 115], умови навколишнього середовища, використання додаткових цементуючих матеріалів [86, 114, 115], зокрема пуцоланічних добавок. Також на стійкість до стирання впливають такі важливі фактори, як обробка поверхні, догляд за бетоном та умови тверднення. Здатність опиратися стиранню та фізичній ерозії має важливе значення для бетону, що застосовується при будівництві водовідвідних споруд, дамб та мостових опор, де він буде піддаватися

абразивним впливам потоків води, льодоходам, селям [10]. Стираність дорожнього бетону значною мірою пов'язана з його міцністю при стиску. Л.Й. Дворкін [17] стверджує, що при використанні заповнювачів високої якості, бетон класу за міцністю не нижче В25 буде стійким до дії абразивних матеріалів.

Низка державних транспортних управлінь США (DOT) вимагають певний рівень (3-6 об.%) повітрязахоплення для мостових конструкцій, однак це призводить до нівелювання переваг HSC через зниження міцності бетону. Деякі дослідники ставлять під сумнів необхідність повітровтягування для високоміцних бетонів [97, 102], що пов'язано з технологічними особливостями його приготування та транспортування. Зокрема, автори [96, 115] вважають, що досягти марки F200 і більше можливо за рахунок правильного підбору компонентів високоміцного бетону і контролю його В/Ц відношення, без введення повітровтягувальної добавки.

Використання армування у конструкціях транспортного призначення викликає необхідність контролювати карбонізацію бетону. Як відомо [96, 104, 90], поровий розчин у бетоні, як правило, високолужний, із значеннями рН вище 12. У цьому високолужному середовищі навколо сталеві арматури формується шар захисної оксидної плівки, який підтримує її в пасивному стані. Вуглекислий газ у повітрі проникає в бетон і знижує рівень рН нижче 11, що робить бетон піддатливим для корозії армування і призводить до руйнування конструкції [4]. Цей процес, відомий як карбонізація, є головним чином явищем дифузії, а швидкість проникнення CO_2 залежить, в основному, від якості бетону та умов впливу. У цьому процесі CO_2 може реагувати з гідроксидом кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$, гідросилікатом кальцію C-S-H і негідратованим двокальцієвим C_2S і трикальцієвим C_3S силікатами [90].

Одним з варіантів радикального підвищення міцності бетонів є зменшення В/Ц за рахунок застосування жорстких та наджорстких бетонних сумішей. В такому випадку потрібно передбачати додаткові засоби і механізми силового та/або вібраційного впливу для їх ущільнення та формування [2, 30, 114]. Бетонна суміш для вібропресування являє собою незв'язну масу, з

випадковим орієнтуванням частинок заповнювача та їх агрегатів, покритих шаром цементного тіста, тому її лише умовно можна характеризувати в'язкістю та іншими реологічними характеристиками. Основними напрямками застосування таких сумішей є виготовлення тротуарних виробів, бортового каменю, водовідвідних лотків а також укочуваних цементобетонних покриттів.

Особливості бетонних сумішей для виготовлення вібропресованих виробів визначаються фізико-механічним впливом, що здійснюється на суміш у процесі формування. Бетонна суміш для вібропресування повинна мати знижений вміст води (близько 6...8%) і тому підвищену жорсткість. При вібропресуванні поряд із силовим ущільненням (тиск 0,07...0,1 МПа) відбувається переорієнтація частинок, а також тиксотропне розрідження цементного тіста, завдяки чому отримується щільна структура з низьким В/Ц (0,3...0,4) та відносно невисоким об'ємом цементного каменю (270...300 л), коефіцієнт розсуву зерен заповнювача близький до 1 [15, 16, 56].

В останні роки альтернативою для конструкцій дорожнього одягу, що сприймають великовагові навантаження є бетонні блоки мощення. Високоєфективні дорожні покриття з вібропресованих високоміцних бетонних фігурних елементів мощення (ФЕМ) дозволяють не тільки влаштувати благоустрій пішохідних зон та міських територій, а також промислових майданчиків, покриттів руліжних доріжок аеропортів та площадок доків і контейнерних портів [8, 98]. Покриття із штучних елементів мощення мають всі переваги цементобетонних покриттів і можуть легко бути відновлені при появі руйнувань чи необхідності аварійних ремонтів інженерних мереж.

В Україні вимоги до тротуарних виробів нормуються ДСТУ Б В.2.7-145:2008 «Вироби бетонні тротуарні неармовані. Технічні умови», що передбачає, зокрема, 3 класи бетону за міцністю: В25, В30 та В35. Водопоглинання виробів бетонних тротуарних неармованих (ВБТН) має бути не більше 6% за масою.

Загалом, у транспортному будівництві використовується широкий спектр цементобетонів і виробів на їх основі. Тому визначення показників міцності,

довговічності та тріщиностійкості бетонів для будівництва транспортних споруд дасть зрозуміти потенціал їх технологічної та експлуатаційної ефективності, а також спрогнозувати стабільність їх роботи в довгостроковій перспективі.

1.2 Шляхи підвищення довговічності високоміцних бетонів

При розв'язанні проблеми підвищення довговічності цементобетонну враховують взаємозв'язок властивостей вихідних матеріалів, складу бетонної суміші, структури і властивостей бетону, технологічних факторів, експлуатаційних і природньо-кліматичних впливів [13, 114].

На думку В.В. Чистякова та співавторів [58, 59], основними факторами, що викликають руйнування дорожніх бетонів є: вилуговування і вимивання поверхневого шару бетону, дія розчинів солей, температурні градієнти і циклічні механічні навантаження на поверхню бетону. Як правило, ці фактори впливають на бетон в комплексі. Одним із існуючих способів покращення властивостей бетонів для покриттів доріг є їх модифікація хімічними добавками. В Україні хімічні добавки застосовують майже у всіх сферах виробництва бетону, що сприяє появі нових технологій, реалізувати які без добавок було б просто неможливо.

Відомо [55, 75, 52], що процес руйнування цементобетону під дією зовнішніх чинників (навантаження, температурно-вологісні впливи, агресивне середовище) відбувається шляхом утворення та поширення в його структурі тріщин. Також, з використанням високоміцних бетонів та ущільненням структури зростає крихкий характер їх руйнування. Тому одним із найважливіших способів забезпечення довговічності цементних бетонів транспортного призначення є підвищення їх тріщиностійкості. Можливим напрямком вирішення даної проблеми є дисперсне армування бетону фіброю:

сталевою, поліпропіленовою, скловолоконною та базальтовою [46].

Важливе значення для стримування процесів розвитку та злиття мікротріщин має структура матриці в'язучого, зокрема наявність у ній неоднорідностей, таких як пори гелю, мікрокапіляри, поверхні поділу фаз [45]. Для підвищення в'язкості руйнування ефективним є модифікування бетонів активними мінеральними добавками, що дає змогу змінити морфологію гідратних фаз та забезпечити мікроармування контактних зон.

Сучасні дослідження в сфері бетонознавства, сконцентровані на продовження терміну служби споруд під загрозою хімічної корозії, передбачають три основні шляхи захисту від її агресивного впливу [33, 44, 34]. Це використання додаткових цементуючих матеріалів, виготовлення високоякісного непроникного бетону з низьким В/Ц співвідношенням та створення хімічно стійкого бар'єру на поверхні споруди. З погляду економічної доцільності та відповідності стратегії сталого розвитку, найвигіднішим є використання активних мінеральних добавок, зокрема пуцоланічної природи [31, 63, 35].

Загалом, довговічність бетонів, як інтегральний показник, науковці [67, 37, 3] пов'язують з їх проникністю та пористістю, які розглядають в комплексі. М.А.Caldarone, О.Е. Gjørv, М. Pigeon та R. Pleau, Т. Dyer [79, 96, 115, 90] вважають, що основним методом підвищення будівельно-експлуатаційних показників бетону є забезпечення якості його мікро- та мезоструктури, а саме висока щільність (низьке В/Ц), непроникність і мінімальне тріщиноутворення.

Мезо- і макроструктура високоміцних бетонів повинні характеризуватися оптимальним розподілом частинок за розміром [54]. Загалом, моделі упакування компонентів бетону орієнтовані на вибір належних розмірів та пропорцій менших частинок, щоб заповнити порожнечі та проміжки між більшими. Розрізняють дискретні (декілька дискретних класів частинок за розміром) та неперервні моделі. Дискретні моделі знайшли своє відображення у підборах складу традиційних трьохкомпонентних важких бетонів (крупний заповнювач - дрібний заповнювач - в'язуче) з переривчастою гранулометриєю. Використання

дрібнозернистих і литих бетонів та сучасні тенденції до зниження витрат цементу, а також підвищення їх питомої поверхні разом з використанням мікронаповнювачів та ультрадисперсних активних мінеральних добавок стимулюють розвиток неперервних моделей упакування [107, 112]. Зокрема, значний ефект від оптимізації частинок за розміром в діапазоні 0,1-1000 мкм досягається використанням удосконалених моделей на основі кривої Фуллера (1.1):

$$A(D) = \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^q \quad (1.1)$$

де,

$A(D)$ – повний залишок на ситі діаметром D ,

D_{max} – максимальна крупність частинок,

q – коефіцієнт розподілу, що залежить від необхідного співвідношення між крупними (заповнювач) і дрібними (в'язуче) частинками (0,21-0,45).

Використовуючи даний підхід D.P.Bentz та ін.[76] вдалось замінити 35 мас.% цементу золою винесення ТЕЦ оптимальної гранулометрії, без втрати ранньої та проектної міцності цементно-піщаних розчинів, знизити капілярну пористість та підвищити їх непроникність. Н. Brouwers та Н. Radix [77] встановили, що оптимізацією в'язучого за формулою (1.1) із значенням $q=0.37$ можливо досягти зниження вмісту цементного клінкеру до 50% без втрати фізико-механічних характеристик.

Досягнення високих показників міцності цементобетону нерозривно пов'язано із зниженням водоцементного відношення. На основі бетонних сумішей із В/Ц нижче 0,4 зазвичай демонструють вищу міцність на стиск та розтяг при згині (включаючи більшу ранню міцність), високий модуль пружності, більшу стійкість до стирання та меншу проникність, що, як правило, забезпечує високі фізико-механічні властивості та довговічність [123].

Однак, коли бетон виробляється при низькому В/Ц, він не містить достатньої кількості води для повної гідrataції компонентів цементу, що може призвести до самообезводнення та усадки. Оскільки роботи з влаштування

транспортних споруд часто виконуються при різких перепадах температури і вологості навколишнього середовища, якість бетонних конструкцій може значно знижуватися внаслідок мікротріщиноутворення на початковій стадії твердіння бетону, яке викликається спільним впливом усадкових і температурних напружень [48, 130].

Ця проблема особливо важлива в теплу пору року, при зведенні конструкцій з великою площею поверхні, що висихає, зокрема транспортного призначення – покриття автомобільних доріг та аеродромів, прогонових будов мостів. Через значну відкриту площу поверхні бетону, тривалий вологий догляд стає критичним для забезпечення необхідних ранніх та проектних експлуатаційних характеристик. У випадках, коли не передбачено достатнього догляду, можливе виникнення усадки, короблення плит, тріщиноутворення та загальне погіршення експлуатаційних показників [38]. Традиційними методами зниження усадки є зовнішній догляд за бетоном – покриття вологоутримуючими та плівкоутворюючими речовинами, туманні завіси, та ін. Проте такі заходи не дають змоги контролювати контракційну усадку в процесі самообезводнення бетону при дефіциті води замішування за низьких значень водоцементного відношення ($V/C < 0,4$), яка спричиняє активне тріщиноутворення бетону, і, як наслідок, зниження його міцності та довговічності [64].

Крім того, більшість сумішей з низьким V/C містять додаткові цементуючі матеріали (SCM – supplementary cementitious materials; наприклад, золу винесення теплових електростанцій, мелений гранульований доменний шлак, природні пуцолани), які потребують тривалого догляду для повної їх реакції в цементній системі. Окремі SCM, завдяки своїй значній питомій поверхні та високій реакційній здатності, можуть посилити самообезводнення та хімічну усадку, пов'язану з гідратацією в сумішах з низьким V/C [69]. Крім того, дуже низька проникність HSC при низьких V/C може ускладнити доступ зовнішньої води навіть у ранньому віці. Це означає, що навіть при застосуванні належних методів догляду зовнішня вода може не досягати негідратованих цементних зерен, що обмежує ступінь гідратації цементу та реакції будь-яких

SCM.

В 90-х роках висунута Р. Philleo і в останні роки розвинена DP Bentz [70, 71], Р. Lura [73], К. Kovler [135], М. Зайченко[24], С. Коваль[100] та ін. [91] концепція «внутрішнього догляду» за бетоном. Під терміном «внутрішній догляд» розуміють механізм введення додаткових внутрішніх резервуарів води у бетон з метою компенсації його самообезводнення називають «внутрішнім доглядом». На думку [69], його ефективність залежить від проникності бетону та ступеня гідратації в'язучого, тому пористі компоненти доцільно вводити до складу при В/Ц $\leq 0,4$. Для дорожніх бетонів імплементація внутрішнього догляду зумовлена великою відкритою площею поверхні та застосуванням плівкоутворювачів, що обмежує можливості традиційного догляду [103]. Додаткова вода також сприятиме максимізації гідратації цементу і пуцоланів в суміші, потенційно сприяючи підвищенню міцності і зниженню транспортних коефіцієнтів.

Внутрішній догляд, як контроль процесу гідратації цементу, здійснюється введенням в цементну матрицю спеціальних добавок: пористих компонентів (LWA –Light Weight Aggregate), водоутримуючих гранул суперабсорбентів (SAP –Superabsorbent polymers), які віддають вологу в матрицю бетону для продовження гідратації, хімічних добавок, що знижують поверхневий натяг в порах бетону (SRA– Shrinkage-reducing admixture), тим самим зменшуючи усадку.

У низці досліджень вивчали можливість використання суперабсорбентних полімерів та пористих заповнювачів для створення внутрішніх резервуарів води з метою забезпечення внутрішнього догляду та зменшення усадки [82, 83, 85, 111]. Забезпечення внутрішнього резерву води у високоміцних бетонах, що використовуються для жорстких покриттів та мостових плит, може підвищити їх стійкість до висихання, знизить деформації усадки та проникність.

Xiang Gao та ін. [128] встановили, що використання попередньо зволоженого спеченого зольного залишку (sintered fly ash) для внутрішнього

догляду за плитою цементобетонного покриття дало змогу продовжити гідратацію в сухих умовах тверднення, підвищити міцність бетону на розтяг більш ніж 40% та знизити капілярне підсмоктування води.

Найбільш простим і економічно доступним способом внутрішнього догляду за високоміцним бетоном може бути використання LWA. Заміна дрібного заповнювача попередньо змоченим LWA має суттєвий вплив на зниження усадочних деформацій, морозостійкості і транспортних властивостей бетону [91]. Однак зазвичай вони знижують міцність на стиск бетону [110].

G. Espinoza-Hijazin та M. Lopez у роботі [93] показали, що в сухих умовах тверднення бетони з В/Ц $\geq 0,42$ та водонасиченим керамзитом показали на 16% вищий ступінь гідратації, на 19% вищу міцність на стиск і на 30% нижчу проникність, ніж їх аналоги без керамзиту. Це на їх думку, підтверджує ефективність внутрішнього догляду для бетонів з відносно високим В/Ц відношенням при незадовільних умовах тверднення.

Загалом, замочування пористих компонентів у виробничих умовах може бути технологічно складним і економічно непривабливим. У цьому випадку застосування порошкоподібних дрібнопористих мінеральних компонентів може бути корисним через їх високу питому поверхню і здатність швидко поглинати воду. На відміну від інертних LWA, активні мінеральні добавки можуть частково замінити цемент в бетоні і зменшити забруднення атмосфери в результаті виробництва цементу, знизити вартість бетону і підвищити його міцність та довговічність.

1.3 Роль хімічних і активних мінеральних добавок у формуванні експлуатаційних властивостей бетонів транспортного призначення

Реалізація концепції одержання високоміцних бетонів нового покоління

для транспортного будівництва з поліпшеними експлуатаційними властивостями неможлива без використання комплексних хімічних добавок-модифікаторів. Сучасний цементобетон завдяки новим хімічним добавкам перетворюється у більш складний композиційний матеріал, властивості якого перевершують традиційні склади [56, 62]. Одним з найбільш перспективних напрямків технічного прогресу в технології бетону є формування структури цементного каменю, що дозволяє значно підвищити комплекс фізико-технічних властивостей бетону. Ці завдання в багатьох випадках можуть бути успішно вирішені за допомогою різних хімічних модифікаторів, які при введенні в малих кількостях суттєво впливають на фізико-хімічні процеси твердіння в'язучих і в результаті на технологічні властивості бетонних сумішей та будівельно-експлуатаційні властивості бетонів.

Проте для отримання цементних бетонів з підвищеною міцністю, морозостійкістю, водонепроникністю, корозійною стійкістю найбільш ефективно застосовувати не окрему хімічну добавку, а спеціально підібраний комплекс добавок поліфункціональної дії в залежності від призначення цементобетону і вимог до нього.

В Україні представлений вельми обширний перелік модифікаторів, запропонованих до застосування (кількість хімічних добавок, що входять до номенклатури будівельного каталогу «Хімічні добавки для бетонів і будівельних розчинів», становить більше 85 найменувань). Певні типи модифікаторів надають бетонам та конструкціям на його основі низку нових властивостей. Найрозповсюдженішими вважаються модифікатори пластифікуючої, структуруючої дії, регулятори тверднення бетону (прискорювачі та сповільнювачі), а також комплексні модифікатори поліфункціональної дії.

Важливе місце серед хімічних модифікаторів займають пластифікатори і суперпластифікатори бетонних сумішей. Згідно з дослідженнями M Collepardi [81] та В.Г. Батракова [3] механізм дії пластифікаторів пов'язують з їх хімічною природою. Так, найбільш ефективними вважають модифікатори на основі поліоксидів карбоксилату та акрилу. Можливість регулювання водопотреби

бетонної суміші при застосуванні суперпластифікаторів і значного (до 20-25%) зниження водоцементного відношення забезпечує отримання високоміцних бетонів класів В45 і вище, виробництво конструкцій з високоміцного бетону без нарощування обсягів випуску енергоємних цементів високих марок.

Повітровтягувальні добавки використовують, головним чином, для підвищення морозостійкості бетонів і розчинів. Стабілізуюча дія повітровтягувальних добавок забезпечується завдяки їх адсорбції на поверхні поділу фаз рідини і газу. Там вони утворюють за допомогою бічних зв'язків окремих молекул піноутворювача пружні мономолекулярні плівки, що допускають і об'ємні деформації. Однак при цьому, так само як і у пластифікаторів, гідрофільні гілки молекул повернені до рідкої фази [115]. Молекули ПАР орієнтовані полярними функціональними групами в сторону води, а неполярні - в сторону пухирців повітря, які, заряджаючись однойменно, відштовхуються один від іншого, що перешкоджає їх коалесценції. Повітряні бульбашки в тілі затверділого бетону служать резервним об'ємом для замерзання капілярної води без виникнення значних внутрішніх напружень [96, 53]. Ефективний вміст втягнутого повітря становить зазвичай 4-7%. За даними [80, 103], ці добавки підвищують морозостійкість бетону, проте значно знижують його міцність (1% залученого повітря знижує міцність бетону на стиск на 4-7% залежно від В/Ц). В той же час, результати досліджень С. М. Толмачова та співавторів [49] свідчать, що міцність бетону може знижуватись більш ніж на 14% на кожен відсоток введеного повітря для забезпечення морозостійкості бетону.

Повітровтягувальні добавки ефективні також для поліпшення легкоукладальності бетонних сумішей. Повітряні пухирці зберігають сферичну форму під дією поверхневого натягу, виконують роль дрібного заповнювача з дуже малою поверхнею зчеплення і значною пружністю. Залучене повітря додає бетонній суміші властивості суміші із збільшеною кількістю дрібного заповнювача, тому при введенні повітровтягуючих добавок вміст піску у бетонній суміші необхідно зменшувати. Це дозволяє зменшити водовміст

суміші, тобто частково компенсувати втрату міцності через наявність пор [81].

Значний внесок в сталий розвиток та зменшення негативного екологічного впливу цементного виробництва на навколишнє середовище може бути зроблено через зниження вмісту клінкеру в портландцементі шляхом часткової заміни його активними мінеральними добавками (АМД). Раціональний підбір їх виду та вмісту дозволяє отримати в'язуче з наперед заданим комплексом властивостей, без значного погіршення фізико-механічних характеристик [112, 115].

Портландцемент - найпоширеніше у сучасній будівельній індустрії гідравлічне в'язуче, процес його виробництва є не тільки енергоємним, але й шкідливим для навколишнього середовища [108]. В середньому для всіх типів цементу вміст основного компоненту - клінкеру - становить 84%, а виготовлення однієї тонни цього матеріалу супроводжується викидом близько 0,9 тонн CO₂ в атмосферу [35, 43]. Це зумовлює парниковий ефект та глобальне потепління, яке згодом викликає непередбачувані зміни в довкіллі.

Часткова відмова від цементу за рахунок введення мінеральних добавок – одне із пріоритетних напрямків розвитку індустрії будівельних матеріалів. Сьогодні мінеральні добавки стали майже обов'язковим компонентом бетону, що забезпечує поліпшення його технічних властивостей [34]. У порівнянні з іншими видами добавок вони мають найбільший вплив на структуру і властивості бетону при одночасній економії як цементу, так і заповнювачів. Доцільність введення мінеральних добавок в бетон пояснюється практикою отримання бетонів різної міцності на цементі однієї марки.

При низькій витраті цементу в бетоні є дефіцит дрібнодисперсних частинок, який і компенсується введенням мінеральних добавок. Так як ефект заповнення пустот, ущільнення структури, як і ефект розсунення цементних зерен, є суто фізичними факторами, незалежними від гідравлічної активності наповнювача і визначається насамперед доступністю і вартістю компонентів. Як показує практика, за рахунок введення мінеральної добавки з оптимальною

дисперсністю можна знизити витрату цементу до 20% з одночасним підвищенням міцності до 15% [33].

При цьому такі добавки можуть бути природного (осадового або вулканічного) і техногенного (відходи та побічні продукти промислового виробництва) походження.

Мінеральні порошки - замітники цементу (активні мінеральні добавки і наповнювачі) становлять окрему і досить автономну групу. Ці порошки вводять або при помелі клінкеру, або безпосередньо в бетонну суміш. Такі мінеральні добавки знижують витрати на будівництво, підвищують міцність, морозостійкість, водонепроникність бетону, а також впливають на кінцеві властивості бетону за рахунок гідравлічного або пуцоланового впливу. Добавки, що проявляють пуцоланову активність, можуть бути як природного походження (вулканічний попіл), так і побічними продуктами, що утворюються при згорянні палива (зола-винесення) чи металургійної промисловості (кремнеземний пил, мікрокремнезем) [32, 42].

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-128:2006, за своїми функціями мінеральні добавки до цементу розділяються на три групи речовин:

- здатні до слабкої (прихованої) гідравлічності.
- здатні до активної взаємодії з продуктами гідратації цементу;
- інертні до процесів гідратації, але дещо хімічно споріднені з продуктами гідратації цементу.

Позитивному впливу активних мінеральних добавок на структуроутворення бетону сприяє також «ефект дрібних порошоків», які розширюють вільний простір, де осаджуються продукти гідратації, що прискорює процес твердіння цементу [41].

Одним з найперспективніших матеріалів для часткової заміни портландцементу є цеолітовий туф [39]. Цеоліти – велика група мінералів, водні алюмосилікати кальцію і натрію, які заміщуються іноді К, Ва, Sr та ін. Сьогодні відома велика кількість природних цеолітів, найбільш поширеними з яких є клиноптилоліт, гейландит, філіпсит, морденіт.

Цеоліт використовується, як активна мінеральна добавка при виробництві портландцементу, при виготовленні силікатної цегли та сухих будівельних сумішей. Незважаючи на виражену кристалічну структуру, цеоліти проявляють значну пуцоланічну активність, близьку до мікрокремнезему [109]. Такі властивості В. Ahmadi та М. Shekarchi [65] пояснюють значною питомою поверхнею матеріалу (за рахунок порової структури), високим вмістом реакційноздатних SiO_2 та Al_2O_3 , що взаємодіють з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ формуючи гідросилікати та гідроалюмосилікати кальцію. Це забезпечує зростання міцності на пізніх термінах тверднення, зниження тепловиділення при гідратації та підвищення корозійної стійкості цеолітовмісних цементних композицій [126].

D. Nagrockiene і G. Girskas [113] показали, що введення 10 мас.% цеоліту до складу бетонів підвищило його міцність на стиск на 15% та знизило водопоглинання у 2,3 рази. Закрита пористість цолітмісткого бетону зростає, що підвищило його морозостійкість у 3,3 рази.

Дослідження М. Shekarchi [122] свідчать що самоущільнювані бетони з вмістом 10-20% цеолітового туфу характеризуються підвищеними показниками довговічності: до 20% нижчим водопоглинанням, стійкістю до хлоридної корозії та у 4,5 вищим електричним опором, проте вміст 20% цеоліту дещо знижує міцність бетону та значно підвищує витрату пластифікатора для забезпечення рухливості суміші. Також, згідно з результатами досліджень Е. Vejmelková та ін. [127], введення до 20 мас.% цеоліту є оптимальним з погляду балансу між зниженням міцності бетону, та підвищенням його довговічності, зокрема морозостійкості, корозійної стійкості та водопоглинання.

Зважаючи на пористу структуру цеолітів, вітчизняними та закордонними вченими було проведено низку досліджень, які мали на меті визначити ефективність його застосування для забезпечення внутрішнього догляду. Так, Н.М. Зайченко [24] показав, що використання водонасиченого цеоліту для заміни частини кварцового піску зменшує деформації усадки високоміцного бетону без зниження його міцності у пізні терміни тверднення.

Згідно з результатами [121], ультрадисперсний цеоліт (0,1-10 мкм) з високим вмістом клиноптилоліту (більше 95 мас.%) недостатньо ефективний у здійсненні внутрішнього догляду високоміцного бетону з В/Ц=0,3 порівняно з керамзитовим порошком, проте його використання як активної добавки-мікронаповнювача є перспективним.

У дослідженні [134] автори підтвердили позитивний вплив цеоліту фракції 1-500 мкм на зниження усадки бетону на 42%, а також покращення його міцності та непроникності у пізні терміни тверднення.

Іншим перспективним пористим пуцоланічним матеріалом є спучений перліт. Це пористий сипкий матеріал, що виготовляють шляхом екструзії природного перліту в обертових або шахтних печах при температурі 900...1200°C. Спучений перліт у вигляді піску являє собою зерна білого або сірого кольору з повітряними порами. Але, на відміну від цеоліту, пористість спученого перліту має відкриту, а не внутрішньокристалічну природу.

Завдяки високій розмелювальній здатності, перліт не потребує значних енергетичних витрат на подрібнення, і може бути ефективно застосований як активна мінеральна добавка. У роботі [92] показано, використання перліту для заміни 20 мас.% клінкеру в цементі дозволяє досягти високих показників міцності без значного підвищення їх водопотреби.

Згідно з дослідженнями [132], пуцоланічна активність дрібнодисперсного перліту в складі бетону дає змогу на 12-15% підвищити його міцність як на стиск, так і на згин через 91 добу тверднення. Використання його в складі самоущільнюваного бетону [99] покращило його міцність у віці 91 діб, а також довговічність: водонепроникність, стійкість до хлоридної корозії та електричний опір бетону.

Оскільки спучений перліт характеризується високим водопоглинанням (більше 200% за масою) завдяки своїй розвинутій відкритій пористості, доцільним є використання його для забезпечення внутрішніх резервуарів води у бетоні та здійснення внутрішнього догляду. Так, С. Коваль та Н. Абед [1, 100] дослідили, що використання водонасиченого перліту знижує деформації усадки

цементного каменю, підвищує опір згинаючим навантаженням та енергію руйнування самоущільнюваних бетонів.

У дослідженні [120], підтверджено активну роль спученого перліту в кількості 10% у зниженні хімічної усадки цементного розчину на 33%. K. Kovler, S. Zhutovsky та A. Ventur [136] встановили, що вибір перлітового компоненту ефективних розмірів та пористості дає змогу повністю ліквідувати деформації усадки бетону використанням лише 10 кг/м³ спученого перліту.

Таким чином, використання цеолітового та перлітового компоненту не лише покращує властивості бетону як активні пуцоланічні мінеральні добавки, але і здійснює внутрішній догляд за бетоном завдяки своїй пористій структурі.

1.4 Теоретичні передумови та наукова гіпотеза дослідження

Узагальнення результатів досліджень в області технології високоміцних бетонів свідчать, що забезпечення підвищених показників міцності, довговічності та тріщиностійкості вимагає комплексного підходу для створення упорядкованої мікро- та мезоструктури бетону, шляхом реалізації заходів з впорядкування водно-повітряного співвідношення структурованого капілярного простору бетону та регулювання його властивостей шляхом введення полідисперсних пуцоланічних компонентів та хімічних добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії.

На підставі детального і всебічного аналізу наукових літературних джерел вітчизняних та зарубіжних вчених, присвячених розробленню високоміцних бетонів транспортного призначення, покращенню їх мікро- і мезоструктури та підвищенню показників їх довговічності та тріщиностійкості, а також забезпечення внутрішнього догляду у бетонах (Ю. М. Баженов, В.Г. Батраков, В.М. Вировой, І.П. Гамеляк В.І. Гоц, Л. Й. Дворкін, П.В. Кривенко, А. А. Пługін, К.К. Пушкарьова, Р.Ф. Рунова, М. А. Саницький, Х.С. Соболев, С.Й. Солодкий, С.М. Толмачов, Л.О. Шейніч, Р.К. Mehta, М. Pigeon, А. Neville, Р.С. Aitcin, D.P.

Bentz, P.Lura, M.A. Caldarone, C. Bilim, D. Jana, E. Vejmelkova, B. Ahmadi, M. Shekarchi, L. Yu та ін.), можна зробити висновок щодо необхідності створення бетонів транспортного призначення з покращеною мікро- і мезоструктурою і підвищеними показниками тріщиностійкості та довговічності.

Згідно проведеного аналізу визначено, що для підвищення фізико-механічних та будівельно-експлуатаційних характеристик бетону доцільним є введення не більше 10 мас.% цеоліту та перліту. Оскільки властивості їх структури дозволяють адсорбувати воду на стадії замішування та «віддавати» її у процесі гідратації цементного каменю, доцільно перевірити можливість здійснення ними внутрішнього догляду.

Також використання цих добавок у вигляді компонентів оптимальної дисперсії дасть змогу покращити властивості бетону за рахунок оптимізації його гранулометрії.

Одним з важливих напрямків розвитку сучасного транспортного будівництва є розроблення високоміцних бетонів з покращеною мікро- і мезоструктурою і підвищеними показниками тріщиностійкості та довговічності, отриманих шляхом модифікації полідисперсними компонентами та хімічними добавками з покращеними технологічними та експлуатаційними властивостями, які забезпечують керування процесом формування структури для надійної експлуатації транспортних конструкцій протягом усього життєвого циклу.

Аналіз відомих закономірностей формування структури будівельних композитів дозволяє висунути гіпотезу про доцільність розроблення бетонів транспортного призначення та особливостей формування їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей за рахунок комплексного модифікування активними мінеральними та хімічними добавками різного функціонального призначення: пористими пуцолановими полідисперсними компонентами для реалізації функції внутрішнього догляду та підвищення корозійної стійкості, водоредукуючими суперпластифікаторами полікарбосилатного типу та ефективною повітровтягувальною добавкою, що в комплексі забезпечить

направлене формування структури бетону для досягнення підвищених характеристик міцності, непроникності, тріщиностійкості та морозо- та корозійної стійкості (рис. 1.1). Це потребує поглибленого аналізу процесів спрямованого регулювання мікро- та мезоструктури та особливостей формування комплексу фізико-механічних та експлуатаційних властивостей високоміцних бетонів транспортного призначення для можливості їх широкого використання у будівництві.

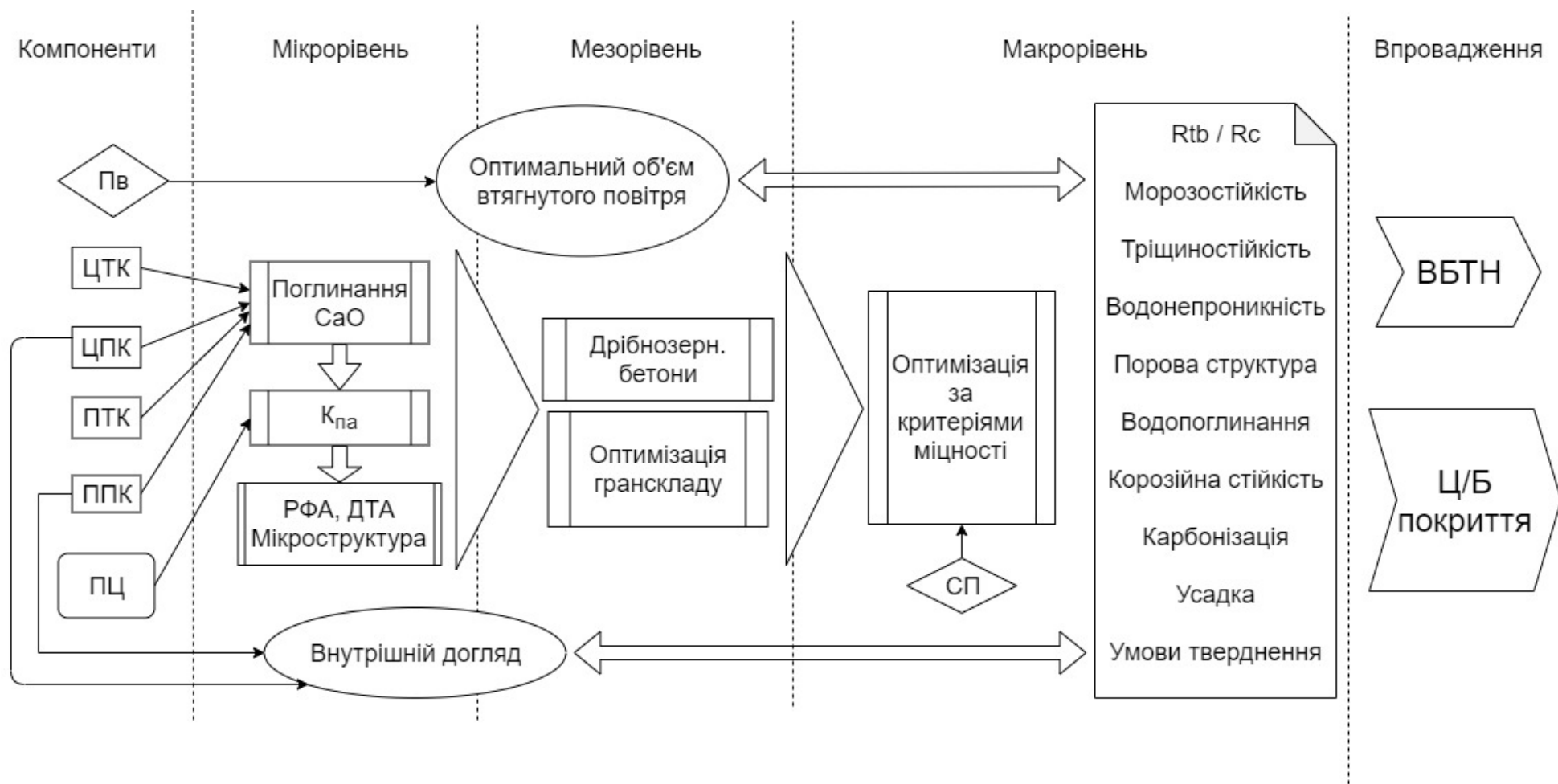


Рисунок 1.1 – Блок-схема досліджень

Висновки до розділу 1

1. Бетон транспортного призначення значно відрізняється від конструкційних за своїми будівельно-експлуатаційними показниками, що зумовлено «екстремальними» умовами роботи. Тому при розв'язанні проблеми довговічності цементобетону необхідно враховувати комплекс експлуатаційних та природно-кліматичних впливів, а також властивості вихідних матеріалів, компонентний склад в'язучих, технологічні чинники.

2. Високоміцні бетони (High strength concrete - HSC) знайшли широке застосування у практиці транспортного будівництва для зменшення товщини мостових конструкцій, верхніх шарів дорожнього одягу та промислових підлог. Проте для них характерні низькі значення водоцементного відношення, що викликає самообезводнення структури та деформації усадки, що можуть бути компенсовані внутрішнім доглядом.

3. За результатами літературного огляду, встановлена ефективність застосування тонкодисперсних цеоліту та перліту як додаткових цементуючих матеріалів. Їх присутність забезпечує зростання міцності бетону у пізні терміни тверднення, морозостійкості та підвищення корозійної стійкості і довговічності

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вихідні матеріали

Як в'яжуче при розробці бетонів транспортного призначення було використано портландцемент ПЦ І-500 ПАТ «Волинь-цемент» філії ПрАТ «Дікергофф Цемент Україна», який є типовим середньоалюмінатним цементом, найбільш характерним для сучасної вітчизняної цементної промисловості [36]. Його хіміко-мінералогічний склад наведений в табл. 2.1, фізико-механічні властивості – в табл. 2.2.

Таблиця 2.1

Хіміко-мінералогічний склад портландцементного клінкеру

Виробник	Вміст оксидів, мас. %							Мінералогічний склад, мас. %			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF
ПАТ «Волинь-цемент»	21,44	5,22	4,84	66,18	0,95	0,72	0,65	12,39	66,12	6,80	11,97

Як крупний заповнювач для бетонів використовували гранітний щебінь кар'єру м. Коростень Житомирської області суміші фракцій 5-10 та 10-20 мм. Випробування щебеню проводились згідно ДСТУ Б В.2.7-71-98 [130], його фізико-механічні показники наведені в табл. 2.3

Таблиця 2.2

Фізико-механічні властивості портландцементу

Виробник	$S_{\text{пит.}}$, м ² /кг	A_{008} , %	НГЦТ, %	Терміни тужавіння, год-хв		Границя міцності при стиску, МПа через, діб	
				початок	кінець	2	28
ПЦ-І-500 ПАТ «Волинь- цемент»	390	2,8	29,0	2-30	4-00	29,5	53,5

Таблиця 2.3

Технічні характеристики щебеню

Показники		Відповідно до нормативних вимог ДСТУ Б.В.2.7-75-98	Фактичні	
			Фракція від 5 до 10 мм	Фракція від 10 до 20 мм
Повні залишки на ситах, мас. %	D	90-100	96,8	94,6
	0.5(d+D)	30-80	65,7	43,4
	D	До 10	-	-
	1.25D	До 0,5	-	-
Вміст зерен пластинчатої та голчастої форми, мас. %		До 35	12,2	13,7
Марка за міцністю		Не нижче 800 для бетону класу за міцністю В30	1200	1200
Вміст зерен слабких порід, мас. %		До 10 для бетону класу за міцністю В30	0,2	0,4
Вміст пиловидних та глинистих частинок, мас. %		До 1,0	0,7	0,8
Істинна густина, г/см ³		-	2,70	2,70
Середня густина, кг/м ³		2000-2800	2500	2580
Насипна густина, кг/м ³		-	1366	1396

Для приготування цементобетонів в даній роботі, як дрібний заповнювач використовували кварцовий пісок Жовківського кар'єру Львівської області. Випробування піску проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 .

Технічні характеристики піску наведені в табл. 2.4, його гранулометрична крива - на рис. 2.1.

Таблиця 2.4

Технічні характеристики піску

Показники	Відповідно до нормативних вимог	Фактичні
Істинна густина, кг/м ³	2000-2800	2650
Насипна густина, кг/м ³	не менше 1100	1470
Модуль крупності	від 1,5 до 3,25	1,9
Вміст зерен розміром від 5,0 мм до 10 мм, % за масою	не більше 10	0,70
Вміст зерен розміром більше 10,0 мм, % за масою	не більше 0,5	0,1
Вміст зерен, що проходять крізь сито № 016, % за масою	не більше 15	4,0
Вміст пиловидних та глинистих частинок розміром менше 0,05 мм, % за масою	не більше 3	1-2%
Вміст органічних домішок	низький	Низький

Випробуваний пісок має модуль крупності 1,9 і відноситься до дрібних пісків та задовольняє вимоги ДСТУ Б В.2.7-32-95. Результати випробувань свідчать, про відповідність піску нормативним вимогам для його застосування як дрібного заповнювача у важких та дорожніх бетонах.

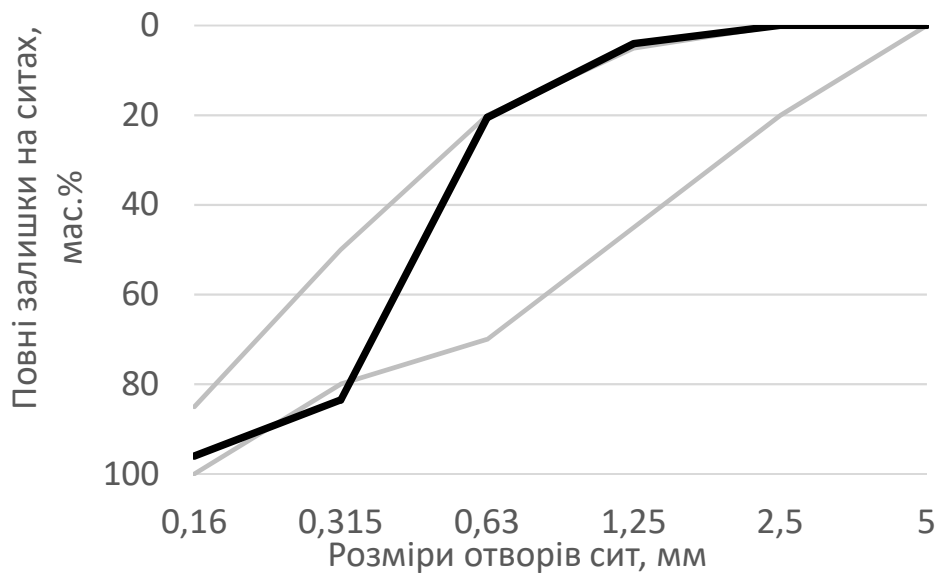


Рисунок 2.1 - Крива гранулометрії дрібного заповнювача

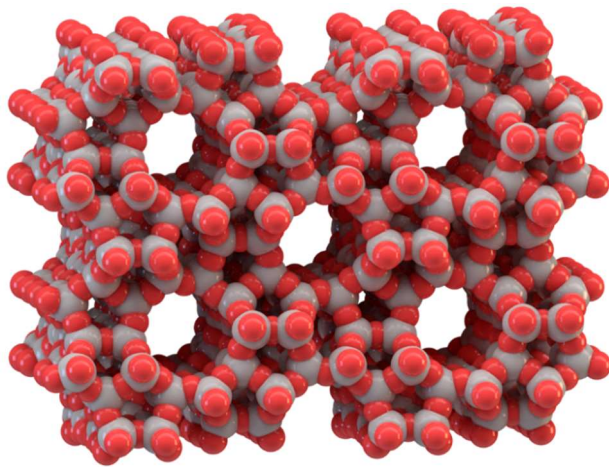
Як мінеральні компоненти, у даній роботі використовували цеолітовий туф та спучений перліт різної дисперсності, хімічний склад яких наведений в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Хімічний склад мінеральних компонентів

Мінеральний компонент	Вміст оксидів, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	ВПП
Цеолітовий туф	60,1	14,5	3,8	4,8	1,6	4,8	9,4
Спучений перліт	71,8	12,8	1,5	1,4	0,6	10,9	-

Природні цеолітові породи, які називають ще цеолітовими туфами, мають вулканічно-осадове походження і за складом основних породоутворювальних мінералів належать до групи водних алюмосилікатів лужних і лужноземельних металів. Структура цеолітів утворена жорстким тривимірним каркасом, пронизаних системою з'єднаних між собою каналів, в яких утримуються катіони металів і вода [12].



а



б

Рисунок 2.2 - Молекулярна будова цеоліту (а) та зовнішній вигляд цеолітового туфу (б)

Вода в структурі цеолітів є двох видів – така, що координаційно зв’язана катіонами металів і адсорбована рухома вода, яка може зворотно переміщатись по каналах при зміні умов. Часто цеоліти називають пористими кристалами, оскільки для них характерна розвинута внутрішня кристалічна пористість [39].

Основним цеолітовим мінералом Сокирницького родовища є клиноптилоліт – гідроалюмосилікат натрію $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ з вільним внутрішнім об’ємом $0,35 \text{ см}^3/\text{см}^3$, вміст якого є основним показником якості цеолітової породи (табл. 2.6). У дослідженнях використовувався цеоліт Сокирницького родовища, вміст клиноптилоліту в якому становить 79%.

Таблиця 2.6

Технічні характеристики цеолітового туфу

Показники	Значення
Зовнішній вигляд	Сірий порошок
Вміст клиноптилоліту, мас.%	79
Середня густина, кг/м ³	1890
Насипна густина, кг/м ³	570
Фракція, мм	<1,0

Спучений перліт- це пористий матеріал, що одержують термообробкою методом «термоудару» при температурі 900-1100⁰С з природнього перліту, який являє собою вулканічне лужне гідроалюмосилікатне скло [120]. В результаті термообробки частинки скла переходять у піропластичний стан, бурхливо виділяють воду, збільшуються в об'ємі до 20 раз, набуваючи високу пористість.

Для спученого перліту характерними є відрита пористість і велике водопоглинання (табл. 2.7).

Перліт є перспективною пуцоланічною добавкою, що утворюється при гідратації вулканічного скла, що відбувається безпосередньо при охолодженні вулканічних порід і перерозподілі води, що міститься в них. Завдяки своїй склоподібній структурі і високому вмісту активних SiO₂ і Al₂O₃, перліт проявляє

Таблиця 2.7

Технічні характеристики спученого перліту

Показники	Значення
Зовнішній вигляд	Білий пісок
Середня густина, кг/м ³	1890
Насипна густина, кг/м ³	90
Марка за насипною густиною	100
Міцність при стисканні в циліндрі, МПа	0,15
Пористість, %	79
Водопоглинання за об'ємом, %	38,0

значну пуцоланічну активність, достатню для використання його у композиційних цементах. Через високу пористість, спучений перліт має значну розмелювальну здатність, що дозволяє отримати цементний камінь з високою щільністю.

Як пластифікувальну добавку використовували SikaViscocrete 5320 - універсальний ефективний суперпластифікатор на основі полікарбоксилатів,

який використовується для виробництва високоякісного бетону. Висока диспергуюча дія добавки дозволяє виготовляти бетон з швидким зростанням початкових міцностей, володіє властивістю сповільнення процесу тужавіння бетонної суміші з можливістю збільшення часу її транспортування. Технічні характеристики Visco Crete 5320 наведено в табл. 2.8.

Sikanol A – висококонцентрована повітровтягувальна добавка до бетонів, застосування забезпечує високий показник дисперсності мікробульбашок, покращує пластичність суміші і зменшує її схильність до сегрегації, збільшує водонепроникність бетону, його морозостійкість та корозійну стійкість до дії протижелезних солей та реагентів. Технічні характеристики добавки приведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Технічні характеристики хімічних добавок

Назва	Visco Crete 5320	Sikanol-A
Дія	суперпластифікатор	повітровтягувальна
Основа	полікарбонат	Вінсольні смоли
Вигляд	Світло-рожева рідина	Коричнева рідина
Густина, г/см ³	1,155±0,02	1,06 ± 0,01
Рівень рН	5,0±1,0	12
Концентрація розчину, %	35,0±1,5%	-
Вміст хлоридів мас.%	≤ 0,1 %	-
Вміст лугів (Na ₂ O -екв), мас.%	≤ 1,0%	-
Дозування, мас.%	0,6-1,2	0,01-0,03

2.2 Методи досліджень

Випробування в'язучого проводились згідно ДСТУ EN 196-1:2007 і охоплювали визначення нормальної густоти цементного тіста, термінів тужавіння та об'ємного розширення. Також визначали границі міцності при стиску цементних кубиків з ребром 30мм. Визначення пуцоланічних властивостей мінеральних компонентів різної дисперсності проводили згідно з EN 450-1:2009 та за здатністю добавки поглинати $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з його насиченого розчину [5].

Фізико-хімічні дослідження процесів гідратації проведено з використанням рентгенофазового, диференційно-термічного та електронно-мікроскопічного аналізів.

Рентгенофазовий аналіз проводили за порошковим методом на дифрактометрі ДРОН-2М з мідною трубкою при напрузі 30 кВ, струмі 10-20 мА та діапазоні кутів $2\theta=9-60^\circ$. Дериватограми знімали за допомогою приладу OD-1500Q системи Паулік – Паулік – Ердеї при величині наважки 500-1000 мг, швидкість підйому температури становила 10 град/хв.

Хімічні склади досліджували рентгеноспектрометром SEM FEI Quanta 250 з обладнанням для мікрофотографії FEG (рис. 2.5).



Рисунок 2.3 - Рентгеноспектрометр SEM FEI Quanta 250 з FEG

Визначення рухливості бетонної суміші проводили згідно стандарту EN 12350-2, яким встановлено марки за легковкладальністю S1 - S5 і характеризується виміряною в сантиметрах величиною осадки стандартного конуса (ОК), сформованого з бетонної суміші.

Кількість втягнутого повітря визначали згідно з ДСТУ Б.В.2.7.144-2002 за допомогою приладу Testing 2.0334 (рис. 2.4), що діє на основі закону Бойля-Маріотта.

Визначення густини бетонної суміші відбувалось після її ущільнення в жорсткому геометричному контейнері та зважування згідно EN 12360-6.



Рисунок 2.4 - Прилад Testing 2.0334 для визначення повітровтягування в бетонній суміші

Випробування міцності на стиск та розтяг при згині бетонів проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Стійкість до циклів заморожування-відтавання визначалась згідно EN PN-88/B-06250. Бетон вважається морозостійким, якщо його міцність після кількості циклів, відповідно до марки за морозостійкістю F не знижується більше ніж на 20%.

Характеристики тріщиностійкості визначались при зрівноважених механічних випробуваннях зразків-призм 100x100x400 мм з штучно створеною

тріщиною відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-227:2009 [22] (рис. 2.6).

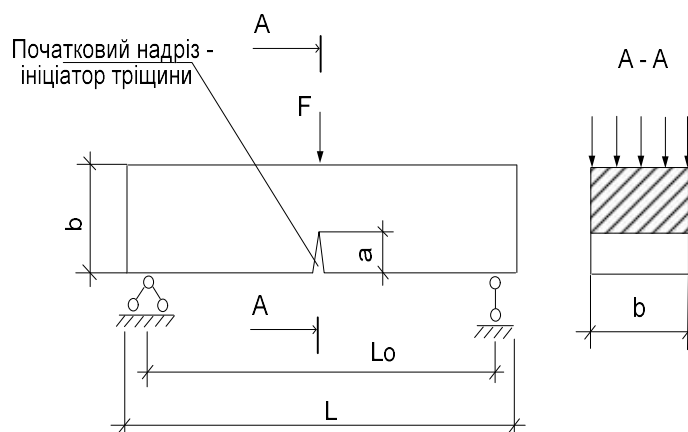
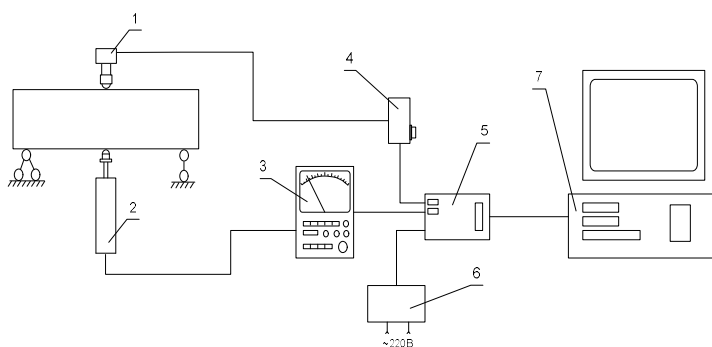


Рисунок 2.5 - Схема зрівноважених випробувань на тріщиностійкість

За допомогою датчиків (рис. 2.6) та програмного забезпечення «p-sens», в процесі випробувань записували повну діаграму стану бетону в координатах навантаження-прогин $F-V$, на підставі якої розраховувались енергетичні та силові характеристики тріщиностійкості.



а



б

Рисунок 2.6 - Загальний вигляд (а) і схема вимірювальної частини (б) установки для визначення характеристик тріщиностійкості: 1 – давач зусилля (тензометр); 2 – давач переміщення індуктивного типу; 3 – підсилювач-перетворювач сигналу з давача переміщення; 4 – резисторний міст; 5 – інтерфейсна плата; 6 – блок живлення; 7 – комп'ютер

Корозійну стійкість модифікованих портландцементів визначали прискореною методикою KVP за зміною міцності зразків цементно-піщаного розчину через 8 тижнів їх тверднення в агресивному середовищі розчинів Na_2SO_4 з концентрацією іонів $[\text{SO}_4^{2-}] = 30$ г/л та MgCl_2 з концентрацією іонів $[\text{Mg}^{2+}] = 30$ г/л . Корозійна стійкість оцінювалася за коефіцієнтом $K_{зг}$ [114]. Цей метод дозволяє спостерігати за процесом руйнування зразків при корозії з допомогою порівняльних випробувань на міцність у водному та агресивному середовищах і дає можливість повніше характеризувати поведінку зразків цементу в них.

Деформації усадки розроблених бетонів визначали на зразках $40 \times 40 \times 160$ мм за допомогою компаратора з індикатором годинникового типу, в торцях яких були закладені металеві анкери.

З метою вивчення ефективності внутрішнього догляду за бетоном в сухих умовах тверднення визначалась внутрішня вологість зразків з вмістом цеоліту та перліту за методикою, запропонованою El-Dieb [91]. Для цього у бетонних кубах з ребром 10 см зразу після розформування просвердлювали отвір діаметром 1 см, в який вставляли вологомір. Для унеможливлення втрати вологи через отвір, край вологоміра ущільнювався герметиком (рис. 2.7). Покази вологоміра реєстрували з періодичністю у 2 доби до 28 доби включно.

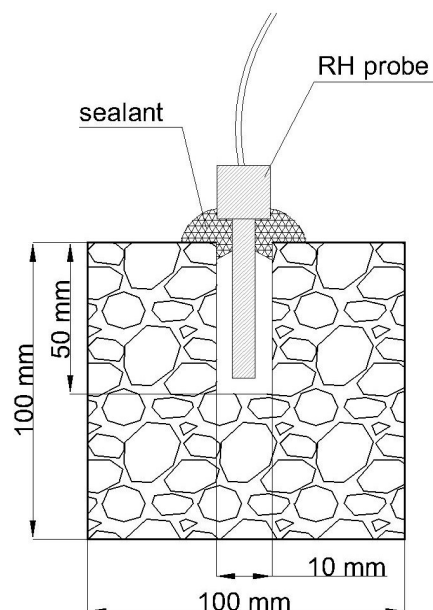


Рисунок 2.7 - Схема вимірювання внутрішньої вологості бетону

Втрати маси вимірювали шляхом зважування зразків-кубів бетону протягом усього періоду тверднення.

Для визначення пористості використовували ртутний поромір Micrometrics Autopore IV 9605, загальний вигляд та принцип роботи якого зображений на рис.2.8. Радіус пор знаходили за формулою Вошбурна:

$$R = -2 \gamma * \cos \theta / P \quad (2.1)$$

де, γ – поверхневий натяг ртуті, 0,465 Н/м; R – радіус пор; θ – крайовий кут змочування ртуті; P – тиск при інтрузії, в діапазоні 0,1 - 200 МПа відповідає діаметру пор 10,0 – 3,8 x 10⁻³ μm .

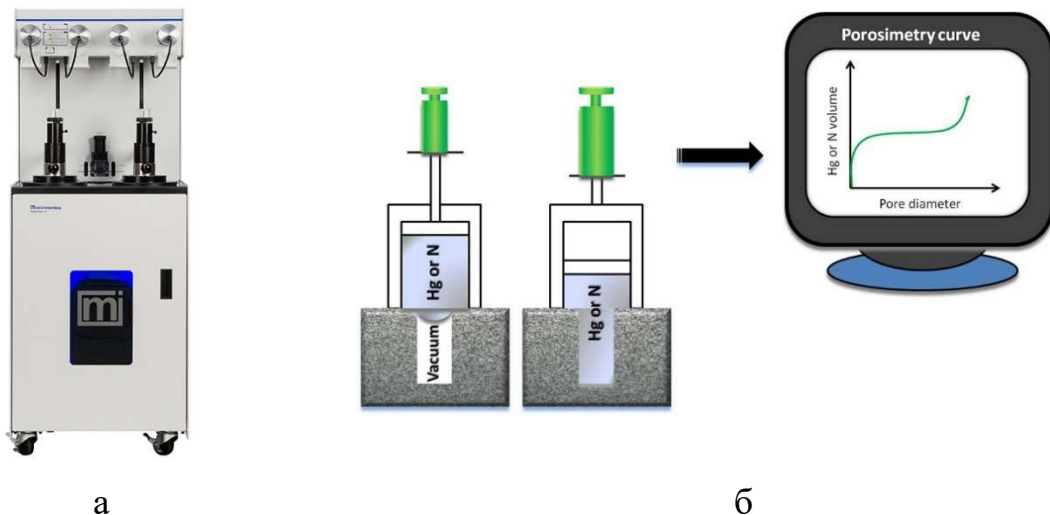


Рисунок 2.8 - Загальний вигляд ртутного пороміра Micrometrics Autopore IV 9605 (а) та схема вимірювання пористості бетону (б)

Характер мікропористості бетону вивчали за допомогою рентгенівського мікротомографа з високою енергією випромінювання SkyScan 1173 виробництва Bruker (рис. 2.8). Конструкція приладу дозволяє неруйнівним методом візуалізувати внутрішню просторову структуру щільних об'єктів з високою роздільною здатністю (до 5 мкм).



Рисунок 2.8. – Мікротомограф Bruker SkyScan 1173

Визначення розподілення частинок дисперсних компонентів за розміром проводили методом лазерної гранулометрії з використанням гранулометра Malvern Panalytical Master Sizer 2000 (рис. 2.9).



Рисунок 2.9. – Лазерний гранулометр Master Sizer 2000

Висновки до розділу 2

1. Для проведення експериментальних досліджень в дисертаційній роботі використані портландцемент ПЦ І-500 виробництва ПАТ

«Волиньцемент», кварцовий пісок Жовківського кар'єру Львівської області (Мкр=1,9) та гранітний щебінь кар'єру м. Коростень Житомирської області суміші фракцій 5-10 та 10-20 мм.

2. Як пористі активні мінеральні компоненти використовувались цеолітовий туф клиноптилолітового типу Сокирницького родовища Закарпатської області та спучений перліт виробництва ТОВ «Перліт-Стандарт» різної дисперсності.

3. Рентгенофазовий аналіз проводили за методом порошків на дифрактометрі ДРОН-2М, дериватограми знімали за допомогою приладу OD-1500Q, хімічні склади досліджували рентгеноспектрометром SEM FEI Quanta 250 з обладнанням для мікрофотографії FEG .

4. Для пластифікації бетонної суміші та створення замкнутої мікропористості використовували відповідно суперпластифікатор полікарбосилатного типу Sika Viscocrete 5320 та висококонцентровану повітровтягувальну добавку на основі вінсольних смол Sikanol A.

5. Фізико-механічні, будівельно-технічні та експлуатаційні характеристики розроблених бетонів та бетонних виробів на їх основі визначали згідно діючих стандартів та загальноприйнятих методик. Оптимізацію складів розроблених високоміцних бетонів транспортного призначення за критеріями міцності проводили за допомогою методів експериментально-статистичного моделювання з використанням дисоціативно-крокового методу оптимізації.

6. Для визначення пористості бетонів використовували ртутний поромір Micrometrics Autopore IV 9605, а також мікротомограф SkyScan 1173. Внутрішню вологість бетону визначали на зразках-кубах з ребром 10 см за допомогою вологоміра, який був розміщений у висвердленому герметично закритому отворі. Покази вологоміра реєстрували з періодичністю 2 доби.

РОЗДІЛ 3

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МЕЗО- ТА МІКРОСТРУКТУРИ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПУЦОЛАНОВИХ ПОРИСТИХ КОМПОНЕНТІВ РІЗНОЇ ДИСПЕРСНОСТІ

3.1 Вплив полідисперсних компонентів на мезоструктуру бетонів

Технологія виробництва високоміцних бетонів ґрунтується на управлінні процесами його структуроутворення на всіх рівнях. Одним із напрямків підвищення міцності і довговічності окреслює відома концепція [101] досягнення максимально щільного упакування частинок за рахунок забезпечення неперервності гранулометричного складу на мезоструктурному рівні.

Оскільки для якісних заповнювачів, що використовуються у високоміцних бетонах, властива практично повна відсутність зерен менше 0,16 мм, а сучасні портландцементи високої активності характеризуються значною тониною помолу, тому в гранулометрії високоміцних бетонів між в'язучим і дрібним заповнювачем виникають розриви в діапазоні 60-160 мкм (рис. 3.1, а), що потребує корекції за рахунок використання полідисперсних мінеральних компонентів.

Так, як показують результати лазерної гранулометрії (рис. 3.2), основний об'єм частинок тонкодисперсних добавок знаходиться в діапазоні 1-60 мкм, що відповідає межам гранулометрії портландцементу (рис. 3.2, а).

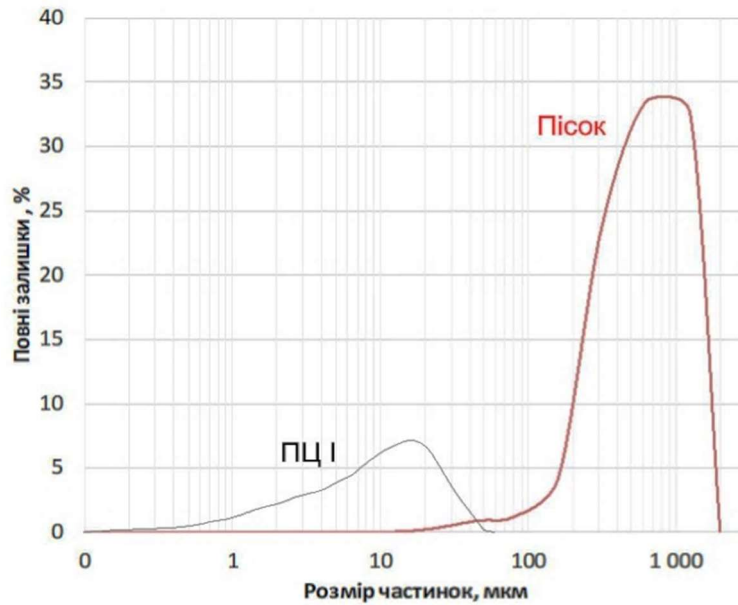
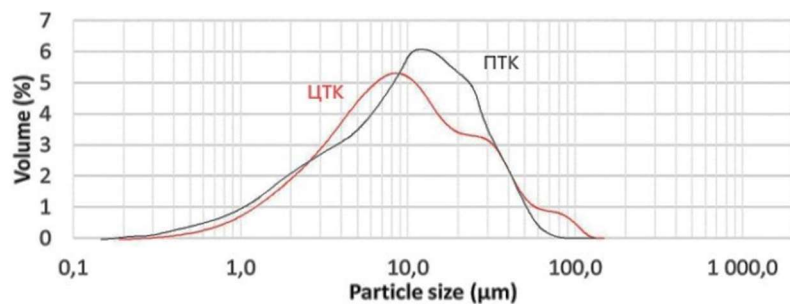
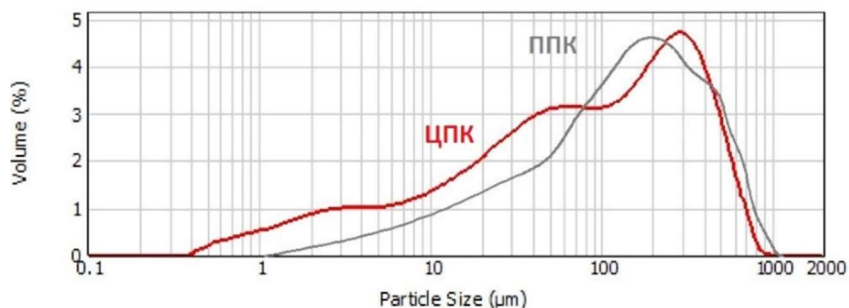


Рисунок 3.1 - Диференційні криві розподілу частинок піску та цементу за розмірами

Водночас, диференційне розподілення частинок полідисперсних компонентів показує, що їх зерна розміщені в діапазоні 0,4-800 та 6-1250 мкм для ЦПК та ППК відповідно (рис. 3.2, б).



а



б

Рисунок 3.2 - Диференційні криві розподілу частинок за розмірами:
а –цеолітовий (ЦТК) та перлітовий (ПТК) тонкодисперсні компоненти;
б – цеолітовий (ЦПК) та перлітовий (ППК) полідисперсні компоненти

Таким чином, шляхом введення до складу бетону полідисперсної добавки цеоліту забезпечується краща неперервність гранулометричного складу на рівні мезоструктурних компонентів, що підтверджує порівняння кривих розподілу складових досліджуваних бетонів та кривої максимальної щільності упакування частинок (рис. 3.3).

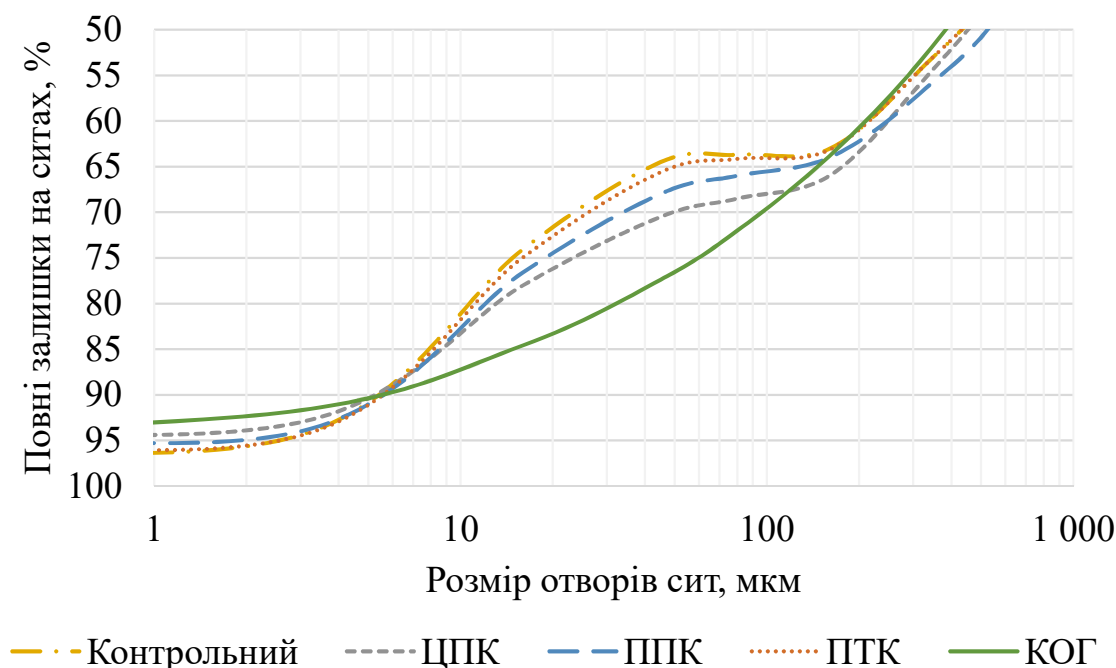


Рисунок 3.3 – Гранулометричний склад мезоструктурних компонентів,

КОГ – крива оптимальної гранулометрії, $A(D) = \left(\frac{D}{D_{\max}}\right)^{0.37}$ (1.1)

Дослідження впливу цеолітового і перлітового компонентів різної дисперсності на формування мезоструктури проводились на дрібнозернистих бетонах складу 1:2 (табл. 3.1)

Встановлено, що незважаючи на більшу водопотребу ($\Delta B/C=4-9\%$), дрібнозернистий бетон з добавкою цеолітового компоненту ЦПК характеризується найвищою міцністю серед всіх досліджуваних складів. Його підвищена водопотреба зумовлена здатністю іммобілізувати певну кількість води, зменшуючи дійсне водоцементне відношення сумішей за рахунок

наскрізно-канальної внутрішньокристалічної порової структури. Мезоструктура, утворена полідисперсним перлітовим компонентом відрізняється меншою міцністю, що зумовлено крихкістю спученого перліту.

Вищі границі міцності при згині дрібнозернистих бетонів Ц і ЦПК забезпечуються унікальними властивостями будови цеоліту, який має наскрізно-канальну внутрішньокристалічну порову структуру.

Таблиця 3.1

Міцність дрібнозернистих бетонів з добавкою мінеральних компонентів різної дисперсності

Назва складу	Вміст мінеральних компонентів, мас.%				В/Ц	Міцність на згин, МПа, у віці, діб			Міцність на стиск, МПа, у віці, діб		
	ЦТК	ЦПК	ПТК	ППК*		2	7	28	2	7	28
Др	0	-	0	-	0,45	4,9	5,2	7,5	29,4	41,8	54,1
ДрЦТК	10	-	-	-	0,47	4,2	5,0	7,9	27,1	39,9	53,6
ДрППК	-	-	10	-	0,49	5,6	6,1	7,7	27,9	39,1	51,9
ДрЦПК		10	-	-	0,49	4,4	5,1	8,2	27,7	38,2	52,7
ДрППК	-	-	-	10	0,52	3,9	4,5	6,8	23,4	33,9	48,8

*дозування за об'ємом

Таким чином, цеолітовий полідисперсний компонент, маючи пуцоланічні властивості, забезпечує формування щільної міцної структури бетону.

3.2 Дослідження активності мінеральних компонентів різної дисперсності

В технології виробництва високоміцних бетонів широко використовуються активні мінеральні добавки. Залежно від природи та складу вони мають різну активність. Активність мінеральних добавок визначається їх здатністю вступати

в хімічну взаємодію з продуктами гідратації портландцементу, і в першу чергу з $\text{Ca}(\text{OH})_2$, з утворенням фаз, що мають в'язучі властивості.

Цеоліт і перліт належать до лугомістких кремнеземистих середньоалюмінатних мінеральних добавок пуцоланічної дії [13]. Їх активність зумовлена присутністю хімічно і термодинамічно нестійких фаз.

Суттєвий вплив на активність мінеральних добавок має також їх дисперсність. Із збільшенням тонини помолу відбувається зростання активності, оскільки процеси взаємодії починаються у поверхневих шарах частинок добавок і лише з часом просуваються вглиб. Але при цьому відбувається збільшення водопотреби [38], що негативно впливає на будівельно-експлуатаційні властивості бетонів з мінеральними добавками.

Активність цеолітового та перлітового компонентів різної дисперсності визначали згідно класичної методики за поглинанням CaO з насичених розчинів протягом 28 діб, а також в модельних в'язучих системах [44].

Встановлено, що із збільшенням дисперсності відбувається закономірне зростання активності обох добавок за кількістю зв'язаного вапна (табл. 3.2), та підтверджується результатами рентгенофазового аналізу (рис. 3.4). Так, на дифрактограмах системи « $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -цеоліт» через 28 діб гідратації спостерігається суттєве зменшення інтенсивності ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (0,49; 0,263 нм) за присутності в її складі тонкодисперсного цеоліту ЦТК порівняно з полідисперсним ЦПК.

Визначення в'язучих властивостей модельних систем « CaO – мінеральний компонент» на зразках складу 1:1 підтвердило їх високу активність, проте

встановлено, що перлітмісткі склади поступаються за міцністю цеолітмістким. В той же час, зразки, до складу яких входили полідисперсні мінеральні компоненти ЦПК і ППК, що характеризуються меншою активністю за поглинанням СаО, показали більші значення міцності як на стиск, так і, особливо, на розтяг при згині (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

**Властивості модельних в'язучих систем
«СаО - дисперсний мінеральний компонент»**

Мінеральний компонент	Активність за поглинанням СаО, мг/г	В/Г	Границя міцності у віці 28 діб, МПа	
			Рзг	Рст
ЦТК	307	0,45	1,4	10,2
ЦПК	270	0,41	2,5	14,8
ПТК	192	0,53	0,6	6,7
ППК	165	0,48	0,9	7,9

Таким чином, кореляції між рівнем активності мінеральних компонентів різної дисперсності за поглинанням СаО та міцністю не спостерігається.

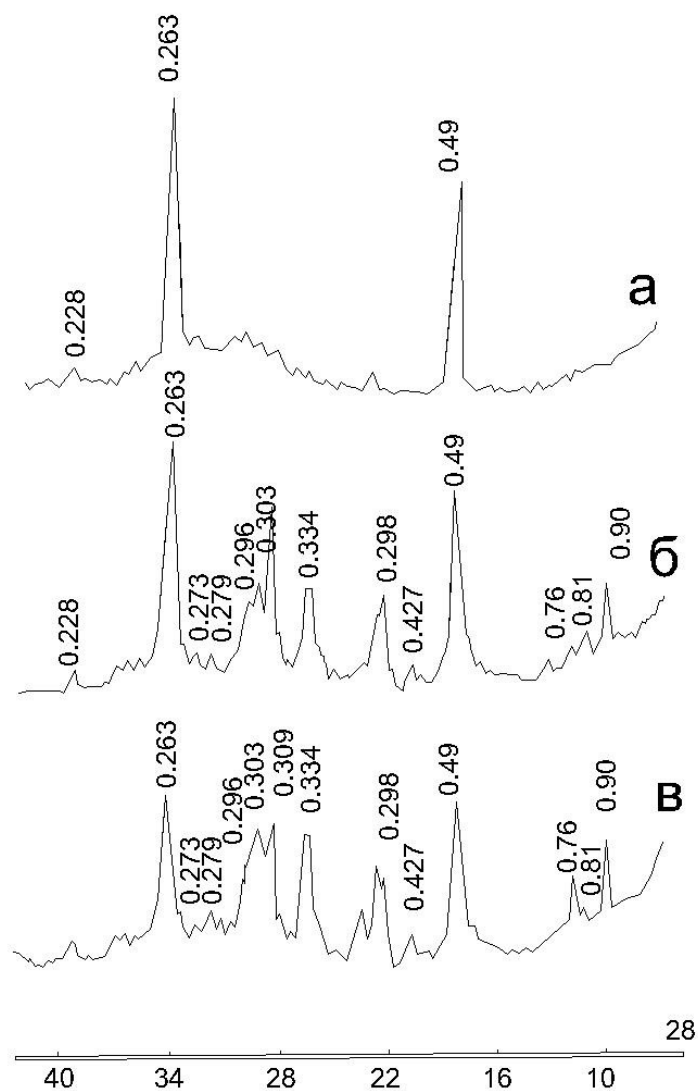


Рисунок 3.4 - Дифрактограми модельних систем, гідратованих 28 діб:

а - $\text{Ca}(\text{OH})_2$; б – $\text{CaO} + \text{ЦПК} (1:1)$; в – $\text{CaO} + \text{ЦТК} (1:1)$

Приймаючи до уваги, що мінеральні добавки в складі портландцементу проявляють свої пуцоланічні властивості за набагато складнішою схемою [55], їх активність досліджувалась також за європейськими нормами EN-450-1:2009 на стандартних зразках 40x40x160 мм складу 1:3 із заміною 10 мас.% ПЦ I-500 на цеолітовий та перлітовий компоненти різного гранулометричного складу. Згідно вимог, через 28 діб тверднення значення коефіцієнта пуцоланічної активності повинно становити $K_{\text{па}}^{28} \geq 0,75$, а через 90 діб тверднення $K_{\text{па}}^{90} \geq 0,85$

За результатами випробувань (табл. 3.3) визначено пуцоланову реакційну здатність мінеральних добавок за коефіцієнтом пуцоланічної активності (3.1).

$$K_{\text{па}} = \frac{R_{\text{мін.добавок}}}{R_{\text{без добавок}}} \quad (3.1)$$

Отримані коефіцієнти пуцоланічної активності вказують на її високий рівень для цеолітового компоненту і дещо нижчий для перлітового. З часом тверднення коефіцієнти пуцоланічної активності зростають. При цьому характерним є збільшення коефіцієнта пуцоланічної активності при випробуванні на розтяг при згині полідисперсного цеолітового компоненту ЦПК порівняно з тонкодисперсним ЦТК.

Таблиця 3.3

Пуцоланічна активність полідисперсних мінеральних компонентів

В'язуче	Склад, об. %	РК, мм	Міцність на згин/стиск, Мпа, у віці, діб		K _{па} ²⁸ , згин/стиск	K _{па} ⁹⁰ , згин/стиск
			28	90		
ПЦ I – 500	100	190	6,9/53,0	7,3/56,5	-	-
ПЦ I – 500 ЦТК	90 10	185	7,4/49,8	8,0/56,9	1,07/0,94	1,10/1,01
ПЦ I – 500 ЦПК	90 10	175	7,6/48,7	8,3/53,4	1,1/0,92	1,14/0,95
ПЦ I – 500 ПТК	90 10	180	7,2/46,7	7,4/50,6	1,04/0,88	1,01/0,90
ПЦ I – 500 ППК	90 10	165	6,5/45,6	7,0/49,7	0,94/0,86	0,96/0,88

Аналізуючи отримані показники міцності, слід відзначити, що в цілому, незалежно від дисперсності, міцність цементів з добавкою цеоліту є більшою порівняно з перлітмісткими складами. А що стосується міцності на розтяг при згині складів з добавкою цеолітового компонента, то її значення навіть перевищує міцність цементу ПЦ I-500 (табл. 3.3).

3.2 Вплив мінеральних компонентів різної дисперсності на властивості цементу

Дослідження впливу добавок цеоліту і перліту різної дисперсності на властивості портландцементу проводилось на складах, які включали 10 мас. %

дисперсних мінеральних компонентів і 90 мас.% портландцементу ПЦ I-500 і маркувались відповідно ПЦ I+ЦПК, ПЦ I+ППК, ПЦ I+ЦТК, ПЦ I+ПТК (рис. 3.5-3.8).

При визначенні водопотреби досліджуваних цементів встановлено (рис.3.5), що із введенням до їх складу мінеральних добавок незалежно від їх дисперсності і виду, відбувається збільшення водопотреби. Порівнюючи вплив цеолітового і перлітового компонентів, слід відзначити, що добавка перліту спричиняє суттєвіше зростання водопотреби – на 3-6% порівняно з добавкою цеоліту, де це зростання становить 2-3%. Полідисперсні мінеральні добавки, як ЦПК, так і, особливо, ППК в найбільшій мірі збільшують водопотребу цементу (рис. 3.5). Це знаходить своє пояснення у більш розвинутій поровій структурі полідисперсних компонентів порівняно з тонкодисперсними.

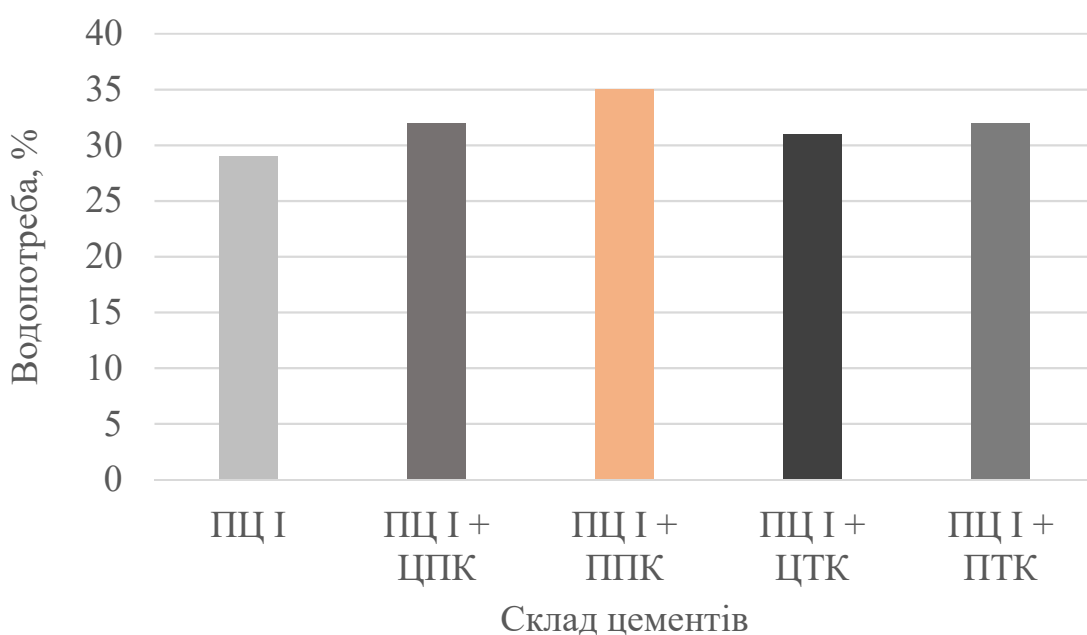


Рисунок 3.5 - Водопотреба цементів з добавкою 10 мас.% цеоліту та перліту різної дисперсності

Беручи до уваги збільшення водопотреби цементів з добавкою полідисперсних мінеральних компонентів, важливого значення набуває визначення їх водоутримувальної здатності, яка забезпечує рівномірний

розподіл води у тверднучій системі. Як видно з результатів, наведених на рис. 3.6, введення до складу цементу всіх досліджуваних мінеральних компонентів покращує їх водоутримувальну здатність. При цьому мінімальним водовідділенням характеризуються цементи з добавкою полідисперсного цеоліту і перліту. Це пояснюється більш збереженою в процесі їх розмелювання пористістю, за рахунок якої під дією капілярних сил в цементі утримується додаткова кількість води.

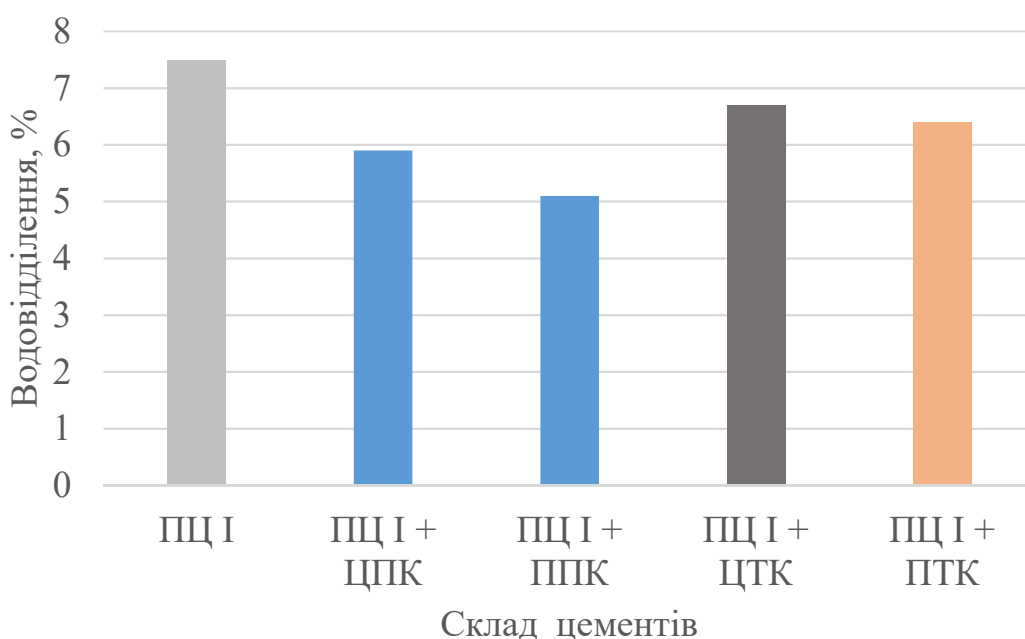


Рисунок 3.6 - Водовідділення цементів з добавкою 10 мас.% цеоліту та перліту різної дисперсності

Аналізуючи вплив цеолітового і перлітового мінеральних компонентів різної дисперсності на терміни тужавіння цементів, слід відзначити їх деяке скорочення (рис. 3.7), особливо характерне для тонкодисперсних перліт- і цеолітмістких складів, що становить 20-25 хв і 10-15 хв відповідно. Причиною скорочення термінів тужавіння, особливо його кінця, є швидка втрата пластичності сумішей через поступове поглинання пористими тонкодисперсними мінеральними компонентами води замішування. У складах, що містили полідисперсні цеоліт і перліт, ця величина не перевищувала 5-10 хв.

Розширення, визначене за методом Ле Шательє, для всіх цементів було в межах 1 мм, що відповідає вимогам стандарту EN 197-1.

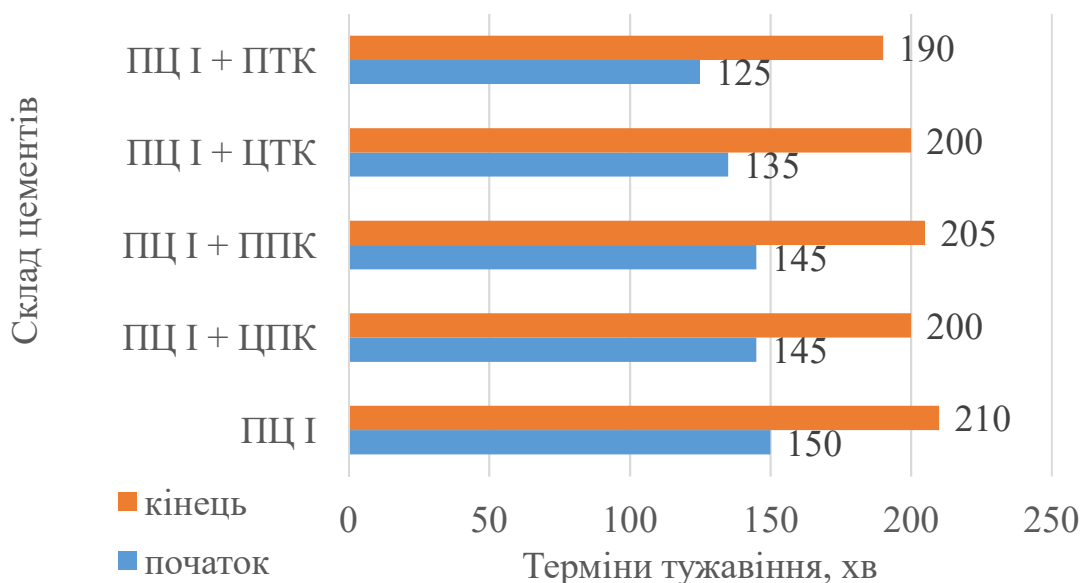


Рисунок 3.7 - Терміни тужавіння цементів з добавкою 10 мас.% цеоліту та перліту різної дисперсності

Для того, щоб оцінити і порівняти активність мінеральних компонентів різного складу і різної дисперсності, не у вапняних (табл 3.2), а у реальних тверднучих в часі цементних системах, досліджували вплив цеолітового і перлітового мінеральних компонентів різної дисперсності на міцність зразків з тіста нормальної густоти, що тверднули в нормальних умовах (рис. 3.8).

В початковий період тверднення міцність усіх цементів, незалежно від виду і дисперсності мінеральних добавок, поступається цементу ПЦ I-500. Але з часом тверднення розрив в показниках міцності між ними зменшується, і після 28 діб цементи з добавкою цеолітового полідисперсного компонента, дещо в меншій мірі з добавкою тонкодисперсним цеолітового і перлітового о компонентів досягають міцності ПЦ I-500. А через 42 доби тверднення міцність цементу, що містить 10 мас.% цеолітового полідисперсного компонента перевищує міцність ПЦ I-500 (рис. 3.8). Винятком є лише цемент з добавкою полідисперсного перлітового компонента, який має найнижчу міцність, що пояснюється не лише

його підвищеною водопотребою, але й малою міцністю часток перліта в його складі (табл. 2.7).

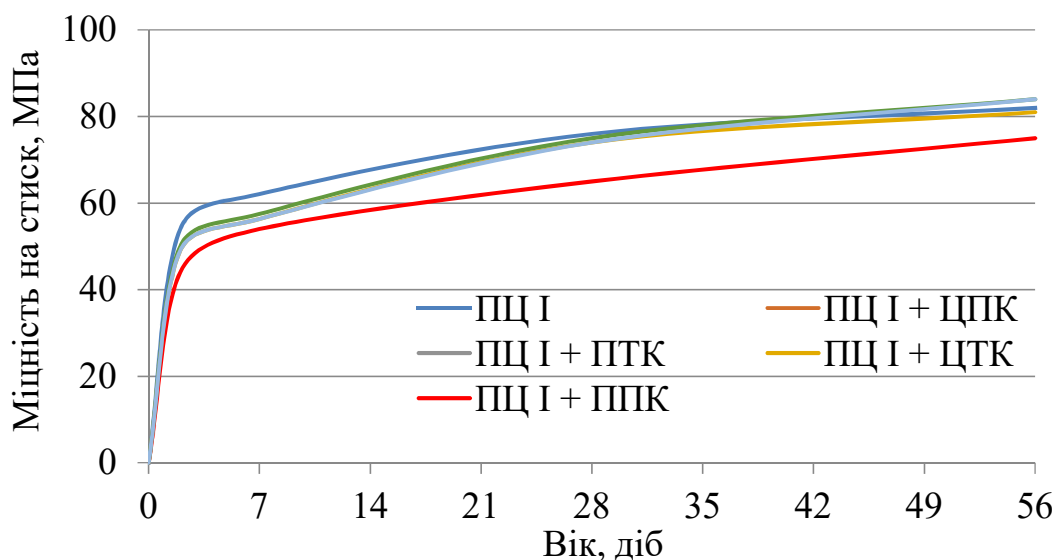


Рис. 3.8 - Міцність на стиск цементу з добавкою 10 мас.% цеоліту та перліту різної дисперсності

Таким чином, серед досліджених мінеральних добавок різної дисперсності, найбільшою активністю, яка зростає в часі, характеризуються цеолітові компоненти, і особливо полідисперсний цеолітовий компонент ЦПК.

3.4 Вплив полідисперсних мінеральних компонентів на процеси гідратації і мікроструктуру цементної матриці

Серед багатьох чинників, що визначають міцність і довговічність бетону, важливе місце належить направленому формуванню мікроструктури цементного каменю в напрямку досягнення щільної дрібнокристалічної структури з розвинутою гелевою складовою, мінімальною кількістю дрібних рівномірно розподілених сферичних пор. Ефективним засобом впливу на структуру бетону

на мікрорівні є його модифікування хімічними добавками і дрібнодисперсними наповнювачами.

Дослідження процесів гідратації цементу з добавкою цеоліту підтвердили його унікальні властивості. Будучи активними елементами цементної матриці (табл. 3.2) і маючи наскрізно-каналну внутрішньокристалічну пористість, доступну для молекул води, частинки цеоліту на початкових стадіях гідратації забезпечують інтенсивне зародкоутворення. Тобто на відміну від традиційних активних мінеральних добавок, при гідратації яких на поверхні частинок утворюються протекторні шари, що сповільнюють процеси структуроутворення у випадку цеоліта пуцоланічна взаємодія відбувається в об'ємі кожної частинки. При цьому зародки гідратних новоутворень не зрощуються з поверхнею цеоліта, а виділяються в об'єм тверднучої системи в результаті чого формується щільна тонкокристалічна однорідна структура цементного каменю (рис. 3.9). Загалом відомо, що цеолітовмісні цементи мають в 1,5-2 рази більшу поверхню гідратних утворень, ніж цемент без добавок [42].

Відсутність або дуже повільне накопичення протекторних шарів гідратних новоутворень на поверхні частинок цементу простору зумовлює прискорення реакцій гідратації і збільшення його міцності. Крім того, в результаті масопереносу в просторовій поровій структурі цеоліту формується міцна контактна взаємодія між частинками тверднучої системи, в результаті чого відбувається краще заповнення і заростання контактних зон, утворюється щільна дрібнопориста структура цементного каменю [43].

Внаслідок мембранного ефекту, іонний склад та концентрація рідкої фази біля частинок цеоліту відрізняється від складу і концентрації рідкої фази в об'ємі тверднучої системи. Наявність зазначених градієнтів в процесі тверднення зумовлює утворення текстур з орієнтованим ростом гідратних новоутворень.

За результатами рентгенофазового аналізу (рис. 3.9) встановлено що при гідратації цементу без добавок на дифрактограмі поряд негідратованого цементу ($d/n=0,276; 0,273; 0,187$ нм) спостерігаються лінії гідроксиду кальцію ($d/n=0,263; 0,493$ нм), а також лінії еtringіту незначної інтенсивності (рис. 3.9, а). Введення

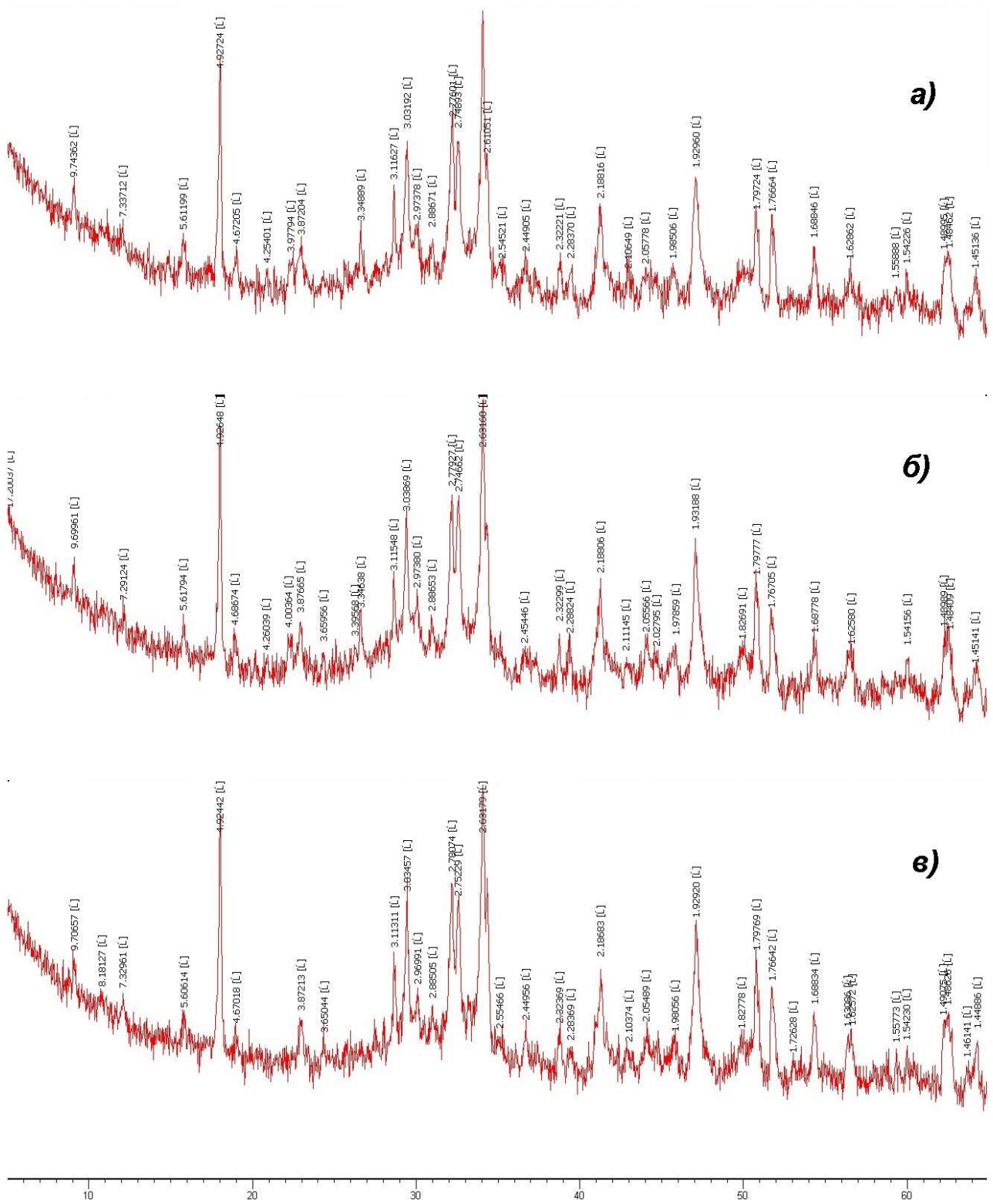


Рисунок 3.9 - Дифрактограми цементного каменю гідратованого 28 діб в нормальних умовах: а) без добавок; б) з добавкою 10 мас% ЦПК; в) з добавкою 10 мас% ЦПК + 1,0% пластифікувальної добавки Sika Viscocrete 5320 + 0,01 мас% повітрягувальної добавки Sikanol A

добавки ЦПК призводить до зменшення ліній інтенсивності $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та зростання ліній гідросульфоалюмінату кальцію (рис. 3.9, б), що пояснюється взаємодією активного Al_2O_3 цеоліту з гідроксидом кальцію, що в присутності гіпсу сприяє утворенню додаткової кількості еtringіту. Також фіксуються лінії гідросульфоалюмінатів кальцію, а також лінії гексагональних гідрокарбоалюмінатів кальцію незначної інтенсивності. При додатковому введенні в систему хімічних добавок пластифікувально-повітровтягувальної дії фазовий склад продуктів гідратації не змінюється (рис. 3.9, в).

Ефективність використання цеоліту в цементних композиціях підтверджують також результати термічного аналізу (рис. 3.10). На кривих ДТА фіксуються ендоефекти в області температур 100, 500 та 720⁰С.

Перший ендоефект відповідає виділенню води з гідросилікатів та гідросульфоалюмінатів кальцію, другий - розкладу гідроксиду кальцію, третій проявляється внаслідок розкладу гідрокарбоалюмінатів кальцію. Зменшення ендоефекту при 500⁰С для зразка, що містить цеоліт, свідчить про зменшення вмісту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ внаслідок його пуцоланічної взаємодії з мінеральною добавкою.

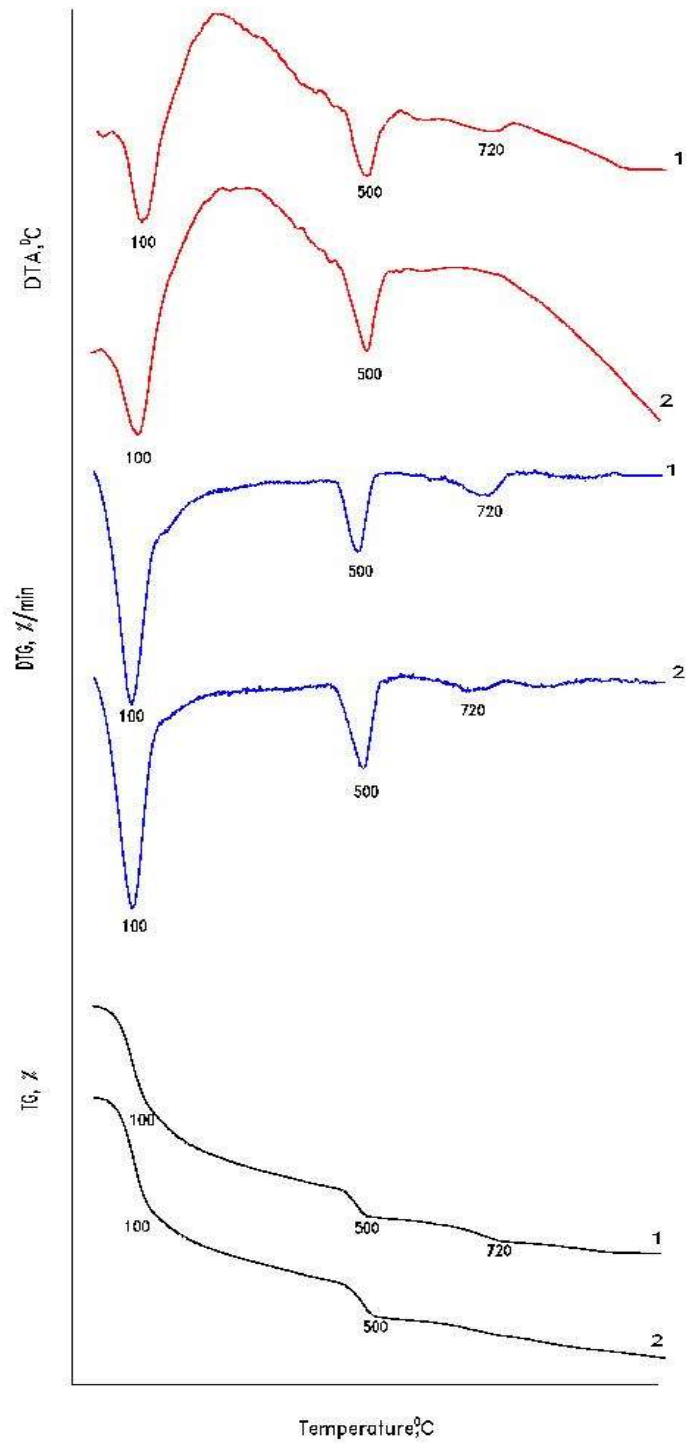


Рисунок 3.10 - Дериватограми цементного каменю гідратованого 28 діб: 1- з добавкою 10 мас% ЦПК, 2- без добавок

Як показали результати електронно-мікроскопічних досліджень, при введенні до складу цементу цеолітових мінеральних компонентів відбувається зміна габітусу і морфології гідратних новоутворень. Так, в їх структурі повністю відсутня блочно-ритмічна структура, характерна для портландцементу ПЦ 1-500, не спостерігаються крупні структурні елементи портлантиду $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рис. 3.11).

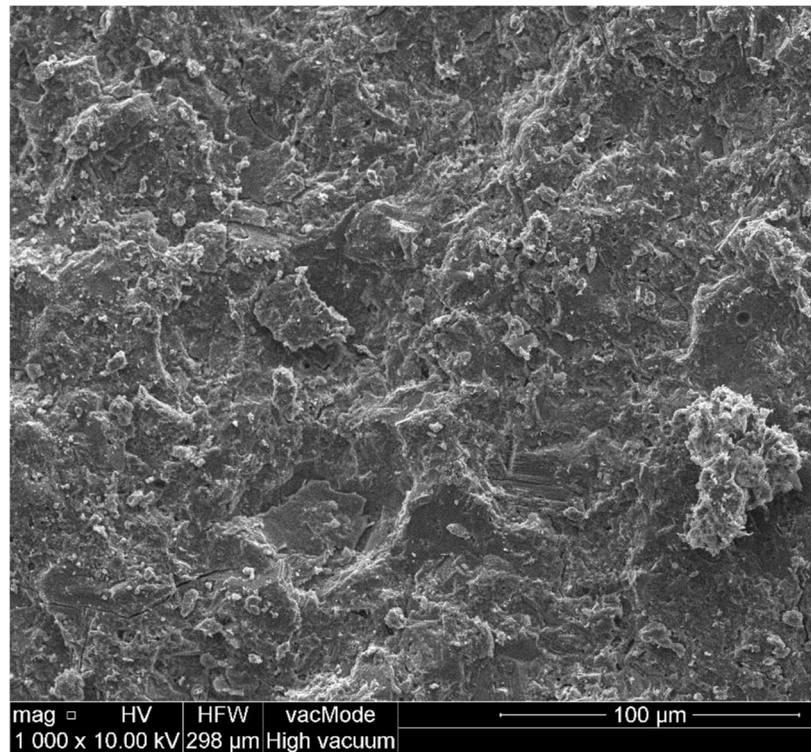


Рисунок 3.11 - Мікроструктура цементного каменю з добавкою полідисперсного цеолітового компоненту, гідратованого 28 діб в нормальних умовах

Натомість відзначається менша закристалізованість гідратних фаз, утворення дрібнокристалічної дрібнопористої структури (рис. 3.12, а), насиченої гелеподібними та субмікрокристалічними голчасто-волокнистими низькоосновними кристалами гідросилікатів кальцію $\text{CSH}(\text{I})$ (рис. 3.12, б), що армують зони контактної взаємодії та кольматують поровий простір (рис. 3.12, в), зменшуючи кількість дефектів та дислокацій, підвищують опір руйнуванню та збільшують міцність на розтяг при згині (табл. 3.2).

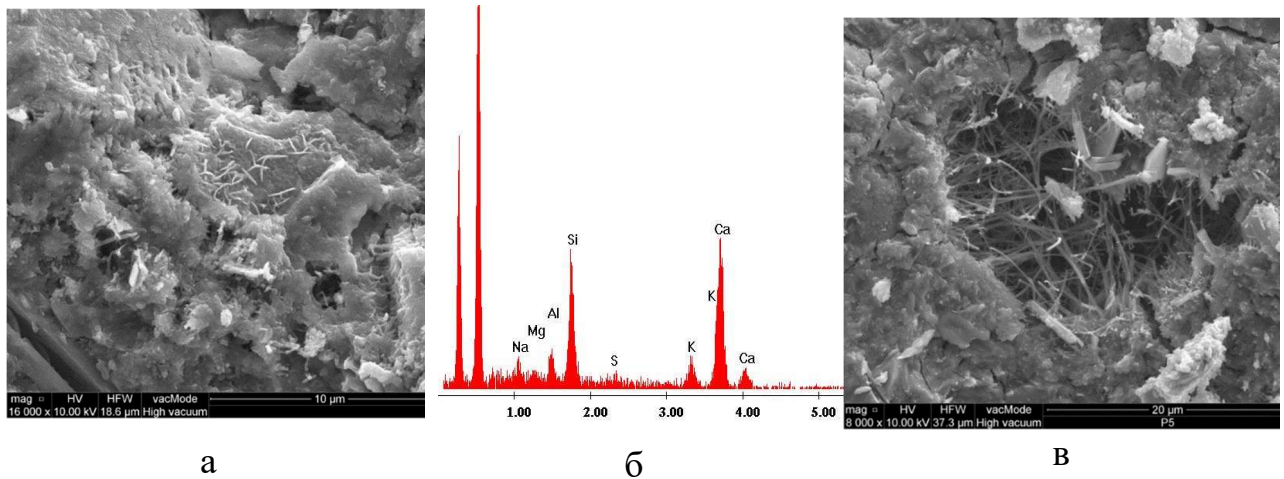


Рис. 3.12 - Мікроструктура (а), спектр рентгенівського випромінювання (б) та характер заростання пор (в) цементного каменю з добавкою цеолітового компонента, гідратованого 28 діб в нормальних умовах

Крім того наявність адсорбованої рухливої води у відкритій наскрізно-канальній поровій структурі частинок полідисперсного цеоліту, створює резерв води, яка під дією капілярних сил здатна виділятися в об'єм тверднучої системи та забезпечувати повноту протікання процесів гідратації. Це пояснює збільшення міцності цементу з полідисперсним цеолітовим компонентом порівняно з тонкодисперсним (табл. 3.2), адже в процесі тонкого помолу відбувається часткове руйнування порової структури цеоліту. Тому, застосування тонкого і надтонкого помолу цеоліту є невиправданим.

Цеоліт, який є джерелом активних Al_2O_3 і SiO_2 , утворює в процесі гідратації і тверднення додаткову кількість структурно-активних AF-t і AF-m фаз, які є додатковим резервом міцності.

Про активну структуроутворюючу роль цеоліту в процесі гідратації свідчить також швидке заростання пор і дефектів в структурі цементного каменю суб-мікросталічними голчасто-волокнистими кристалами низькоосновних гідросилікатів кальцію (рис. 3.13) та видовженими призматичними кристалами еtringіту (рис. 3.14) підвищується адгезійна міцність в контактних зонах.

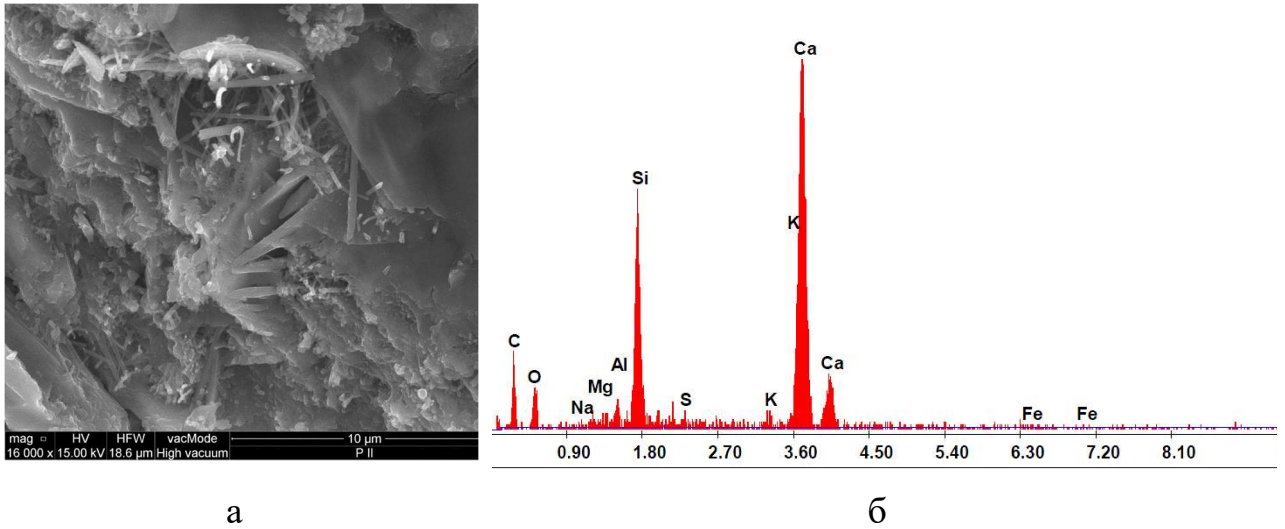


Рисунок 3.13 - Мікрофотографія заростання дефектів структури (а) та спектр рентгенівського випромінювання (б) портландцементного каменю з добавкою 10 мас.% ЦПК, що тверднув 28 діб в нормальних умовах.

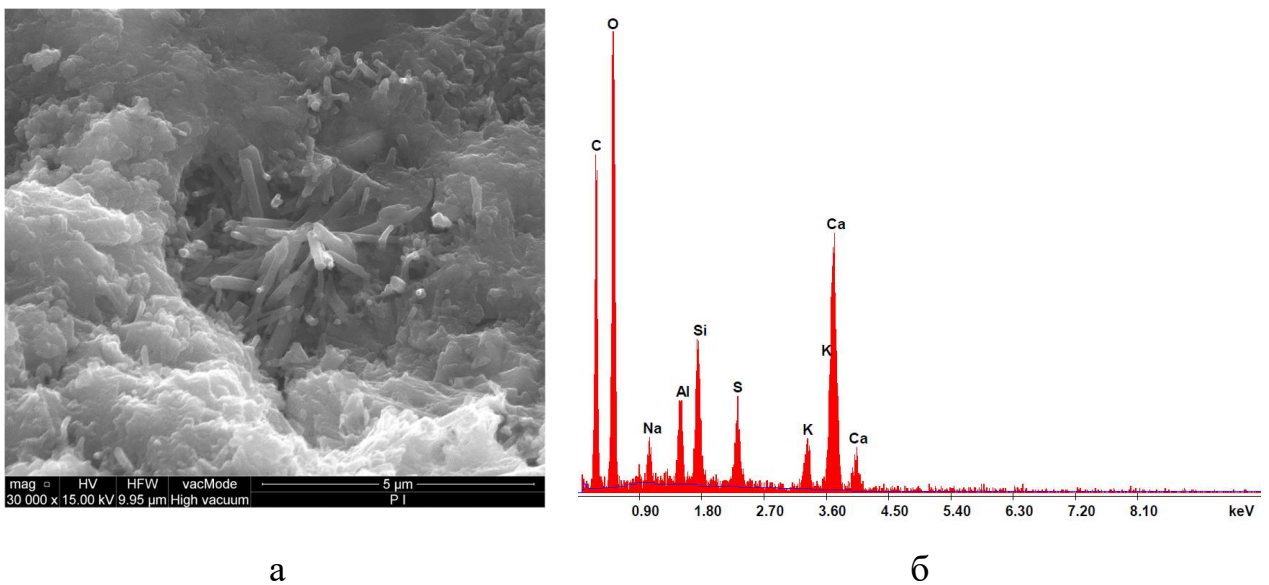


Рисунок 3.14 - Мікрофотографія портландцементного каменю (а) та спектр рентгенівського випромінювання (б) з добавкою 10 мас.% ЦПК, що тверднув 28 діб в нормальних умовах.

Таким чином, полідисперсний цеолітовий компонент покращуючи щільність упакування частинок та активізуючи поровий простір на

мезоструктурному рівні, також позитивно впливає на мікроструктуру цементної матриці.

Висновки до розділу 3

1. Визначено, що максимуми на диференційних кривих розподілу частинок полідисперсних компонентів знаходяться в інтервалі 100-400 та 100-300 мкм для ЦПК та ППК відповідно, що, на відміну від тонкодисперсних цеоліту та перліту, дає змогу заповнити нестачу відповідних фракцій у діапазоні між основним об'ємом частинок цементу (0,1-60 мкм) і піску (>16 мкм), а відтак забезпечує формування більш компактної мезоструктури бетону та впорядковує тим самим його поровий простір.

2. Встановлено, що незважаючи на вищу активність за поглинанням СаО тонкодисперсних цеоліту та перліту (307 та 270 мг/г) порівняно полідисперсними (192 та 165 мг/г для ЦПК і ППК відповідно), найвищим індексом пуцоланічної активності за міцністю на згин ($K_{па}^{90} = 1,14$) характеризується склад з ЦПК.

3. Виявлено, що незважаючи на дрібнозернисті бетони складу 1:2 з добавками цеоліту характеризуються вищою міцністю на розтяг при згині ($\Delta R_{tb} = 5-9\%$) порівняно з бетоном контрольного складу, що зумовлено його здатністю акумулювати воду в процесі перемішування, зменшуючи дійсне В/Ц відношення сумішей. Менша міцність бетону із полідисперсним спученим перлітом ($\Delta R_{tb} = 9\%$, $\Delta R_c = 10\%$) зумовлена незадовільними механічними характеристиками цього компоненту.

4. Показано, що частинки цеоліту, маючи наскрізно-каналъну внутрішньокристалічну порову структуру, забезпечують високий рівень масопереносу, інтенсивне зародкоутворення та формування міцної контактної взаємодії між частинками тверднучої системи, в результаті чого утворюється щільна дрібнопориста структура цементного каменю, насичена гелеподібними

та субмікросталічними голчасто-волокнистими низькоосновними гідросилікатами кальцію CSH(I), що армують зони контактної взаємодії та колюматують поровий простір.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СКЛАДІВ ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ З ФУНКЦІЄЮ ВНУТРІШНЬОГО ДОГЛЯДУ

4.1 Оптимізація складу бетонів транспортного призначення за критеріями міцності

Дорожні цементні бетони з необхідними експлуатаційними властивостями і високою довговічністю виготовляють із застосуванням відповідних цементів, заповнювачів і добавок. Цемент у бетоні для дорожніх і аеродромних покриттів повинен витримувати дію різноманітних агресивних середовищ, в яких він може експлуатуватись.

Забезпечення заданих у проекті нормативних характеристик дорожнього бетону досягається проектуванням необхідного складу бетонної суміші, вибором необхідних технологічних режимів при її виготовленні, транспортуванні й ущільненні, а також догляді за бетоном. На якість ущільнення бетонної суміші суттєвий вплив здійснює легкоукладальність бетонної суміші, яка вибирається з урахуванням прийнятого способу й обладнання для бетонування. Для будівництва дорожніх основ і покриттів на ділянках, де використання бетоноукладальних машин неможливо або недоцільно через їх малу площу, важкі умови будівництва і т.д. застосовують пластичні бетонні суміші [60].

Для одержання високоміцних бетонів транспортного призначення та оптимізації їх складу запроектовано бетонної суміші з маркою за легкоукладальністю S3 номінального складу 1:1,7:3,5 з витратою портландцементу 350 кг/м³. Кількість води підбиралась експериментальним шляхом для забезпечення проектної марки за легкоукладальністю.

З метою забезпечення оптимального співвідношення між хімічною добавкою та полідисперсним мінеральним компонентом для отримання бетону з покращеними експлуатаційними властивостями, проведено оптимізацію бетону

в заданому інтервалі зміни кількісного співвідношення ЦПК x_1 (0 – 20 об.%) та добавки Sika ViscoCrete 5320 x_2 (0,7 - 1,3 мас.%) методом статистичної математичної обробки результатів, а саме методом ортогонально центрально-композиційного планування (ОЦКП). Такі методи дозволяють скоротити час проведення експерименту, його вартість, впорядкувати пошук оптимальних умов, отримати математичну модель об'єкту дослідження. Принципові основи використання статистичних моделей у вирішенні технологічних завдань висвітлені в роботах [44, 89].

Суть планування експериментів з використанням цього методу полягає у встановленні математичної залежності між заданими властивостями і складом чи витратою матеріалів.

Завданням методу математичного планування експерименту в даній роботі є:

оцінка ступені впливу керуючих факторів і встановлення їх взаємодії;

пошук оптимальних умов протікання процесів;

уточнення відомих уявлень про досліджений об'єкт;

Метод ОЦКП дає можливість отримати математичний опис процесу рівнянням регресії:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (4.1)$$

де x_1, x_2 – значення факторів, що змінюються.

Коефіцієнти регресії в методі ОЦКП розраховуються за наступними формулами:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y(i) \quad ; \quad (4.2) \quad b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_1(i)x_2(i)}{\sum_{i=1}^n (x_1(i)x_2(i))^2} \quad ; \quad (4.3)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_1(i)}{\sum_{i=1}^n x_1(i)^2} \quad ; \quad (4.4) \quad b_{11} = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_1^*(i)}{\sum_{i=1}^n x_1^*(i)^2} \quad ; \quad (4.5)$$

$$v_2 = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_2(i)}{\sum_{i=1}^n x_2(i)^2}; \quad (4.6) \qquad v_{22} = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_2^*(i)}{\sum_{i=1}^n x_2^*(i)^2}; \quad (4.7)$$

$$x_1^*(i) = x_1(i) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_1(i); \quad (4.8) \qquad x_2^*(i) = x_2(i) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_2(i); \quad (4.9)$$

Матриця двофакторного математичного планування експерименту із значеннями x_i^* наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Матриця двофакторного математичного планування експерименту із значеннями x_i^*

№ досліджу	Системи дослідів	x_1	x_2	x_1^*	x_2^*
1	Повний двофакторний експеримент	-1	-1	0,33	0,33
2		1	-1	0,33	0,33
3		-1	1	0,33	0,33
4		1	1	0,33	0,33
5	Досліди в зіркових точках	1	0	0,33	-0,67
6		-1	0	0,33	-0,67
7		0	1	-0,67	0,33
8		0	-1	-0,67	0,33
9	Центр плану	0	0	-0,67	-0,67

Основні характеристики плану експерименту наведені в табл. 4.2. При плануванні експерименту вибрані наступні контрольні параметри (функції відгуку):

Y_1, Y_2, Y_3 – границі міцності на розтяг при згині через 28 діб тверднення та при стиску через 7 і 28 діб тверднення в нормальних умовах відповідно.

Розрахунок коефіцієнтів регресії для отриманих результатів проведений за формулами 4.1-7, а також побудова ліній міцності при $y = \text{const}$ виконана на ПК за спеціально складеними програмами. В програмі використано матричний підхід до регресивного аналізу і знаходження коефіцієнтів регресії.

За результатами фізико-механічних випробувань цементів (табл. 4.4) встановлено, що в залежності від співвідношення добавок спостерігається їх різний вплив на фізико-механічні властивості бетонів.

Таблиця 4.2

Характеристика плану експерименту

Характеристика	Вміст додатків мас.%	
	Sika ViscoCrete 5320 (X_1), мас.%	ЦПК (X_2), мас.%
Основний рівень "0"	1,0	10
Нижній рівень "-1"	0,7	0
Верхній рівень "+1"	1,3	20

Отримані результати розрахунку коефіцієнтів регресії приведені в табл. 4.3. Аналіз приведених коефіцієнтів дозволяє зробити ряд технологічних висновків. Так, від'ємні знаки при коефіцієнтах регресії b_1 та b_{12} вказують на негативний вплив ЦПК та сумісної дії його та хімічної добавки на міцність у початковий період тверднення бетонів (7 доба) і позитивний у подальші терміни (28 діб). Максимальний вміст ЦПК (коефіцієнт b_{11}) а також хімічного додатку викликає негативну дію на показники міцності бетону протягом усього періоду тверднення, про що свідчать знаки при коефіцієнтах регресії.

На основі отриманих коефіцієнтів складені рівняння регресії, досліджуваних функцій ($Y_1...Y_3$) за формулою (4.1). На основі одержаних рівнянь регресії побудовані ізолінії міцності через 3, 7 і 28 діб тверднення ($Y_1, Y_2, Y_3, =\text{const}$) (рис. 4.1-3).

Коефіцієнти регресії

Функції відгуку	Коефіцієнти регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
Y_1	37,967	-2,833	-2,633	-4,200	-2,100	0,550
Y_2	54,400	-0,333	-3,150	-1,700	-3,750	-0,400
Y_3	70,756	0,233	-6,300	-1,533	-7,633	-0,350

Аналіз отриманих математичних залежностей, а також їх графічна інтерпретація, дозволяють визначити оптимальні кількості мінеральної добавки (цеоліту) та хімічної добавки – Sika ViscoCrete 5320, які становлять відповідно 10 мас. % ЦПК та 1,0 мас.% добавки Sika ViscoCrete 5320, що забезпечує високу ранню і марочну міцність при рухливості бетонної суміші 10-14 см.

Отже, в результаті проведених досліджень встановлено, що важливе значення в процесі формування міцності бетону має встановлення оптимальної кількості компонентів бетону, а саме мінеральної та хімічної добавок.

Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

№ п/п	Матриця планування						ViscoCrete 5320, мас.%	ЦПК, об.%	Границя міцності зразків на стиск, у віці 28 діб МПа	Границя міцності зразків на стиск, МПа, у віці, діб	
	x0	x1	x2	x1 x2	x ₁ ²	x ₂ ²				7	28
1	1	1	1	1	1	1	1,3	20	7,1	45,7	55,5
2	1	-1	1	-1	1	1	0,7	20	6,9	46,1	55,8
3	1	1	-1	-1	1	1	1,3	0	6,6	53,0	68,3
4	1	-1	-1	1	1	1	0,7	0	6,6	51,8	67,2
5	1	-1	0	0	1	0	0,7	10	7,1	53,7	68,7
6	1	1	0	0	1	0	1,3	10	7,3	50,9	69,3
7	1	0	-1	0	0	1	1,0	0	6,8	53,2	69,7
8	1	0	1	0	0	1	1,0	20	7,4	47,3	56,1
9	1	0	0	0	0	0	1,0	10	7,6	55,2	71,2

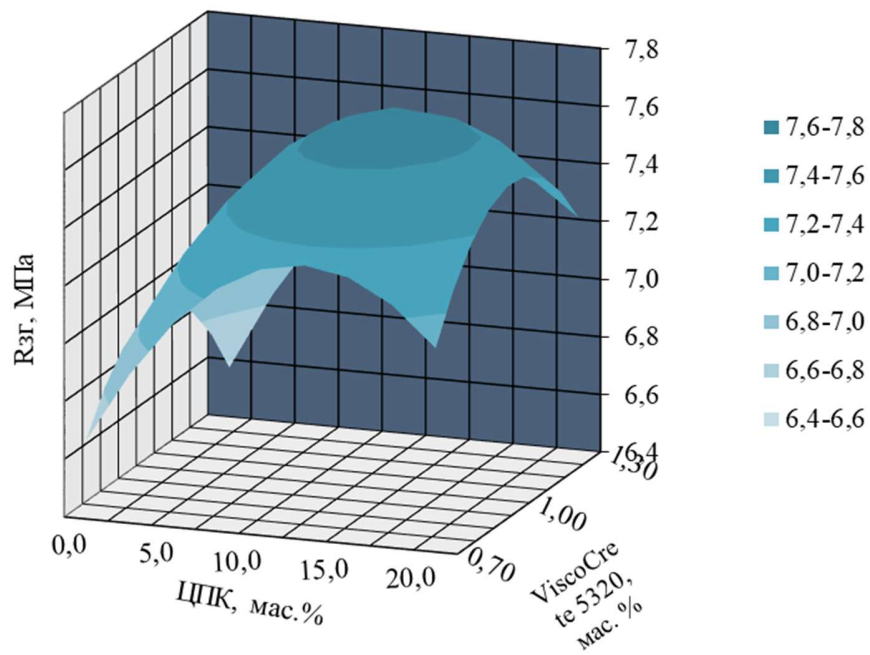


Рисунок 4.1 - Ізолінії рівної міцності на розтяг при згині бетону у віці 28 діб

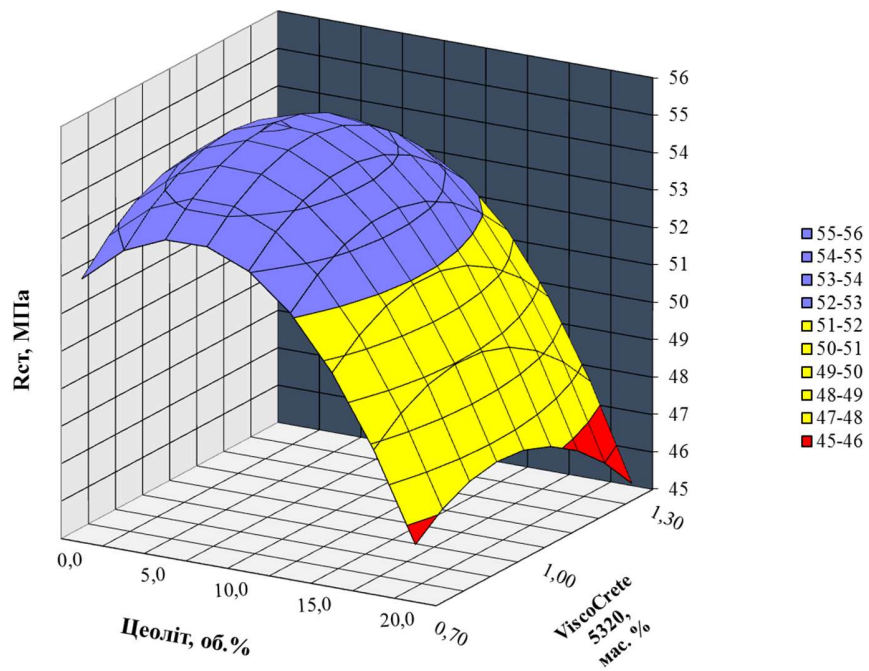


Рисунок 4.2 - Ізолінії рівної міцності при стиску бетону у віці 7 діб

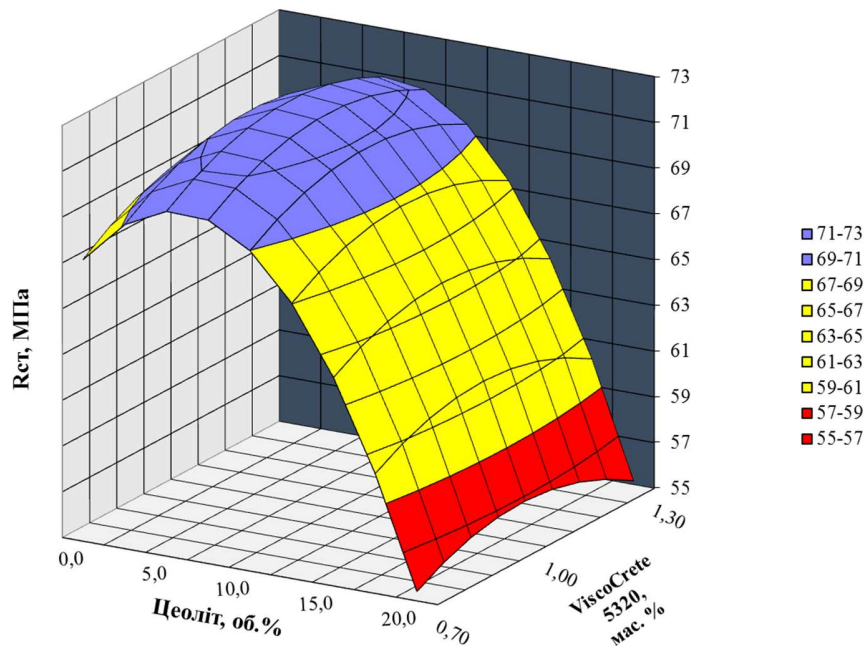


Рисунок 4.3 - Ізолінії рівної міцності бетону при стиску у віці 28 діб

4.2 Дослідження високоміцних бетонів на основі пластичних бетонних сумішей

Технологія будівництва дорожніх і аеродромних покриттів переважно передбачає використання жорстких або малорухливих бетонних сумішей з наступним вкладанням та ущільненням їх за допомогою комплексів з ковзними формами. Проте на ринку дорожньо-будівельного виробництва України присутні небагато підрядників, які мають у своєму розпорядженні такі комплекси. Тому актуальним завданням є розробка бетонів на основі сумішей з маркою за легковкладальністю S3, які можливо вкласти без дороговартісної спецтехніки, засобами малої механізації, водночас забезпечити разом із необхідними характеристиками міцності покриття високі показники довговічності бетону.

З цією метою запроектовано чотири склади високоміцних бетонів: контрольна суміш К і Пв (містить суперпластифікатор та повітровтягувальну добавку) та дві суміші (ЦПК, ЦПКПв), що містять оптимальну кількість ЦПК (10 мас.%) та суперпластифікатора (1 мас.%). Склади бетонів представлені в табл. 4.5.

Тенденція зростання В/Ц співвідношення, характерна для дрібнозернистих бетонів, зберігається і для пластифікованого крупнозернистого важкого бетону з вмістом ЦПК.

Таблиця 4.5

Склади цементобетонних сумішей з ЦПК і хімічними добавками

(марка за лекоукладальністю S3)

Умовне позначення	Портланд-цемент ПЦ І -500-Н	Цеоліт, кг/м ³	Пісок, кг/м ³	Щебінь (5-20), кг/м ³	Суперпластифікатор (% від маси цементу)	Повітровтягувальна добавка, (% від маси цементу)	В/Ц	Об'єм втягнутого повітря (%)
К	350	-	600	1230	1,0	-	0,48	2,0
Пв	350	-	600	1230	1,0	0,1	0,48	4,2
ЦПК	315	35	600	1230	1,0	-	0,52	1,7
ЦПКПв	315	35	600	1230	1,0	0,1	0,51	3,9

Як видно з табл. 4.6, міцність при стиску бетону, що містить цеолітовий полідисперсний компонент, нижче ніж контрольний бетон К у всі терміни тверднення. Бетон Пв (без мінеральних добавок), що містить пластифікатор і повітровтягувальну добавку, характеризується нижчою міцністю на стиск як через 3, так і через 7 діб тверднення порівняно з бетоном К.

Таблиця 4.6

Міцність бетону на стиск та розтяг при згині

Умовне позначення	Міцність на розтяг при згині, f_{ctb} , МПа, у віці 28 діб	Міцність при стиску f_{cm} , МПа, у віці, діб		
		3	7	28
К	6,2	36,5	44,8	54,3
Пв	5,7	31,4	36,5	45,5
ЦПК	6,9	24,2	36,8	49,2
ЦПКПв	6,3	22,1	35,9	44,3

Міцність на розтяг при згині так само зростає і становить 6,9 МПа, що на 10% вище від контрольного складу. Приріст міцності з введенням ЦПК дозволяє зменшити негативний вплив повітровтягувальної добавки на механічні показники бетону ЦПКПв.

Загальновідомо, що в процесі навантаження в матеріалі ініціюються і розвиваються різні дефекти [45]. Пошкодження, в більшості випадків, починається в цементній матриці або в контактних зонах, а саме між цементним каменем і заповнювачами. У цих дослідженнях вивчено вплив структури бетону на тріщиностійкість високоміцного бетону.

Аналіз загального вигляду діаграм стану бетонів (рис. 4.4) та розрахованих силових і енергетичних характеристик тріщиностійкості підтверджує ефективність використання полідисперсного цеолітового компоненту в комплексі з добавками пластифікуюче-повітровтягувальної дії: показники питомих витрат енергії на статичне руйнування до моменту початку руху тріщини (G_i) і загальні питомі ефективні витрати енергії на статичне руйнування (G_f) збільшуються на 29 та 14% відповідно для бетону ЦПКПв порівняно з контрольним складом (табл. 4.7).

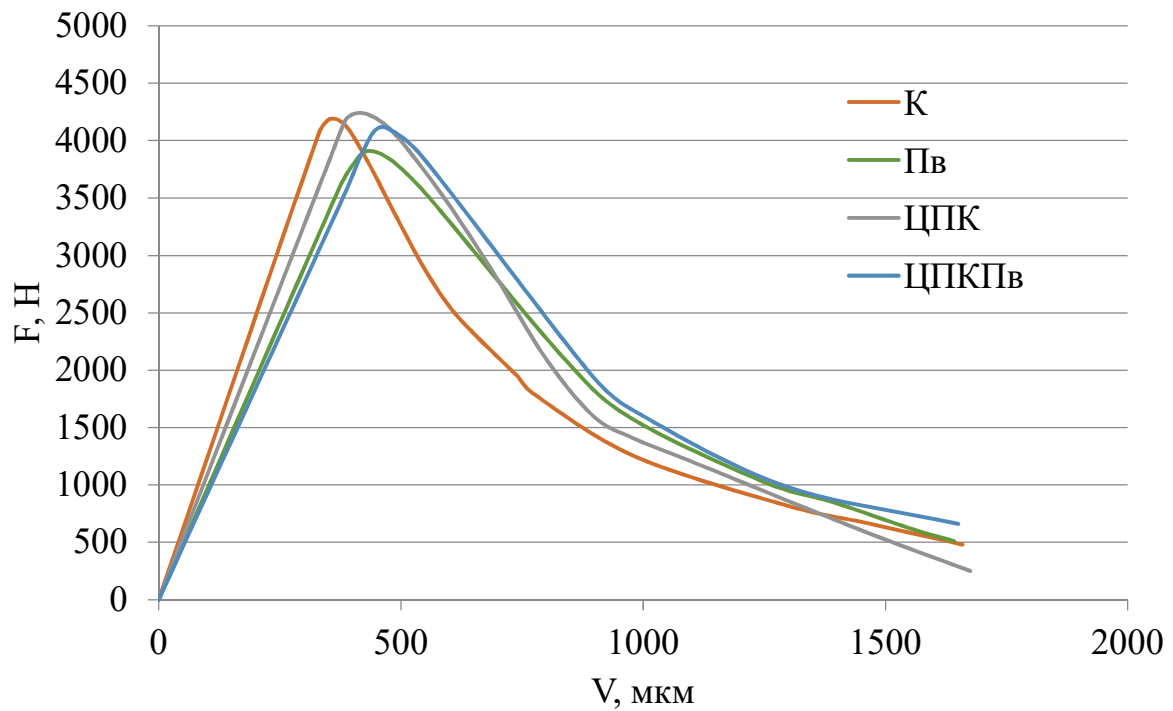


Рисунок 4.4 - Повні діаграми стану бетонів

Повітровтягувальна добавка разом з суперпластифікатором в бетоні Пв позитивно впливає на його енергію руйнування як на докритичній (G_i), так і на закритичній (W_L) стадіях і, як наслідок, на енергію руйнування G_F . Модифікований бетон ЦПКПв, характеризується найвищою енергією руйнування в докритичних (G_i), так і на закритичних (W_L) стадіях і енергією руйнування G_F (табл. 4.7).

Силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості

Умовне позначення	G_i , Дж/м ²	$W_L \cdot 10^{-2}$, Н·м	G_F , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	Міцність на розтяг при згині, МПа	Критерій крихкості, $\chi_{tb} \cdot 10^{-4}$, м
К	128,61	210,57	457,77	0,70	7,57	128,61
Пв	148,06	217,20	497,27	0,62	8,11	148,06
ЦПК	136,96	225,86	511,68	0,64	8,00	136,96
ЦПКПв	163,56	220,72	521,42	0,65	8,75	163,56

Стійкість до руйнування у насиченому соляним розчином стані при впливі знакозмінних температур є однією з визначальних властивостей бетонів транспортного призначення. За спадом міцності після 150 циклів замерзання-відтавання, досліджені бетони утворюють ряд К – ЦПК – Пв – ЦПКПв. Так, для контрольного складу зниження міцності становить 39,7 та 17,9% для складу, що містить ЦПК та повітровтягувальний компонент (рис. 4.5). Ці результати корелюють із значеннями глибини проникнення води, що характеризують водонепроникність.

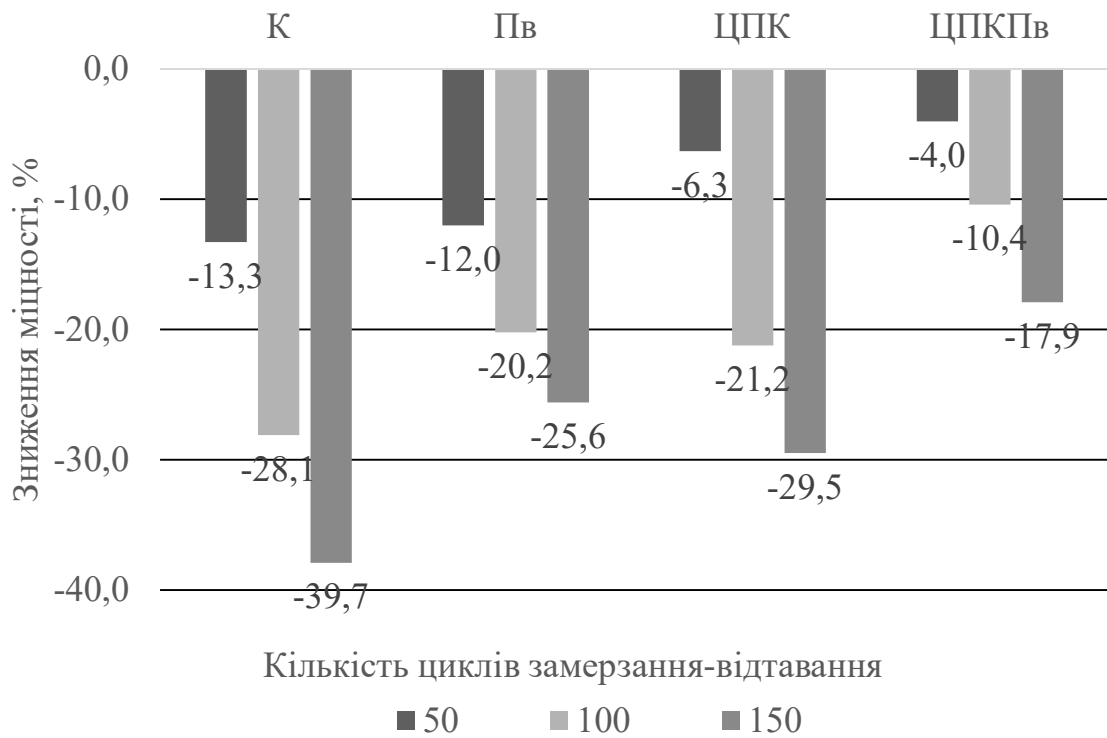


Рисунок 4.5 - Спад міцності бетонів після попереминої дії циклів заморожування-відтавання

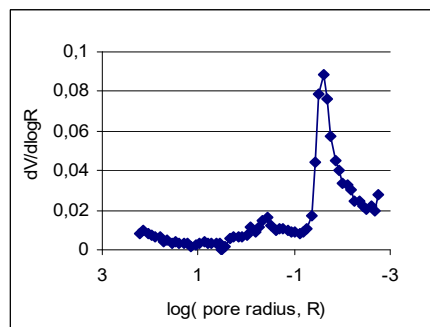
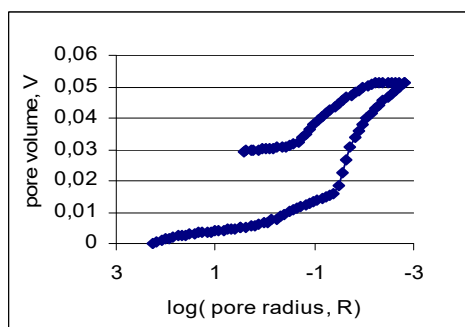
Результати глибини penetрації води через 28 діб наведені в табл. 4.8. Як видно, використання ЦПК в бетоні призводить до зниження глибини проникнення води. У віці 28 діб глибина проникнення води для бетонів ЦПК і ЦПКПв зменшилася приблизно на 15% і 34% відповідно порівняно з контрольними зразками К. Більш низька глибина проникнення води пов'язана з більш щільною мікроструктурою бетонів, що містять природний цеоліт за рахунок його пуцоланової активності.

Для бетонів ЦПК та ЦПКПв порівняно з К і Пв можна спостерігати незначне підвищення водопоглинання, викликане особливостями порової будови цеоліту.

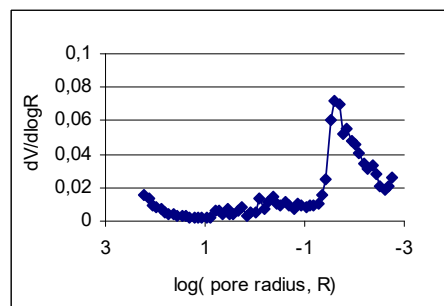
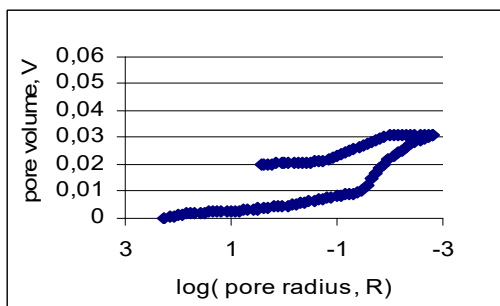
Водопоглинання та глибина penetрації води

Умовне позначення	Водопоглинання за масою, %	Водопоглинання за об'ємом, %	Глибина проникнення води, мм
К	4,3	10,3	5,3
Пв	4,2	9,9	5,1
ЦПК	5,2	12,2	4,5
ЦПКПв	4,9	11,5	3,5

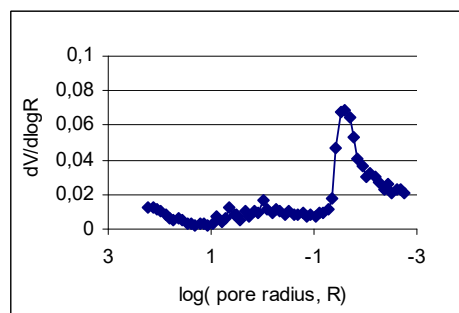
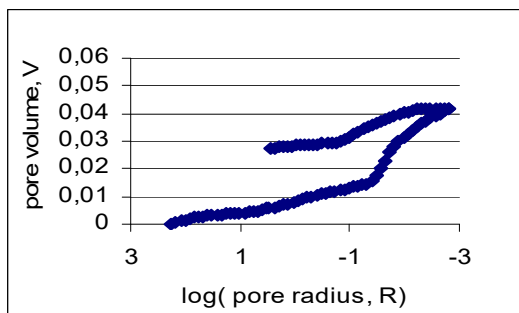
За результатами ртутної порометрії, загальні значення пористості бетонів К, ЦПК і ЦПКПв становили 11,8%, 7,4% і 9,6% відповідно. Зниження загальної пористості на 37% в бетоні ЦПК порівняно з контрольним складом доводить активну структуроутворюючу роль полідисперсного цеоліту. Його використання у бетонах дозволяє суттєво знизити їх капілярну пористість, що відображається у зміні середнього діаметру пор з 100 нм для бетону К до 67 нм для бетону з вмістом 10% ЦПК. Середній діаметр пор збільшується від 100 нм для контрольного бетону до 146 нм для бетону ЦПКПв (рис. 4.6).



а



б



в

Рисунок 4.6 - Крива об'ємної інтрузії (ліворуч) та розподіл діаметру пор (праворуч) у бетоні контрольного складу К (а), бетоні, що містить 10% ЦПК (б) та бетоні, що містить 10% ЦПК і 0,1% повітровтягувальної добавки (в).

Збільшення середнього діаметра пор в бетоні, що містить полідисперсний цеолітовий компонент і хімічні добавки викликано сферичними мікробульбашками втягнутого повітря. Варто відзначити, що введення повітровтягувальної добавки закономірно підвищує і загальний об'єм пор бетону.

Дослідження впливу ЦПК та хімічних добавок пластифікуюче-сповільнюючої дії на деформації усадки та втрати вологи проводили на дрібнозернистих бетонах. Співвідношення між цементом та піском приймали таким як в крупнозернистих бетонах, які описані в табл. 4.5.

Встановлено, що граничні деформації усадки (рис. 4.7) у віці 180 днів для бетонів ЦПК і ЦПКПв були у 2,6 та 5,4 разів нижчі, ніж для бетонів К і Пв відповідно. Слід зазначити, що для бетонів з вмістом полідисперсного цеоліту не має чіткої кореляції між вологовтратами та усадкою, оскільки при втратах маси у 4,5% через 7 діб, усадка є у 6 разів меншою порівняно з бетонами без цеоліту.

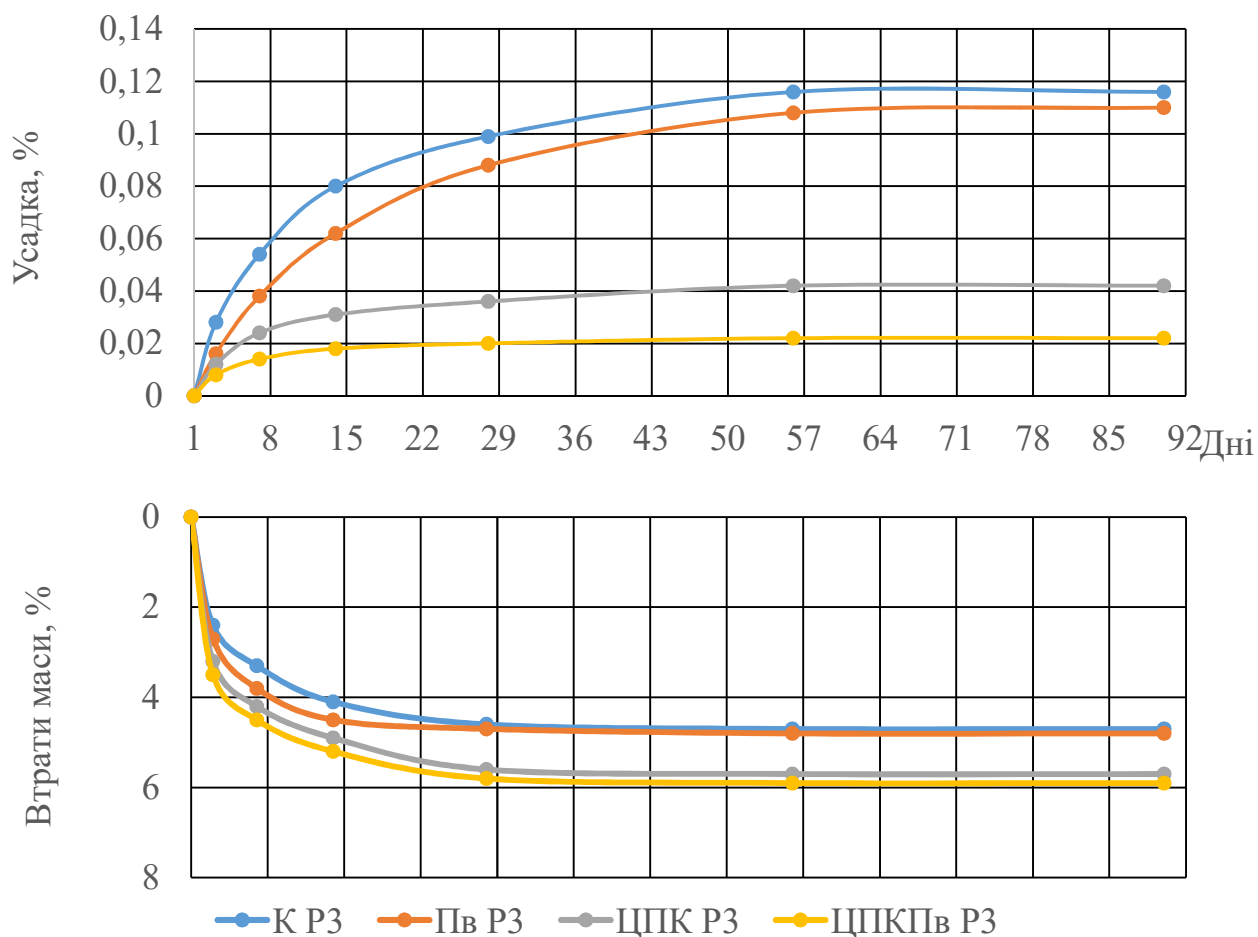


Рисунок 4.7 - Усадка та втрати маси дрібнозернистих бетонів

Це свідчить про здатність цеолітового компоненту шляхом адсорбції на стадії замішування створювати внутрішній резерв води у тілі бетону, який з часом компенсує втрату вологи з капілярів при самообезводненні і забезпечує продовження процесів гідратації.

4.3 Роль внутрішнього догляду у формуванні будівельно-експлуатаційних властивостей високоміцних бетонів

Догляд за бетоном відіграє важливу роль в забезпеченні його проектних показників та довговічності. Зовнішній догляд є найбільш поширеним для зменшення усадочних деформацій та проходження процесів гідратації портландцементу. Однак зовнішній догляд не завжди можливий, наприклад, у важкодоступних частинах конструкції, крім того, це завжди трудомісткий і дороговартісний процес. Зовнішній догляд інколи може бути неефективним через щільну структуру високоміцного бетону, що обмежує проникнення води в глибші шари бетонних конструкцій, що тверднуть. Тому метод внутрішнього догляду у високоміцних бетонах, які, як правило, виготовляються при низьких В/Ц відношеннях та характеризуються щільною структурою є більш ефективним.

Для дорожніх бетонів імплементація внутрішнього догляду зумовлена великою відкритою площею поверхні та застосуванням дорогих плівкоутворювачів, що обмежує можливості традиційного догляду. Додаткова вода також сприятиме повноті гідратації цементу в бетоні, потенційно сприяючи підвищенню міцності і зниженню проникності. Ефективність внутрішнього догляду чисельно характеризується внутрішньою відносною вологістю матеріалу, виходячи із залежності між радіусом водонаповнених капілярів і вологістю порового простору.

Найбільш простим і економічно доступним способом внутрішнього догляду за високоміцним бетоном може бути використання пористих добавок типу LWA. Порошкоподібні пористі активні мінеральні добавки здатні швидко поглинати воду через їх високу питому поверхню. Заміна дрібного заповнювача попередньо змоченим LWA має суттєвий вплив на зниження усадочних деформацій та покращення транспортних властивостей бетону і, навіть, підвищення морозостійкості [69, 70, 83]. Однак, зазвичай, може незначно знижуватися міцність на стиск бетону [85]. Активні мінеральні добавки можуть частково замінити цемент в бетоні і в результаті зменшити негативний вплив цементного виробництва на довкілля, знизити вартість бетону і підвищити його міцність та довговічність.

Портландцемент і вода реагують з утворенням кристалічних і гелевих продуктів гідратації. Ці реакції супроводжуються хімічною усадкою, оскільки продукти взаємодії займають менший об'єм, ніж вихідні компоненти (рис. 4.8).

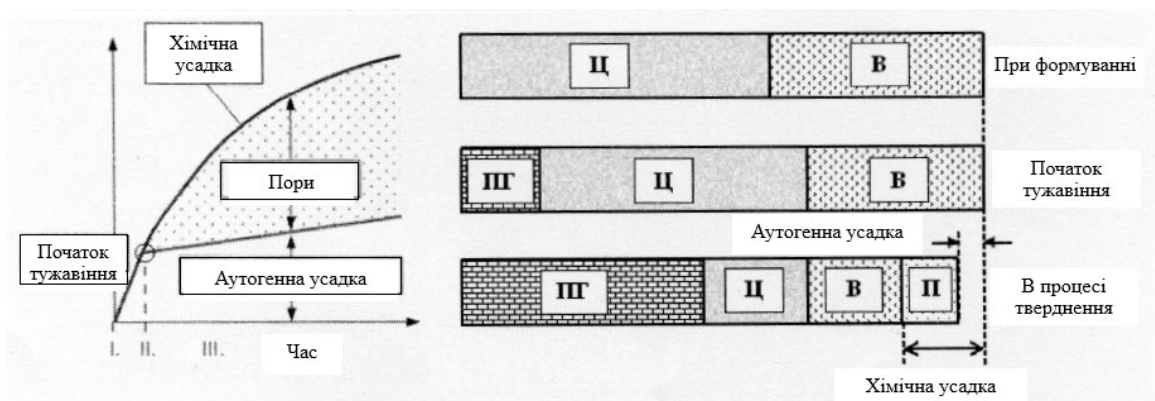


Рисунок 4.8 - Розвиток усадки у високоміцному бетоні: Ц – цемент, В – вода, ПГ – продукти гідратації, П – пори

До початку тужавіння відбувається пластична [69], а після початку тужавіння - хімічна усадка. Зменшення загального об'єму тверднучої системи за відсутності додаткового джерела води, викликає самообезводнення, оскільки в мікроструктурі

будуть створені частково заповнені пори. Розчини, що залишаються в частково заповнених порах, будуть створювати значний капілярний тиск, прямо пропорційний поверхневому натягу порового розчину і обернено пропорційний розміру найбільшої частково заповненої пори. Рівняння Юнга (4.10) [74] описує це співвідношення:

$$\sigma = \frac{-2\gamma\cos\theta}{r} \quad (4.10)$$

де σ - капілярний тиск або напруження, γ - поверхневий натяг порового розчину, θ - кут контакту, а r - радіус пор. Як видно з рівняння (4.10), можливі два шляхи зниження величини цих капілярних напружень: зменшення поверхневого натягу порового розчину за допомогою хімічної добавки SRA (Shrinkage Reducing Admixture)[71], або збільшення об'єму пор тверднучої системи шляхом введення додаткових резервуарів води в структуру бетону (LWA або SAP). Якщо цих додаткових пор недостатньо, то капілярні напруження істотно зростають з плином часу, оскільки зневоднюються пори меншого діаметру в процесі гідратації в'язучого.

Надлишковий капілярний тиск буде одночасно створювати значну усадку мікроструктури, яку можна оцінити за допомогою модифікованої версії рівняння Маккензі (Mackenzie, 1950) [74]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma S}{3} \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right) \quad (4.11)$$

де ε - лінійна деформація, K - об'ємний модуль пористого матеріалу, K_s - модуль його щільної структури, а S - рівень насичення в поровому просторі (від 0 до 1). Коли ці напруження та деформації усадки сягають критичних значень, вони можуть викликати мікротріщиноутворення у ранньому віці та в подальшому зниження довговічності бетонних конструкцій.

Згідно рівняння Кельвіна (4.12), виникнення самообезводнення і зростання σ викликає зниження внутрішньої відносної вологості цементної системи [74]:

$$\sigma = \frac{RT \ln(RH)}{V_m} \quad (4.12)$$

де R - універсальна газова стала, T - абсолютна температура, RH - відносна вологість, а V_m - молярний об'єм порового розчину. Рівняння (4.12) означає, що необхідність внутрішнього догляду, а також його ефективність можуть бути кількісно визначені шляхом вимірювання внутрішньої відносної вологості цементної системи в процесі гідратації. Коли рівняння (4.12) поєднується з рівнянням (4.10), встановлюється взаємозв'язок між відносною вологістю і розміром пор, що обезводнюються (рис. 4.9).

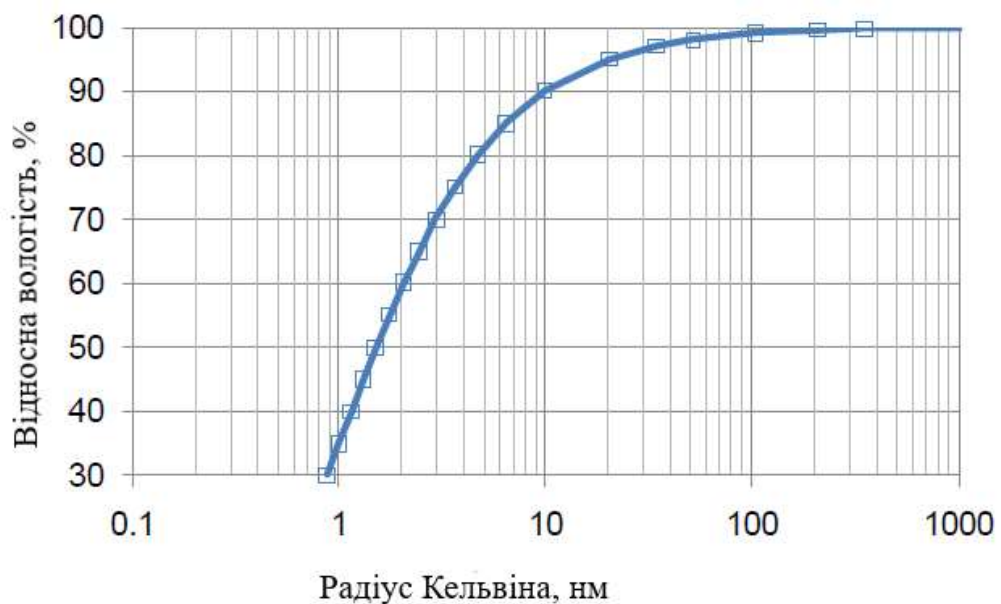


Рисунок 4.9 - Співвідношення внутрішньої відносної вологості та радіуса цементних пор, що обезводнюються

Тому метою внутрішнього догляду є забезпечення джерела легкодоступної додаткової води, щоб капілярна пористість цементуючої системи залишалася насиченою в процесі гідратації. Таким чином зменшуються напруження і деформації усадки. Ця додаткова вода також сприятиме повноті гідратації цементу з мінеральними добавками в бетоні, сприяючи підвищенню міцності і зниженню проникності бетону. Зазвичай, частина цієї додаткової води забезпечується

зовнішнім доглядом, шляхом влаштування туманних завіс, поливання або вкривання вологими матами. Проте у високоміцних бетонах капілярна пористість зменшується протягом перших днів гідратації [66]. Тому вода від зовнішнього догляду може проникати у структуру бетону лише на кілька міліметрів від поверхні, в той час як внутрішня частина бетону зазнає істотного самообезводнення. Мета внутрішнього догляду полягає в тому, щоб забезпечити додаткову кількість води в необхідному обсязі і з рівномірним просторовим розподілом, так, щоб вся тривимірна мікроструктура цементуючої системи залишалась водонасиченою та характеризувалась меншими деформаціями усадки (рис. 4.10).

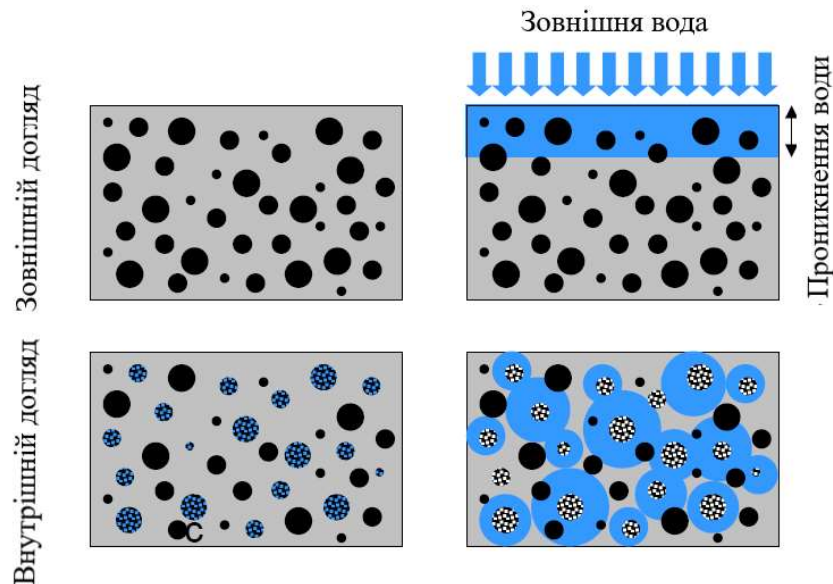


Рисунок 4.10 - Механізм «внутрішнього догляду»

Для вивчення ефективності застосування пористих пуцоланічних компонентів як резервуарів для додаткової води, було вивчено адсорбційні властивості ЦПК і ППК. Аналіз кінетики адсорбції води пористими компонентами в часі свідчить, що для ЦПК характерне інтенсивніше поглинання, проте за об'ємом адсорбованої води майже у 5 разів переважає ППК (рис. 4.11).

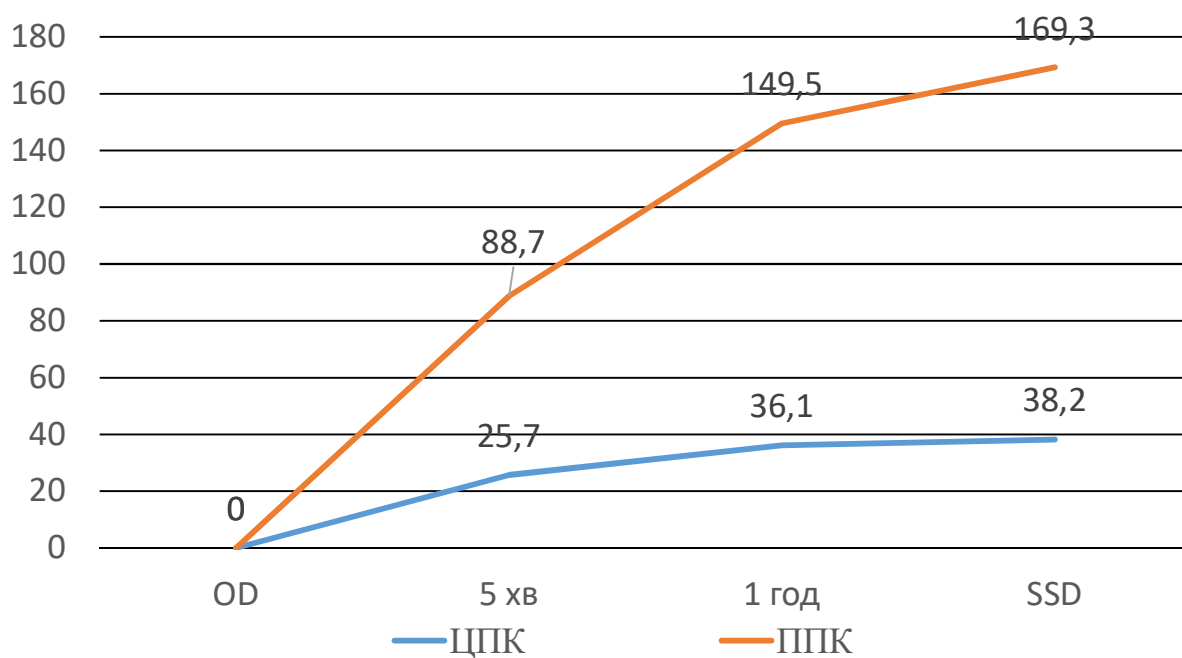


Рисунок 4.11 - Кінетика адсорбції води пористими компонентами в часі:
 OD – «oven dry» висушений до постійної маси, SSD – «saturated surface dry»
 водонасичений з сухою поверхнею згідно [87]

Оскільки вплив, роль і значення внутрішнього догляду зростає із зниженням водоцементного відношення, його ефективність досліджували у бетонах з дійсним $V/C=0,35$ на основі сумішей номінального складу 1:1,65:2,88 з маркою за легковкладальністю S1 та вмістом 10 мас.% ЦПК і 10 об.% ППК, шляхом порівняння їх властивостей у різних умовах тверднення з контрольним складом К (табл. 4.9).

Вміст добавок та властивості бетонних сумішей

Умовне позначення	Витрата компонентів				В/Ц	Середня густина суміші, кг/м ³	Осадка конуса, см
	Цемент, кг/м ³	ЦПК, мас. %	ППК, об. %	Повітро-втягувальна добавка, мас. %			
К	400	-	-	-	0,37	2455	4
ЦПК	360	10		-	0,39	2405	3
ППК	360	-	10	-	0,41	2360	4

При твердненні в сухих умовах, міцність бетонів на основі сумішей з маркою за легкоукладальністю S1 та вмістом полідисперсних компонентів, на відміну від контрольного складу, у віці 90 діб не спостерігається спад міцності на стиск порівняно з міцністю у віці 28 діб (рис. 4.12). Це підтверджує гіпотезу про позитивний вплив додаткового внутрішнього резерву води на забезпечення нормального перебігу реакцій гідратації і, як наслідок, розвиток міцності бетону в сухих умовах.

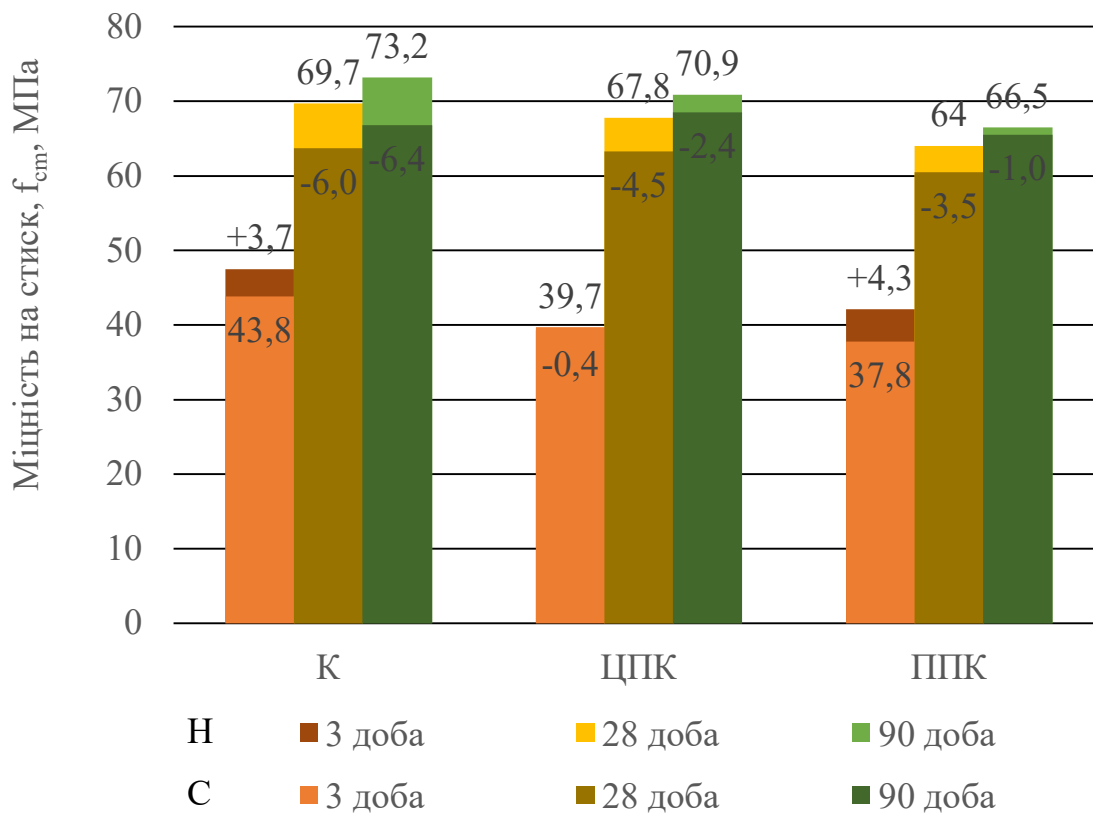


Рисунок 4.12 - Міцність на стиск бетонів, що тверднули у нормальних («Н» – $T=20\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=95\pm 3\%$) та повітряно-сухих («С» – $T=40\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=40\pm 3\%$) умовах

Співвідношення значень границі міцності на розтяг при згині у різних умовах тверднення свідчать про високу чутливість цього параметру до обезводнення (рис. 4.13). Так, через 90 діб тверднення в повітряно-сухих умовах міцність на розтяг при згині зразків контрольного складу становить 5,5 МПа, що на 28% нижче міцності бетону, що тверднув у вологих умовах. Найвищими показниками характеризується бетон з ЦПК, для якого досягається клас міцності на розтяг при згині $B_{\text{т}} 5,6$ у нормальних умовах тверднення.

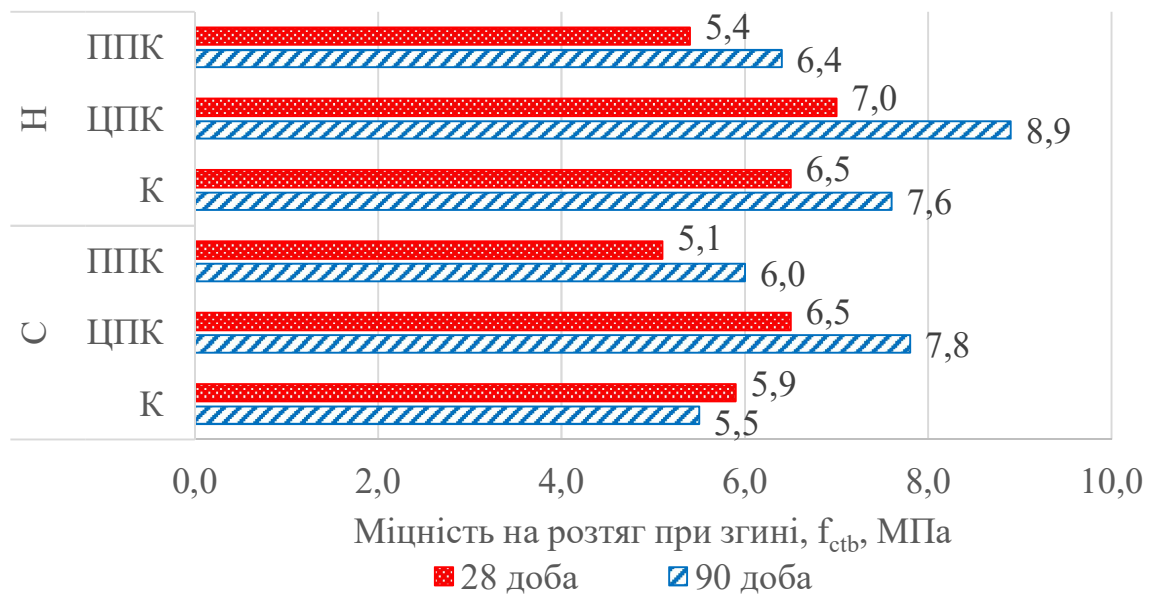


Рисунок 4.13 - Міцність на розтяг при згині бетонів, що тверднули у нормальних («Н» – $T=20\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=95\pm 3\%$) та повітряно-сухих («С» – $T=40\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=40\pm 3\%$) умовах

Втрати маси бетонних зразків (рис. 4.14) пропорційні внутрішній відносній вологості бетонів (рис. 4.15). Аналіз кривих свідчить, що використання ППК для реалізації механізму внутрішнього догляду є перспективнішим ніж ЦПК, що

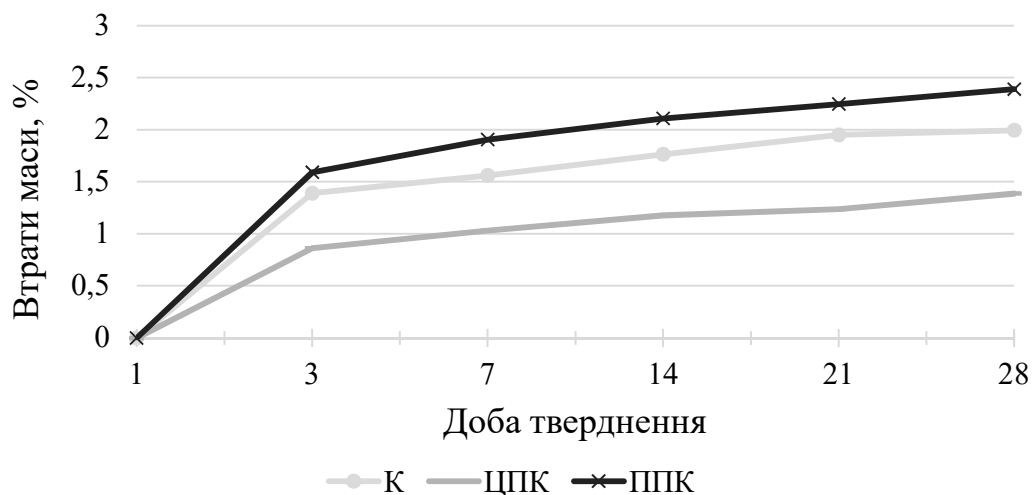


Рисунок 4.14 - Втрати маси бетонних зразків, що зберігались в сухих умовах

пов'язано з вищим показником адсорбції води для цього компоненту. Проте низька пуцоланічна активність перлітового компоненту та незадовільні механічні характеристики обмежують використання ППК у високоміцних бетонах.

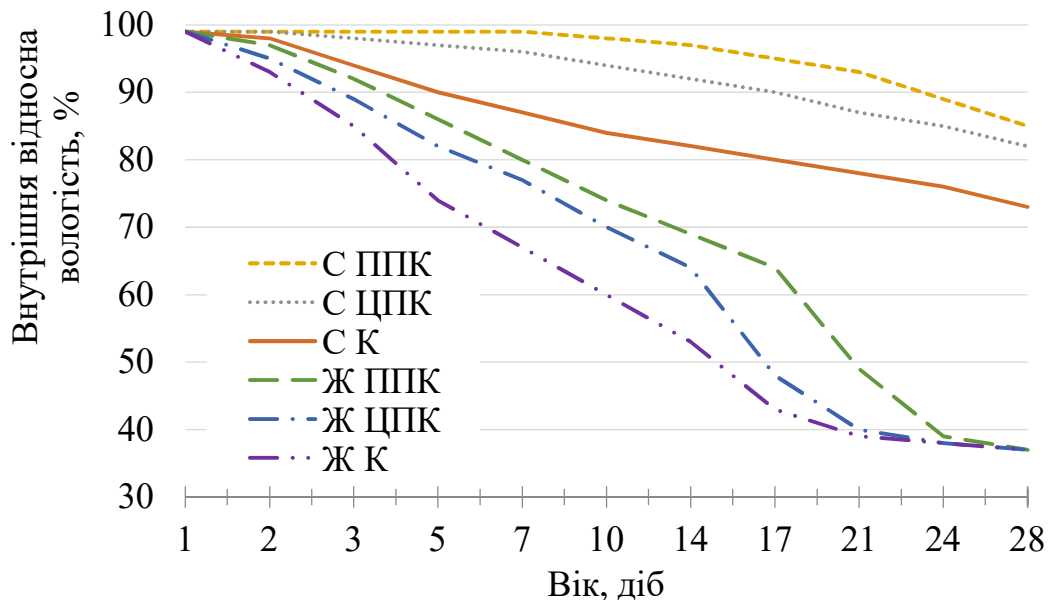


Рисунок 4.15 - Внутрішня відносна вологість бетонів у різних умовах тверднення:
 «С» – $T=20\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=68\pm 3\%$; «Ж» – $T=40\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=40\pm 3\%$;

Таким чином, використання пористого цеолітового компоненту ЦПК, що реалізує функцію внутрішнього догляду, дає змогу забезпечити повноту протікання реакцій гідратації, уникнути самообезводнення бетону та підвищити його фізико-механічні характеристики.

4.4 Фізико-механічні та будівельно-експлуатаційні властивості бетонів на основі малорухливих сумішей

Для забезпечення довговічності бетонів транспортного призначення потрібно досягнути, серед інших важливих проектних показників, необхідний рівень морозостійкості дорожнього бетону, що передбачає введення до його складу повітровтягувальних добавок. Вплив замкнутої мікропористості на властивості високоміцних бетонів на основі сумішей з маркою за легковкладальністю S1 досліджували шляхом випробування бетонів з В/Ц=0,35 та вмістом 10 мас.% ЦПК, а також повітровтягувальної добавки (0,01; 0,015 та 0,025 мас.%).

Об'єм втягнутого для сумішей без повітровтягуючої добавки коливається в межах 2,7 – 2,8 % за об'ємом, введення повітровтягуючої добавки Sikanol A у кількості 0,1 мас.% дозволяє підвищити цей показник до 4,5 % (табл. 4.10).

Таблиця 4.10

Вміст хімічних добавок та властивості бетонних сумішей

(В/Ц=0,35; марка за легковкладальністю S1)

Умовне позначення бетонної суміші	Портландцемент ПЦ І -500-Н	Цеоліт, кг/м ³	Пісок (кг/м ³)	Щебень (кг/м ³)	Суперпластифікатор (мас. %)	Повітровтягувальна добавка (мас.%)	ОК, см	Об'єм втягнутого повітря (%)
К	400	-	660	1150	1,0	-	4	2,8
ЦПКПв1	360	40	660	1150	1,0	0,1	4	4,3
ЦПКПв2	360	40	660	1150	1,0	0,15	3	6,5
ЦПКПв3	360	40	660	1150	1,0	0,25	4	7,2

Встановлено, що регулювання об'єму втягнутого повітря в бетонах у межах 4-7% для бетонів з вмістом ЦПК не чинить значного впливу на міцність на розтяг при згині (табл. 4.11). Так, через 28 діб тверднення вона змінюється у діапазоні 9,1-9,4 МПа, а у віці 3 років максимальною міцністю на розтяг при згині 14,1 МПа характеризується бетон ЦПКПв2 з вмістом 6,5% втягнутого повітря.

Як видно з табл. 4.11, зростання об'єму втягнутого повітря підвищує стираність бетону. Так, для бетону ЦПКПв1 її значення становить 0,26 г/см² і є найменшим серед досліджуваних складів.

Таблиця 4.11

Міцність на розтяг при згині та стираність бетонів з різним вмістом втягнутого повітря

Умовне позначення бетонної суміші	Міцність на розтяг при згині, f_{ctb} , МПа, у віці		Стираність, г/см ²
	28 діб	3 роки	
К	9,1	11,3	0,27
ЦПКПв1	9,4	13,5	0,26
ЦПКПв2	9,3	14,1	0,29
ЦПКПв3	9,1	12,8	0,32

Отримані результати досліджень свідчать (рис. 4.16), що бетон з органо-мінеральними добавками на основі бетонної суміші з вмістом 4,3% втягнутого повітря характеризуються дещо нижчою міцністю через 28 діб тверднення, проте з часом міцність вирівнюється, а через 90 діб навіть перевищує міцність бетону контрольного складу К. Збільшення об'єму втягнутого повітря в бетонних сумішах до 4,3; 6,5; 7,2% призводить до зниження ранньої міцності (через 3 доби

тверднення) на 8,6; 27,0; 38,1% відповідно та міцності через 28 діб на 14,3; 22,7; 32,7% відповідно.

Кінетика наростання міцності при стиску до 28 доби проходить в кореляції з об'ємом втягнутого повітря для усіх складів, але через 3 роки найвища міцність спостерігається для бетону ЦПКПв1 (рис. 4.16).

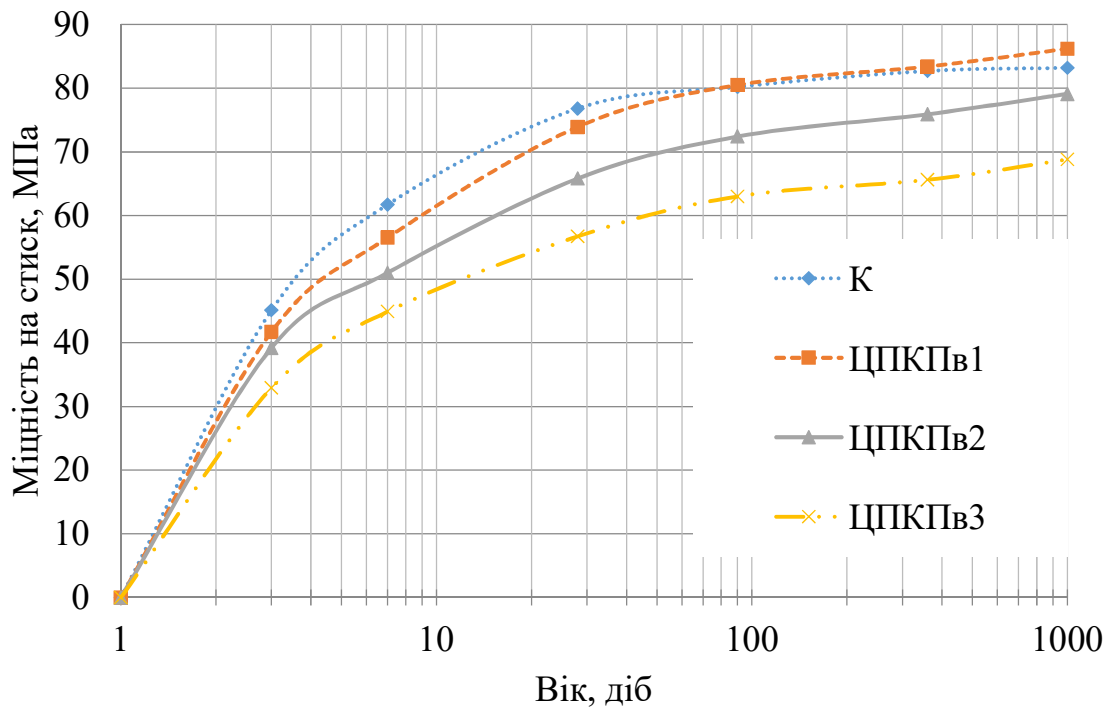


Рисунок 4.16 - Міцність на стиск бетонів з різним вмістом втягнутого повітря

За результатами випробувань зразків-призм з ініційованою тріщиною побудовано повні діаграми стану високоміцних бетонів (рис.4.17).

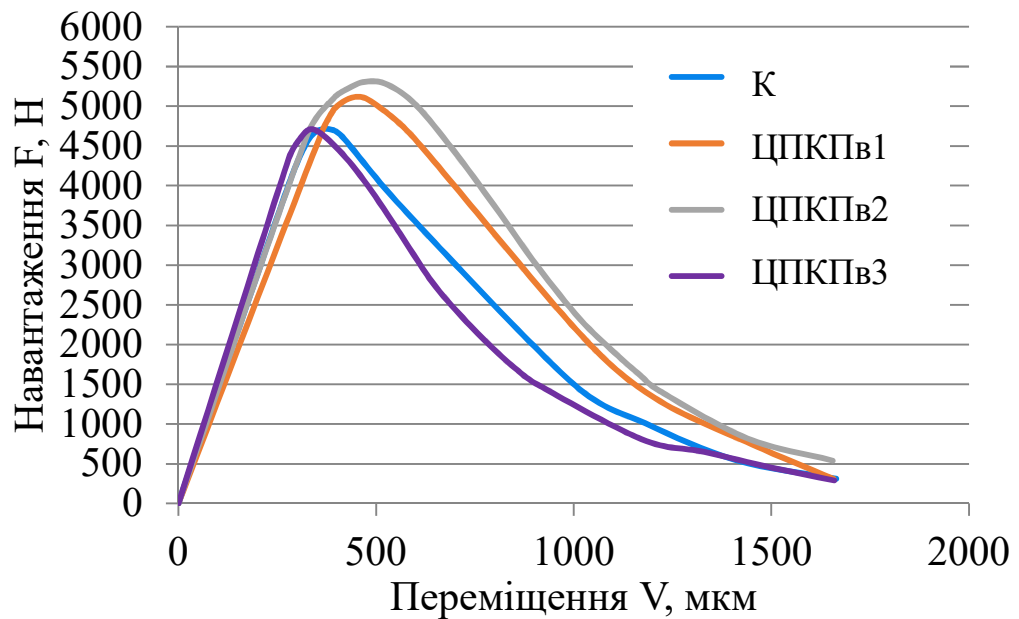


Рисунок 4.17 - Повні діаграми стану високоміцних бетонів

Аналіз діаграм показує, що максимальне навантаження (5310 Н), за якого починає поширюватись макротріщина характерне для бетону ЦПКПв2. Конфігурація діаграми стану цього складу загалом є найкращою серед досліджуваних. Для бетону без мінеральних добавок К характерне невисоке, приблизно рівне ЦПКПв3 значення навантаження (4710 Н), за якого відбувається злам діаграми, але повніша порівняно з ЦПКПв3 конфігурація спадної вітки діаграми.

Розраховані силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості високоміцних бетонів представлені у табл. 4.12. Результати досліджень показали, що бетони ЦПКПв1 та ЦПКПв3 характеризуються відповідно на 29 та 37% вищими показниками G_i ніж бетон контрольного складу К. Слід відзначити, що бетон з підвищеним вмістом повітровтягувальної добавки (0,25 мас.%) ЦПКПв2 характеризується найнижчими параметрами тріщиностійкості.

Силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості

Умовне позначення бетону	G_i , Дж/м ²	$W_L \cdot 10^{-2}$, Н·м	G_F , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	Міцність на розтяг при згині, R_{fb} , МПа	Критерій крихкості, $\chi_{fb} \times 10^{-4}$, м
К	163,83	241,88	535,58	0,81	9,8	209
ЦПКПв1	224,45	261,15	625,82	0,83	11,0	170
ЦПКПв2	247,44	295,37	657,37	0,99	11,6	206
ЦПКПв3	147,30	229,15	500,76	0,80	9,8	218

Значення міцності на розтяг при згині та модуля пружності при згині досліджених високоміцних бетонів корелюють із їх показниками тріщиностійкості, однак значення міцності на розтяг при згині змінюються в меншому діапазоні (6%) ніж модуля пружності при згині (39%). Крихкий характер руйнування в більшій мірі характерний для бетонів ЦПКПв1 та ЦПКПв3, про що свідчать нижчі значення критерію крихкості.

За значеннями питомих енерговитрат на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини G_i , енерговитратами на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини W_L , питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування G_F та в'язкістю руйнування K_i переважають показники для ЦПКПв2. Це пов'язано із оптимальним вмістом та рівномірним розподілом дрібнодисперсних бульбашок втягнутого повітря, які виступають демпферами напружень, що сприяє гальмуванню процесів

мікротріщиноутворення на докритичній та сповільнює рух магістральної тріщини в закритичній стадіях.

Це підтверджується результатами порового аналізу структури бетону ЦПКПв2 за допомогою комп'ютерної мікротомографії (рис. 4.18). Результати реконструкції 3D моделі з роздільною здатністю 5 мкм/voxel показує, що вміст пор ефективних діаметрів 50-200 мкм становить 4,19% загального об'єму в досліджуваному діапазоні (табл. 4.13).

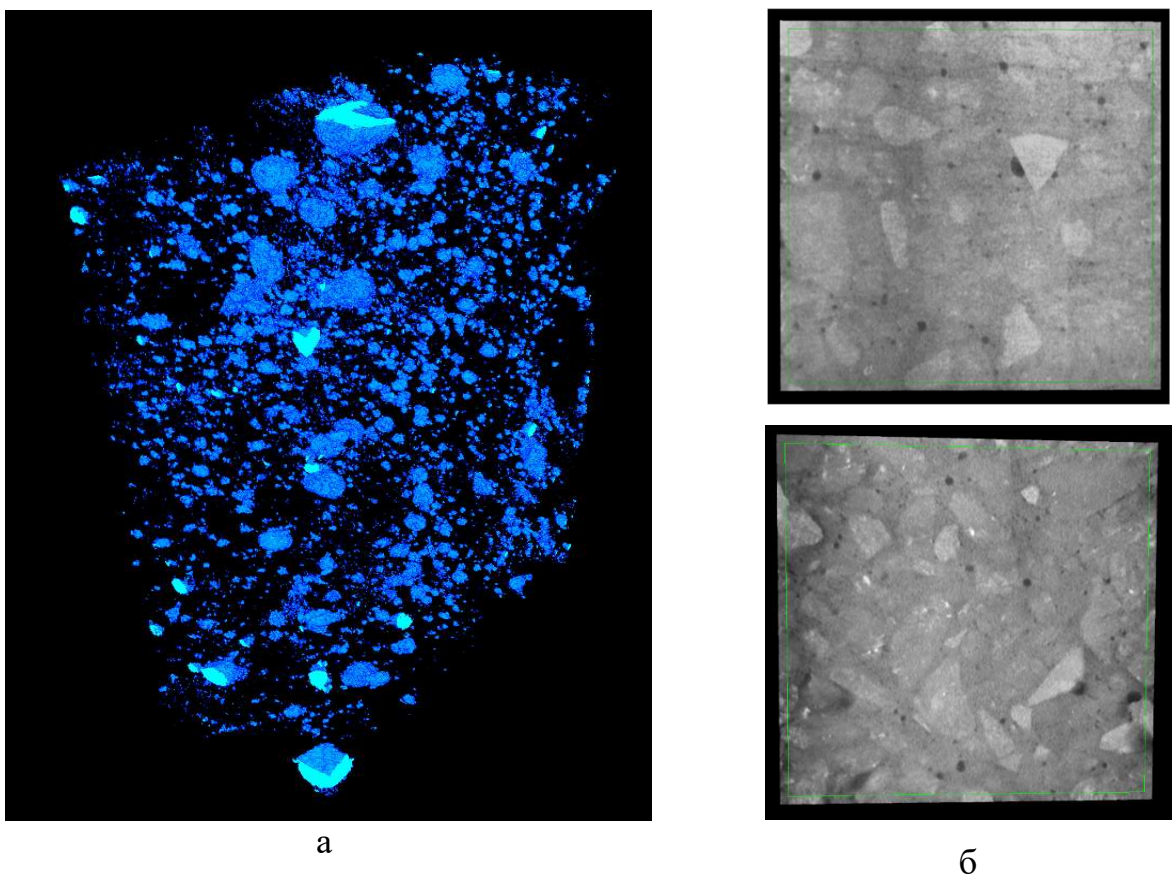


Рисунок 4.18 - 3D модель (а) та поперечні перерізи (б) бетонного зразка ЦПКПв2

Розподіл пор за розміром в затверділому бетоні ЦПКПв2

Діаметр пор, мкм	Вміст пор, %
>1000	0,89
500-1000	0,12
200-500	0,53
100-200	1,35
50-100	2,84
<50	0,86
Σ	6,59

Як видно з рис. 4.19, стійкість до дії циклів поперемінного заморожування-відтавання бетонів закономірно зростає ($\Delta f_c=5,3\%$) з підвищенням об'єму втягнутого повітря до 6,5% в суміші, проте передозування повітровтягувальної добавки (0,25 мас.%) також має негативний ефект ($\Delta f_c= 8,9\%$).

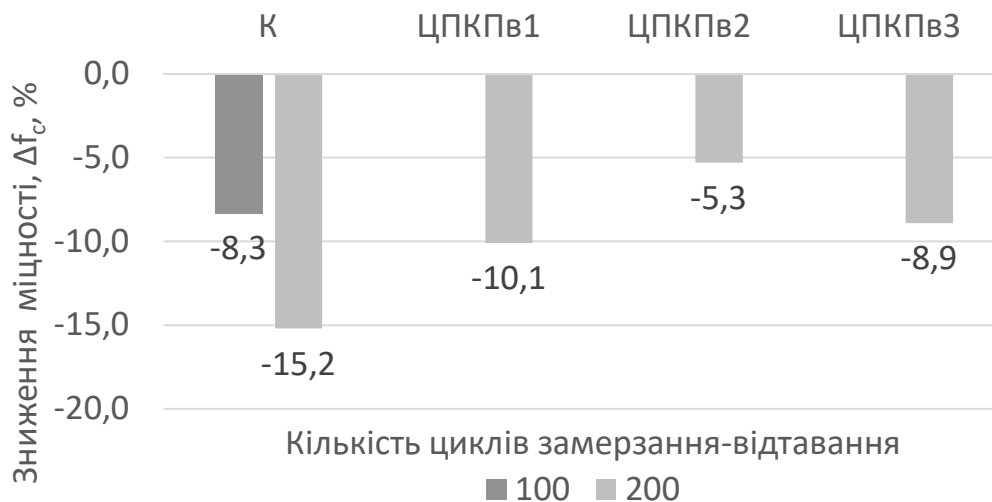


Рисунок 4.19 - Спад міцності бетонів з різним вмістом втягнутого повітря після поперемінного заморожування-відтавання

Стійкість до корозійних впливів є однією з визначальних характеристик бетонів транспортного призначення. Так, більшість шляхопроводів, мостів та дорожніх покриттів руйнуються через застосування протижеледних реагентів, також негативний вплив мають викиди в атмосферу двигунами автотранспорту та промисловими підприємствами до яких входять оксиди азоту, сірчані та інші гази.

Згідно з результатами визначення корозійної стійкості (табл. 4.14), для дрібнозернистих бетонів з вмістом ЦПК коефіцієнти корозійної стійкості на згин становлять 1,23 та 0,8 у сульфатному та магнезіальному середовищі відповідно, що на 20% вище бетону без добавок.

Таблиця 4.14

Корозійна стійкість дрібнозернистих бетонів у сульфатному та магнезіальному середовищі

Середовище	Без добавок			10% ЦПК		
	вода	Na ₂ SO ₄ [SO ₄ ²⁻]= 30 г/л	MgCl ₂ [Mg ²⁺]= 30г/л	вода	Na ₂ SO ₄ [SO ₄ ²⁻]= 30г/л	MgCl ₂ [Mg ²⁺]= 30г/л
Міцність на стиск/згин, МПа	59,5/ 8,2	57,0/ 8,5	41,9/ 5,9	50,4/ 8,6	51,9 /10,6	35,5/ 7,1
K _{сстиск}	-	0,96	0,71	-	1,03	0,72
K _{сзгин}	-	1,04	0,72	-	1,23	0,80

Глибина карбонізації (рис. 4.20) крупнозернистих бетонів через 3 роки зберігання у повітряному середовищі становить 9, 6 та 2 мм для бетонів без добавок, з ЦПК та ЦПКПв відповідно.



а

б

в

Рисунок 4.20 - Глибина карбонізації крупнозернистих бетонів К(а), ЦПК (б) та ЦПКПв (в) після 3 років зберігання у повітряному середовищі

Таким чином, ефективність застосування ЦПК в комплексі з суперпластифікатором та повітровтягувальною добавкою підтверджена результатами дослідження будівельно-експлуатаційних властивостей розроблених високоміцних цементних бетонів.

Висновки до розділу 4

1. Встановлено, що комплексна модифікація високоміцних дорожніх бетонів полідисперсним цеолітовим компонентом та суперпластифікуючою добавкою у кількості 10 та 1 мас.% відповідно дозволяє одержати найкращі результати за критеріями міцності на розтяг при згині і стиску, що підтверджено даними ортогонального центрально-композиційного планування експерименту.

2. Використання ЦПК та добавки повітровтягувальної дії (у кількості 10; 1,0 та 0,1 мас.% відповідно) у бетоні номінального складу 1:1,7:3,5 на основі сумішей з маркою за легковкладальністю S3 відіграє позитивну роль в забезпеченні

зростання міцності на розтяг при згині на 7-15%, енергії руйнування $\Delta G_F = 67 \text{ Дж/м}^2$, морозостійкості (F150), корозійної стійкості ($K_c^{зг} = 1,23$), водонепроникності (WPD=3,5мм) порівняно з бетоном контрольного складу. Активна структуроутворююча роль полідисперсного цеоліту підтверджується зниженням загальної пористості (з 11,8 до 7,4%) та середнього діаметру пор (з 100 нм до 67 нм) а також глибини карбонізації (з 9 до 2 мм) бетону з вмістом 10мас.% ЦПК порівняно з контрольним складом.

3. Показано, що пористі полідисперсні компоненти можна використовувати для створення внутрішнього резерву води у тілі бетону, який з часом компенсує втрату вологи з капілярів при самообезводненні і забезпечує продовження процесів гідратації. Введення до бетону полідисперсних компонентів дає змогу знизити у 2,6 - 5,4 рази граничні деформації усадки, на 10-30 % підвищити опір згинаючим навантаженням як в нормальних температурно-вологісних, так і в повітряно-сухих умовах тверднення без значних вологовтрат та падіння міцності на стиск.

4. Регулювання вмісту втягнутого повітря в межах 4,3÷7,2% у бетонних сумішах з дійсним В/Ц=0,35 номінального складу 1:1,65:2,88 з маркою за легковкладальністю S1 закономірно знижує міцність на стиск затверділих високоміцних бетонів ($\Delta f_{cm} = 5-26 \%$), проте істотно не впливає на його значення міцності на розтяг при згині ($f_{ctb} = 9,1-9,4 \text{ МПа}$). Модифікування бетону повітровтягувальною добавкою у кількості 0,15 мас.% в комплексі з ЦПК створює структуру із замкнутою мікропористістю у тілі бетону, яка підвищує морозостійкість бетону у 1,5 рази та сприяє дисипації енергії мікротріщиноутворення на докритичній ($G_I = 247 \text{ Дж/м}^2$) та сповільненню руху магістральної тріщини в закритичній ($W_L = 295 \text{ Дж/м}^2$) стадіях.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Виробничі випробування виробів бетонних тротуарних неармованих

При вивиробництві ВБТН ключовою ланкою в технологічному процесі є вібропрес. Він повинен формувати вироби високої якості, забезпечуючи необхідний ступінь ущільнення бетонної суміші. Це досягається за рахунок оптимально підібраної амплітуди і частоти вібрації для видалення надлишкового повітря і одержання виробів з проектними показниками міцності та довговічності. Формування дослідної партії дрібноштучних бетонних виробів відбувалось на виробничих потужностях ПП «Застава» за допомогою лінії виробництва вібропресованих виробів PROMETAL UNIVERSAL-1000 (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 - Обладнання для виготовлення вібропресованих виробів
PROMETAL UNIVERSAL-1000

Найпростішим і найбільш поширеним способом виготовлення вібропресованих бетонних ФЕМ є одношарова технологія. Для кожного виробничого циклу застосовується новий піддон, тобто, на кожному піддоні знаходиться один шар продукції [34]. Більш того, оскільки свіжий бетон затвердіває на піддонах тонким шаром, для досягнення високої якості кінцевого продукту на виробництві необхідно контролювати процес догляду за бетоном.

У виробничих умовах виготовлено два склади сумішей: контрольний, на основі ПЦ П/А-Ш-500 та з заміною 10мас.% портландцементу на ЦПК. Склади бетонних сумішей наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Витрата матеріалів бетонних сумішей для дрібноштучних виробів

Бетонна суміш	Цемент (кг/м ³)	ЦПК (кг/м ³)	Пісок (кг/м ³)	ПВПГП Мкр=2,5 (кг/м ³)	Щебінь фр. 5-10	Комплексна добавка (мас.%)	В/Ц фактичне
Контр	380	0	500	775	850	0,65	0,34
Цеол	342	38	500	775	850	0,65	0,35

Відформовані ВБТН «Старе місто», умовне позначення якого ВБТН (1К8) 120x120x80/В35/Ф300 сірі ДСТУ Б В.2.7-145:2008. «Старе Місто», є універсальними виробами, що залежно від товщини можуть бути застосовані як для пішохідних доріжок, так і для проїзної частини доріг.



Рисунок 5.2 - ВБТН типу «Старе місто»

Старе місто — вдале рішення для заощення великих площ зі незначним навантаженням та рухом автотранспорту середньої і малої інтенсивності. Такі вироби підходять для облаштування територій автозаправок, складів, паркінгів тощо. Вона зручна та практична в укладанні. А застосовуючи різні кольори бетонних елементів, можна виділяти функціональні зони чи робити розмітку ділянки. Характеристики виробу зазначені в табл 5.2.

Таблиця 5. 2

Характеристика ВБТН

Група виробів	Тип виробу	Довжина виробу, мм	Ширина виробу, мм	Висота виробу, мм	Маса, кг	Кількість шт в 1м ²
Старе місто	1К8	120	120	80	2,70	69,44

Міцність ВБТН на стиск (табл. 5.3) без добавки ЦПК у ранні терміни (через 3 доби) твердіння дещо перевищує аналогічні показники бетонів, що містять ЦПК, незалежно від умов твердіння.

Міцність на стиск ВБТН у різних умовах тверднення

Умовне позначення бетону	Умови зберігання	Міцність на стиск, МПа, у віці, діб		
		3	7	28
Контр	Нормальні	30,9	34,6	45,2
Цеол	Нормальні	29,6	39,8	50,2
Контр	Сухі	27,9	29,1	31,6
Цеол	Сухі	27,1	33,7	40,4

Міцність виробів, що містять ЦПК у віці 28 діб перевищує границю міцності при стиску ВБТН без мінерального компонента в сухих та вологих умовах зберігання на 28 та 10 % відповідно.

Таким чином, введення в бетонні суміші для дрібноштучних вібропресованих виробів ЦПК позитивно впливає на його міцність при стиску, особливо в сухих умовах зберігання, що важливо для вібропресованих виробів.

При випаровуванні води з поверхні бетону, водний розчин гідроксиду кальцію та розчинені солі, що включають карбонати, хлориди та сульфати виходять на поверхню ВБТН, де після випаровування води та взаємодії гідроксиду кальцію з двоокисом вуглецю повітря, відкладаються у вигляді білого нальоту. Цей наліт білого кольору на поверхні ВБТН відомий як висоли і погіршує декоративний вигляд бетонних елементів. Ідентифікують дві стадії висолів.

Перша стадія проходить під час початкового тверднення бетону, коли висоли покривають поверхню суцільною однорідною плівкою. Цей тип висолів, якщо і є, то зазвичай буде помітним під час транспортування продукції. Оскільки тверднення бетону це процес довготривалий, то гідроксид кальцію продовжує утворюватися в портландцементі протягом значного періоду часу.

Висоли можуть мігрувати на поверхню з дощовою водою або конденсацією, що спричиняє появу другого типу висолів. Зазвичай, вторинні висоли є

локальними, тобто з'являються у вигляді окремих плям, а не по всій поверхні ВБТН. З часом нерозчинний карбонат кальцію може вступати в реакцію з додатковим двоокисом вуглецю з утворенням гідрокарбонату кальцію. Цей карбонат є розчинним і дозволяє з часом ліквідувати висоли. Таким чином, висоли це явище тимчасове. З часом експлуатації вони зникають, проте можуть викликати дві проблеми.

По-перше, білий наліт погіршує зовнішній вигляд продукції і викликає вицвітання, а в деяких випадках, повного зникнення кольору. Цей ефект є найбільш видимим на ВБТН темного кольору.

По-друге, якщо висоли розповсюджуються по тротуарному покритті, то це може знизити шорсткість поверхні покриття.

Ймовірність виникнення первинних висолів можна попередити або звести до мінімуму, якщо звертати особливу увагу на робочий склад суміші та процес виробництва. Слід уникати надлишку води в суміші. Бетон повинен тверднути у нормальних умовах, без протягів.

Вторинні висоли попередити складно, проте висока щільність та низьке В/Ц ВБТН дає змогу зменшити висолоутворення.

Як свідчать результати проведених досліджень, на відкритій поверхні зразків модифікованих ВБТН не спостерігається змін, пов'язаних з висолами, що забезпечується використанням ЦПК та високоякісних заповнювачів у складі бетону. Відсутність висолів вказує на доцільність використання розроблених бетонів з добавками ЦПК для ВБТН.

При введенні ЦПК до складу бетону спостерігаються менші втрати маси зразків (рис. 5.3), що підтверджує їх високу щільність та активну структуроутворюючу роль ЦПК.

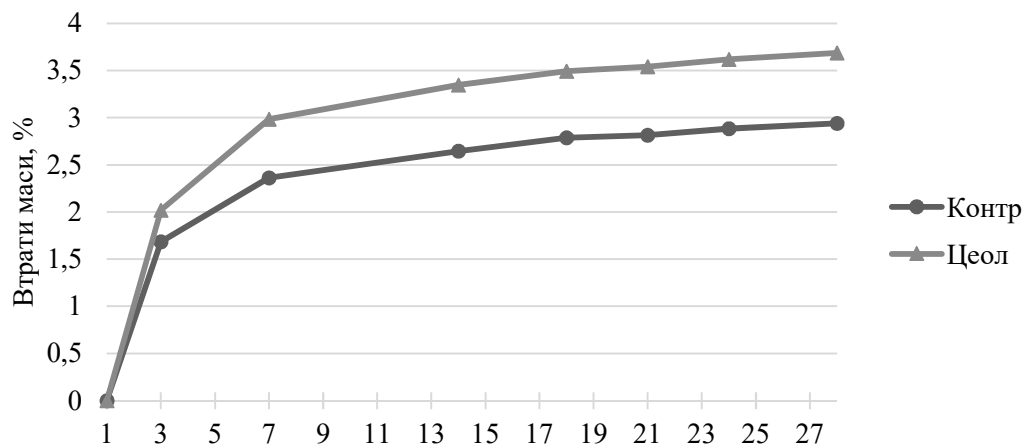


Рисунок 5.3 - Втрати маси ВБТН, що зберігались в сухих умовах

Один з показників, який дозволяє спрогнозувати морозостікість ВБТН є водопоглинання. Як видно з табл. 5.4, водопоглинання виробів за масою з добавкою ЦПК є нижчим, що свідчить про їх більшу щільність порівняно з ВБТН без добавок.

Таблиця 5.4

Водопоглинання дрібноштучних виробів

Умовне позначення бетону	Умови зберігання	Водопоглинання	
		за масою, %	за об'ємом, %
Контр	Нормальні	3,0	5,8
Цеол	Нормальні	1,8	3,5
Контр	Сухі	4,3	7,9
Цеол	Сухі	2,2	4,1

Таким чином, ЦПК можна рекомендувати для виготовлення ВБТН, які покращують будівельно-експлуатаційні властивості, а в перспективі - здатні забезпечити необхідні властивості покриття.

Розрахунок економічної ефективності впровадження розроблених бетонів проводили за типовою методикою визначення економічної ефективності капітальних вкладень та згідно з інструкцією з визначення економічної ефективності використання в будівництві нової техніки, винаходів і рацпропозицій СН-509. Так як додаткових капітальних вкладень впровадження нових матеріалів не передбачало, визначення економічного ефекту полягає в аналізі витрат на одиницю продукції (1 м³ жорсткого бетону) за базовим та новим варіантом. Як базовий варіант прийнято технологію виготовлення бетонних сумішей без мінеральних добавок з використанням портландцементу ПЦ ІІ/А-Ш-500. Нова технологія полягає в використанні активної мінеральної добавки цеоліту, що дозволяє зменшити витрату цементу та покращити технологічні властивості виробів.

Згідно проведених досліджень визначено (табл. 5.3), що через зростання міцності на 28 добу тверднення в сухих умовах, використання мінерального додатку при виготовленні бетонної суміші дозволяє знизити витрату цементу на 10% порівняно із базовими бетонами при збереженні заданих показників по водопоглинанню, та класу міцності на стиск В35. Порівняно з базовою технологією, економія від виготовлення бетонних сумішей з використанням мінерального додатку дорівнює різниці між вартістю матеріалів до і після впровадження нової технології.

Оцінка економічності використання мінерального додатку при виготовленні бетонних елементів проводилась за різницею собівартості одиниці продукції ($E = C_1 - C_2$), а також з врахуванням зниження приведених витрат внаслідок збільшення терміну експлуатації виробів, збільшення їх міцності та скорочення виробничого циклу через зниження тривалості внутрішнього догляду:

$$E = (C_1 - C_2) \cdot A,$$

де E – економічний ефект від впровадження нової технології;

C_1 і C_2 - собівартість одиниці продукції виготовленої за базовою та новою технологією;

A - об'єм випуску продукції протягом 1 року, м³.

Ґрунтуючись на сучасні ціни сировинних складників та витрат основних компонентів бетону приведено розрахунок статей витрат та собівартості для приготування 1 м³ бетонних сумішей при виготовленні бруківки за традиційною (табл. 5.5) рецептурою.

Таблиця 5.5

Розрахунок витрат на матеріали для приготування 1 м³ бетонної суміші за існуючою рецептурою

№ з/п	Найменування складника	Норма витрат	Ціна одиниці, грн.	Вартість 1 м ³ , грн.
1	ПЦ II/A-Ш- 500, т	0,380	1650	627
2	Пісок, т	0,500	190	95
3	ПВПГП (0-5 мм), т	0,775	180	139,5
4	Щебінь (5-10 мм), т	0,850	220	187
5	Комплексна добавка, л	2,52	21	52,92
	Всього			1101,42

Розрахунок витрат на матеріали для приготування бетонної суміші при виготовленні пробної партії ВБТН з використанням цеолітового полідисперсного компоненту зведено в табл. 5.6.

Показано, що використання мінерального компоненту при виготовленні жорстких бетонних сумішей для дрібноштучних бетонних виробів дозволяє одержати загальний економічний ефект від впровадження розробки при

виготовленні 1 м³ завдяки економії в'язучого, бетонної суміші – 39,9 грн., що при річному об'ємі випуску продукції буде рівним 656,64 тис.грн.

Розрахунок економічного ефекту від використання нової технології:

$$\text{Економічний ефект } E = 1101,42 - 1061,52 = 39,9 \text{ грн.}$$

$$\text{Річний економічний ефект } E_p = 39,9 \times 231 \times 890,5 \times 0,08 = 656,64 \text{ тис. грн.,}$$

де, 230 – середня кількість робочих днів у році, 890,54 – середня фактична продуктивність вібропресувальної установки, м²/зм, 0,08 – товщина виробу, см.

Таблиця 5.6

Розрахунок витрат на матеріали для приготування 1 м³ бетонної суміші за новою рецептурою

№ з/п	Найменування складника	Норма витрат	Ціна одиниці, грн.	Вартість 1 м ³ , грн.
1	ПЦ II/A-III- 500, т	0,342	1650	564,3
2	Пісок, т	0,500	190	95
3	ПВПГП (0-5 мм), т	0,775	180	139,5
4	Щебінь (5-10 мм), т	0,850	220	187
5	Цеоліт, т	0,038	600	22,8
6	Комплексна добавка, л	2,52	21	52,92
	Всього			1061,52

Беручи до уваги вищенаведені розрахунки можна зробити висновок, що з економічної точки зору більш доцільно і раціонально використовувати розроблену технологію виробництва бетону, завдяки якій можна досягти суттєвого зменшення витрат на виробництво і збереження матеріально-технічних ресурсів. Також використання нової технології дозволяє зекономити кошти на догляді за

дрібноштучними бетонними виробами в суху і жарку погоду завдяки ефекту «внутрішнього догляду», що забезпечується введенням цеоліту.

Таким чином, вібропресування наджорстких бетонних сумішей дає можливість знизити витрати ресурсів на виготовлення бетонних виробів за рахунок зниження витрат в'язучого та ефективного використання полідисперсного мінерального компоненту, також дозволяє суттєво покращити властивості бетону. Акт впровадження у виробництво наведений у Додатку В.

5.2 Економічна ефективність влаштування дорожнього покриття з використанням розроблених бетонів

Основний економічний ефект від впровадження високоміцних бетонів при будівництві дорожнього покриття буде забезпечений за рахунок зменшення товщини плити з розробленого високоміцного бетону порівняно з традиційним, і, відповідно зниження витрат на матеріали, виробництво бетонної суміші, її доставку та укладання. Тому для визначення економічного ефекту потрібно знайти, яку мінімальну товщину плити з розробленого цементобетону можливо сконструювати із забезпеченням необхідних коефіцієнтів міцності.

Згідно ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування», цементобетонне дорожнє покриття розраховується з урахуванням складу транспортного потоку, очікуваної інтенсивності руху до реконструкції, ґрунтово-кліматичних умов. Розрахунок проводиться по граничних станах, які визначають втрати несучої здатності, виходячи з розрахункових схем і використовуючи нормовані розрахункові характеристики. Розрахунок проводиться за допомогою оцінки характеристик заздалегідь розробленого пакету дорожнього

покриття:

- міцність верхніх шарів дорожнього покриття;
- стійкість незв'язних матеріалів в шарах основи і земляного полотна на зсув і накопичення уступів в поперечних швах шару бетону;
- стійкість дорожнього одягу до впливу дії заморожування-відтавання;
- здатність дренажного шару базового шару видалити вологу.

Жорсткі покриття обчислюються на основі надійності. Допустимий (необхідний) коефіцієнт надійності (K_n), який визначає мінімальне значення коефіцієнта міцності ($K_{mц}$), який дорожній одяг повинен мати до кінця терміну служби між капітальним ремонтом, нормалізується в залежності від категорії дороги .

Вхідні дані для розрахунку покриття включають:

- параметри транспортного навантаження (розрахункова інтенсивність, розрахункова навантаження);
- параметри дороги (категорія, ширина дорожнього полотна, термін служби дорожнього покриття);
- параметри земляного полотна та умови його роботи (тип місцевості за зволоженням, типи ґрунтів, рівень підземних вод);
- кліматичний регіон.

Проте, ГБН не враховує напруження, що виникають на краю плити, а також напруження короблення, які зростають із зменшенням товщини, тому доцільно проводити також розрахунок альтернативним методом, зокрема методом Вестергаарда [14].

Загальні положення розрахунку покриття згідно методу Вестергаарда :

1. Транспортні навантаження

Параметр реакції основи:

$$k_z = \frac{E_{zast}}{\omega 2a(1-\mu_{gr}^2)}$$

E_{zast} – еквівалентний модуль пружності основи, МПа

ω – коефіцієнт надійності

a – радіус відбитку колеса

μ_{gr} – коефіцієнт Пуассона для ґрунту, $\mu_{gr} = 0,3$

Радіус відносної жорсткості плити

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_b \cdot h^3}{12(1 - \mu^2)k_z}}$$

E_b і μ - модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для бетону;

μ_0 - коефіцієнт Пуассона для матеріалу під ц/б плитою;

Оскільки дорожня плита має кінцеву довжину і ширину, то характер або інтенсивність максимального навантаження, викликані прикладанням даного транспортного навантаження, залежать від розташування навантаження на поверхні дорожнього покриття. Існують три типові місця розташування: внутрішнє, край і кут, де існують різні умови безперервності плит. Ці місця називаються позиціями критичного навантаження.

Коли внутрішня точка завантажується, тільки невелика площа покриття не піддається згинальному моменту. Вестергаард дає співвідношення для еквівалентного радіуса опорної ділянки в рівнянні

$$b = \begin{cases} \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675 h & \text{if } a < 1.724 h \\ a & \text{otherwise} \end{cases}$$

де a - радіус розподілу навантаження колеса, м і h - товщина плити, м.

Напруження, відповідно в середині, на краю і на куті плити:

$$\sigma_1 = \frac{0.275P}{h^2} (1 + \mu) \left[\log \frac{Eh^3}{kb^4} - 54.54 \left(\frac{i}{L} \right)^2 z \right]$$

$$\sigma_2 = \frac{0.529P}{h^2} (1 + 0.54\mu) \left(\log \frac{Eh^3}{kb^4} - 0.71 \right)$$

$$\sigma_3 = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{1}{i^4} \right)^{0.15} \cdot (a\sqrt{2})^{0.6} \right]$$

де h - товщина плити, см, P - навантаження колеса, МН, a - радіус прикладання навантаження колеса, м, i - радіус відносної жорсткості, м; b - радіус ділянки опору, м

Коефіцієнт забезпечення

$$n = R_{zg} / \sigma_n$$

2. Температурні напруження

На краю плити

$$\sigma = \frac{CE\alpha_T\Delta T}{2}$$

Посередині плити

$$\sigma_1 = \frac{E\alpha_T\Delta T}{2} \left(\frac{C_1 + \mu C_2}{1 - \mu^2} \right)$$
$$\sigma_2 = \frac{E\alpha_T\Delta T}{2} \left(\frac{C_2 + \mu C_1}{1 - \mu^2} \right)$$

Де α_T коефіцієнт теплового розширення бетону, $1,2 * 10^{-5}$, C_1 , C_2 – дирекційні коефіцієнти (з номограми Рисунок 5.2.1), L_x і L_y - довжина і ширина плити, l - радіус відносної жорсткості.

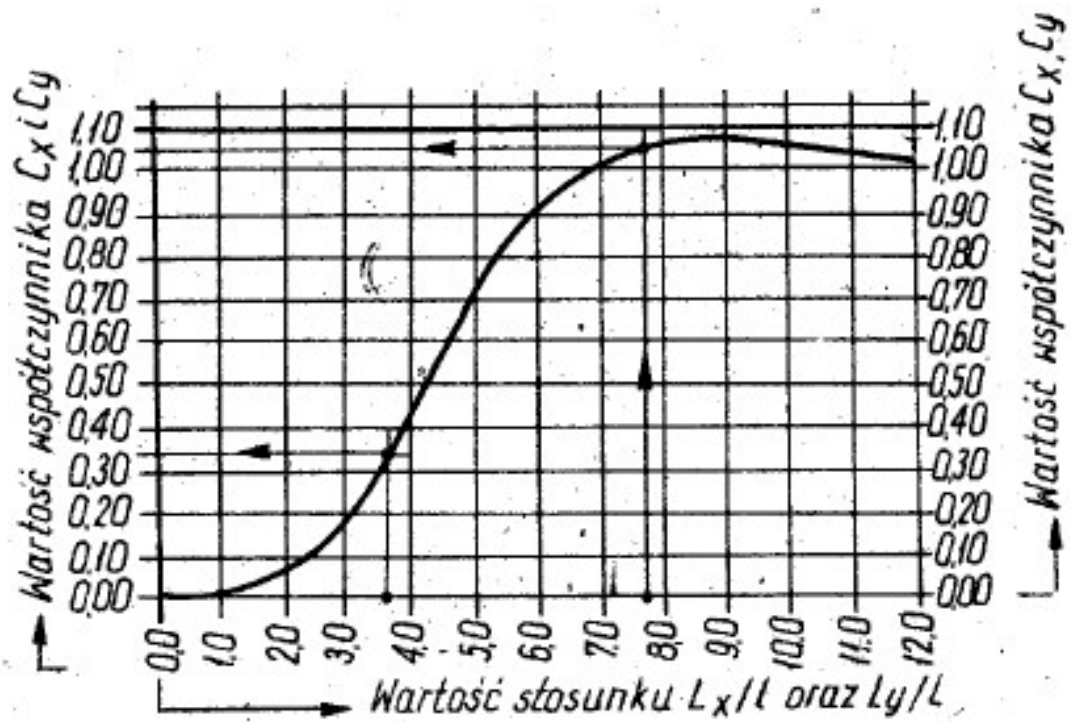


Рисунок 5.4 - Дирекційні коефіцієнти температурних напружень

3. Загальні напруження

$$\sigma_{\text{CALK}} = \sigma_{\text{RUCH}} + \sigma_{\text{TEMP}} \cdot \alpha$$

$$\alpha = 0,5..0,6$$

σ_{RUCH} – транспортні навантаження, МПа

σ_{TEMP} – температурні навантаження, МПа

Допустимі загальні напруження, МПа

$$\sigma_{\text{DOP}} = \frac{R_{\text{zg}}}{n}$$

R_{zg} – міцність бетону на розтяг при згині, МПа

$n = 1,4..1,8$ – коефіцієнт забезпечення

Розрахунок проведено для таких бетонів: NSC – традиційний дорожній цементобетон $R_{\text{tb}}=3,2$ МПа; HSC – розроблений високоміцний бетон, $R_{\text{tb}}=10$ МПа

Результати розрахунку бетонної плити покриття згідно ГБН та методом

Вестергаарда наведені в табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Результати розрахунку бетонної плити покриття

Стандарт	ГБН		Метод Вестергаарда		Відмітки
	NSC, h=25см	HSC, h=18см	NSC, h=25см	HSC, h=18см	
Транспортні навантаження, МПа	3,55	6,56	0,73	1,38	Внутрішній
			1,18	2,19	Край
			1,66	3,61	Кут
Температурні навантаження, МПа	3,1	4,8	2,04	3,16	Поздовжній
			2,18	3,38	Поперечний
Розрахунковий коефіцієнт надійності	1,44	2,44	2,40	4,08	Для методу Вестергаарда – розрахункові та допустимі навантаження, МПа
Необхідний коефіцієнт надійності	1,39	1,39	2,28	4,69	

Розрахований економічний ефект (Додаток 1) від впровадження технології при будівництві 1000 м² складає 92,514 тис.грн.

5.3 Промислова апробація високоміцних бетонів для дорожніх покриттів

У серпні 2019 року проведено випробування дослідної партії бетонної суміші та бетону підвищеної довговічності на його основі, для влаштування покриття проїздів на території ТзОВ «Дрогобицький бетонний завод».

Для приготування бетону було використано портландцементу ПЦ І-500-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент» з комплексним модифікатором (10 мас.% цеолітового полідисперсного компоненту, 1,0 мас.% суперпластифікатора та

0,15 мас.% повітровтягувальної добавки). Дослідженнями встановлено, що використання комплексу розроблених забезпечило необхідну рухливість бетонної суміші (клас за легковкладальністю S3), що дозволило влаштувати покриття за допомогою засобів малої механізації. Також вирішено технологічні завдання забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик, одержання високої ранньої ($f_{ctb}^7=4,9$ МПа) та проектної міцності на розтяг при згині (клас бетону Btb 5,6). Об'єм втягнутого повітря у суміші становив 5,1 %, водопоглинання за масою – 2,1 мас.%.

Застосування високоміцних бетонів з підвищеною довговічністю забезпечило прискорений набір ранньої міцності, що дозволило знизити товщину плити покриття до 21 см та пришвидшити відкриття руху по ній. Використання пористого цеолітового компоненту, що здійснює функцію внутрішнього догляду, створило можливість скоротити тривалість догляду за покриттям в сухих умовах та уникнути самообезводнення бетону.

Загальний обсяг вкладеного бетону склав 22 м³. Акт впровадження наведений у додатку В.

Висновки до розділу 5

1. У виробничих умовах ПП «Застава» виконано промислову апробацію розробленого високоміцного бетону при випуску виробів бетонних тротуарних неармованих типу «Старе місто». Введення 10 мас.% полідисперсного цеолітового компоненту та 1 мас.% суперпластифікатора до складу бетону дозволило досягнути високої ранньої міцності ($R_c^7=29,6$ МПа), низького водопоглинання (4,3 мас.%) виробів. Відсутність самообезводнення бетону, виготовленого при низькому водоцементному відношенні за рахунок реалізації умов внутрішнього догляду забезпечило отримання міцності бетону 50,2 МПа (клас бетону за міцністю на стиск

В35). Передбачуваний річний економічний ефект від виготовлення виробів бетонних тротуарних неармованих з використанням ЦПК, з врахуванням економії в'язучого, зниження тривалості витримки виробів у камері та підвищення продуктивності виробництва, складає 656,64 тис.грн.

2. Порівняльний розрахунок витрат на влаштування дорожнього покриття для традиційного та розробленого високоміцного бетону свідчить, що використання бетону з класом міцності на згин $B_{tb} 8,0$ дає змогу знизити товщину конструкції з 25 до 18 см із забезпеченням розрахункових коефіцієнтів надійності. Питомий економічний ефект від зниження вартості матеріалів і виконання робіт складає 92 тис.грн. на 1000м^2 дорожнього покриття.

3. Проведено промислову апробацію розроблених бетону при влаштуванні цементобетонного покриття проїздів на території ТОВ «Дрогобицький бетонний завод». Результати випробувань підтвердили досягнення високої ранньої ($f_{ctb}^7=4,9$ МПа) та проектної міцності на розтяг при згині ($f_{ctb}^{28}=6,4$ МПа) при забезпеченні показників рухливості бетонної суміші (марка за легковкладальністю S3), що дозволило влаштувати покриття за допомогою засобів малої механізації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено науково-прикладну задачу розроблення високоміцних бетонів транспортного призначення з підвищеними будівельно-експлуатаційними характеристиками. За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано наступне:

1. Встановлена можливість одержання високоміцних бетонів транспортного призначення з покращеною мікро- та мезоструктурою та підвищеною довговічністю. Показано доцільність використання як модифікаторів пуцоланічних полідисперсних мінеральних компонентів в поєднанні з полікарбосилатним суперпластифікатором та повітровтягувальною добавкою для регулювання водно-повітряного співвідношення, впорядкування порового простору бетону і формування комплексу підвищених експлуатаційних властивостей.

2. Показана позитивна роль крупних фракцій пуцоланових полідисперсних компонентів у покращенні гранулометрії тверднучих систем. Шляхом аналізу розподілу частинок цеолітового та перлітового компонентів за розмірами встановлено, що вміст фракції 60 - 160 мкм в їх складі становить близько 50%. Це компенсує нестачу відповідних фракцій у діапазоні між розміром частинок цементу і піску, а відтак забезпечує неперервність гранулометричного складу та більш щільне упакування зерен на рівні мезоструктури бетону, впорядковуючи тим самим поровий простір.

3. Дослідженнями модельних систем виявлено, що кореляції між рівнем активності пористих мінеральних добавок різної дисперсності за поглинанням СаО та міцністю не спостерігається. Так, цеолітові мінеральні компоненти володіють

більшою порівняно з перлітовими активністю за зв'язуванням вапна (270, 307, 165 та 192 мг/г для ЦПК, ЦТК, ППК і ПТК відповідно). Найвищим індексом пуцоланічної активності за міцністю на згин ($K_{па90} = 1,14$) характеризується склад з ЦПК. Встановлено, що дрібнозернисті бетони з добавкою ЦПК, незважаючи на зростання водопотреби ($\Delta V/Ц = 9\%$) для забезпечення однакової рухливості суміші, характеризуються вищою міцністю ($\Delta R_{зг} = 9\%$) порівняно з бетоном контрольного складу. Таким чином, відбувається зменшення дійсного В/Ц відношення сумішей завдяки здатності пористих компонентів акумулювати воду в процесі перемішування.

4. Фізико-хімічними дослідженнями показано позитивну роль ЦПК у процесах формування мікроструктури. В результаті масоперенесення у внутрішньокристалічній каналній системі цеоліту, утворюється щільна дрібнопориста структура цементної матриці, насичена гелеподібними та субмікрокристалічними голчасто-волокнистими низькоосновними гідросилікатами кальцію типу CSH(I), рівномірно розподіленими в об'ємі тверднучої системи. Встановлено, що внаслідок цього відбувається краще заповнення і кольматація порового простору, армування зон контактної взаємодії, зменшується кількість дефектів та дислокацій, підвищується опір руйнуванню та зростає міцність на розтяг при згині.

5. Методами експериментально-статистичного моделювання оптимізовано вміст ЦПК (10 мас.%) та суперпластифікатора Sika Viscocrete 5320 (1,0 мас.%) в бетоні складу 1:1,7:3,5 на основі сумішей з маркою за легковкладальністю S3 за критеріями міцності. Показано, що комплекс прийнятих технологічних рішень (використання ЦПК в поєднанні з 1 мас.% Sika Viscocrete 5320 та 0,01 мас.% Sikanol A) на стадії проектування бетонів транспортного призначення відіграє позитивну роль в забезпеченні зростання міцності на розтяг при згині на 7-15%, тріщиностійкості ($\Delta GF = 67$ Дж/м²), морозостійкості (не менше F150), водонепроникності (WPD=3,5мм) та зниження глибини карбонізації (з 9 до

2 мм). Загальна пористість та середній діаметр пор бетонів з добавкою ЦПК знижуються на 37 і 33% відповідно, деформації усадки зменшуються у 2,6 та 5,4 разів для складів без вмісту і з вмістом повітровтягувальної добавки відповідно.

6. Аналізом порової структури бетону з В/Ц=0,35 номінального складу 1:1,65:2,88 з вмістом ЦПК за допомогою комп'ютерної мікротомографії встановлено, що введення повітровтягувальної добавки в кількості 0,15 мас.% забезпечує оптимальний вміст (6,5 об.%) та розподіл за розміром дрібнодисперсних бульбашок втягнутого повітря, які, виступаючи демпферами напружень, разом із модифікуванням мікроструктури бетону, сприяють гальмуванню процесів мікротріщиноутворення на докритичній ($G_i=247$ Дж/м²) та сповільнюють рух магістральної тріщини в закритичній ($W_L=295$ Дж/м²) стадіях. Бетони з оптимальним вмістом втягнутого повітря також характеризуються високими фізико-механічними та експлуатаційними показниками: міцністю на стиск ($f_{cm}=66,4$ МПа) і розтяг при згині ($f_{ctb}=10,1$ МПа), а також стійкістю до дії циклів поперемінного заморожування-відтавання ($\Delta f_{cm} = 5,3\%$), водопоглинанням ($W_m=2,1$ %), корозійною стійкістю ($K_{C3z}=0,80$).

7. Підтверджено можливість використання пористих полідисперсних компонентів для забезпечення внутрішнього догляду за бетонами в сухих умовах тверднення та нівелювання впливу самообезводнення. Встановлено, що внутрішня відносна вологість бетону з В/Ц=0,35 та добавкою ЦПК через 14 діб тверднення при температурі 400С і відносній вологості повітря 38% є на 10 % вищою порівняно з контрольним складом. Введення до складу бетону полідисперсних компонентів дає змогу на 10-30 % підвищити опір згинаючим навантаженням як в нормальних температурно-вологісних, так і в повітряно-сухих умовах тверднення без значних вологиутрат та падіння міцності на стиск.

8. Результати дослідно-промислового впровадження підтверджують ефективність використання розроблених високоміцних бетонів для будівництва цементобетонних покриттів та виготовлення виробів бетонних тротуарних

неармованих. Ефективність від впровадження розроблених високоміцних бетонів складає 92 тис.грн. на 1000 м² дорожнього покриття. Передбачуваний річний економічний ефект від зниження вартості виготовлення виробів бетонних тротуарних неармованих складає 656,64 тис.грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абид, Н., Голашевски, К., Якубчак, А., & Коваль, С. (2012). Влияние водонасыщенных добавок на свойства цементных растворов, твердеющих при повышенной температуре. *Вестник национального технического университета «ХПИ» «Химия, химическая технология и экология»*, Харьков: НТУ. –59(3). 47-53.
2. Баженов Ю.М. (1987) *Технология бетона: Учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-е изд., перераб.* Москва: Высш. шк.
3. Батраков, В. Г. (1998). Модифицированные бетоны. Теория и практика, 2.
4. Бліхарський, З. Я. (2011). Залізобетонні конструкції в агресивному середовищі за дії навантаження та їх підсилення: монографія. *ЗЯ Бліхарський–Львів: Видавництво Львівської політехніки.*
5. Бутт, Ю. М., & Тимашев, В. В. (1973). Практикум по химической технологии вяжущих материалов. *Москва. Высшая школа.*
6. Гамеляк, І. П., & Смолянець, В. В. (2013). Застосування цементобетонного покриття в дорожньому будівництві. *Дорожня галузь України*, (6), 46-51.
7. Гамеляк, І. П. (2011). Про ефективність використання високоміцного цементобетону для будівництва жорстких покриттів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, (81), 30-39.
8. Гамеляк, І. П., Карафізі, Л. М. (2011). Проблеми і перспективи влаштування покриттів із блоків мощення. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, (80), 23-33.
9. Гамеляк, І. П., Шургая, А. Г., Якименко, Я. М., Чиженко, Н. П., & Карпюк, О. А. (2014). Порівняння сучасних добавок для високоміцного дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, (92), 38-49.
10. Гапоненко, Е. А., & Кровяков, С. А. (2013). Обеспечение

долговечности бетона водопропускных и водоотводных сооружений на автомобильных дорогах. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (26), 53-58.

11. ГБН В.2.3-37641918-557:2016 (2016) Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Харків: ХНАДУ.

12. Гевюк, І. М., Кропивницька, Т. П., & Саницький, М. А. (2015). Композиційні портландцементи з добавками природного цеоліту та вапняку. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (31), 149-156.

13. Гоц, В. І. (2003). Бетони і будівельні розчини: Підручник. К.: ТОВ УВПК "ЕкосОб", К.: КНУБА.

14. Гоц, В. І., Ластівка, О. В., Руденко, І. І., & Волинська, Є. В. (2017). Шлаколушний бетон для дорожніх основ і покриттів з використанням відходу флотації золотовмісної руди. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (33), 23-30.

15. Дворкін, Л. Й., & Дворкін, О. Л. (2007). Основи бетонознавства. Київ: Основа.

16. Дворкін, Л. Й., Житковський, В. В., Каганов, В. О. (2006). Бетони на основі наджорстких сумішей. Рівне: Вид-во РДЦНТЕІ. 179 с.

17. Дворкін, Л. Й., Марчук, В. В., & Яковчук, В. В. (2017). Проектування складів дорожніх бетонів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, (32), 61-67.

18. Довгань, П. М., Кровяков, С. А., Керш, В. Я., Еремина, Н. А., & Чепиль, С. Р. (2000). Влияние факторов состава мелкозернистого бетона на его поровую структуру. *Вісник ОДАБА*, 1, 8-11.

19. Дорошенко, О. Ю., & Дорошенко, Ю. М. (2012). Проблеми довговічності бетонів транспортного будівництва. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту*. Сер.:

Транспортні системи і технології, (20), 45-49.

20. Дорошенко, О. Ю., & Дорошенко, Ю. М. (2014). Взаємозв'язок структури та властивостей бетону для транспортних споруд. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*, (25), 5-14.

21. ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови (EN 206 1:2000,NEQ) [Текст]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 109 с.

22. ДСТУ Б В.2.7-227. Бетони. Методи визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) при статичному навантаженні. - К.: Укрархбудінформ, 2010. - 23 с.

23. ДСТУ Б В.2.7-71-98 Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. - К.: НДПВІстромсировина, 1998. - 28 с.

24. Зайченко, Н. М., & Лахтарина, С. В. (2011). Внутренний уход и аутогенная усадка высокопрочных бетонов. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 246-254.

25. Каганов, В. О. (2000). Технологія влаштування покриття доріг і тротуарів з бетонних дрібноштучних фігурних елементів мостіння.

26. Климов Ю. А. Опыт применения высокопрочного бетона в зарубежном строительстве / Ю. А. Климов , В. В. Паладий , Г. А. Голубничий II Научно-технические проблемы современного железобетона: міжвідомчий науково- технічний збірник наукових праць. - Київ: НДІБК, 2003- Випуск 59, книга 1. -С. 52-56.

27. Клочко, Б. Г., Бычков, С. А., Момот, В. А., Кушвид, А. А., Горидько, Д. В., & Пунагин, В. В. (2004). Обеспечение стойкости бетона в условиях агрессивной среды. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*, (4), 188–191.

28. Колесник, Д. Ю., Пушкарьова, К. К., & Шейнич, Л. О. (2012). Сучасні

уявлення про корозію цементного каменю в бетоні під дією води. *Автошляховик України*, (4), 33-37.

29. Комохов П. Г. Диссипативные свойства цементной матрицы цементного композита повышенной прочности и долговечности / П. Г. Сомохов // *Строительные материалы и изделия*. - 2001. - №2. - С. 31-32.

30. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / [В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, 1. С. Дорофеев, А. В. Сиренко.]. -К.: Будивельник, 1991. - 144 с.

31. Кривенко П. В. Роль вяжущих веществ в формировании структуры бетона как конструкционного материала / П. В. Кривенко // *Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. - Київ: НДІБК, 2003 - Випуск 59, книга 1. -С. 43-51.

32. Кривенко, П. В. (2003). Прогнозная оценка надежности и долговечности цементного камня. *Будівельні матеріали та виробы*, (5), 13-15.

33. Кривенко, П. В., Пушкарьова, К. К., Барановський, В. Б., Кочевих, М. О., Гасан, Ю. Г., Константиновський, Б. Я., & Ракша, В. О. (2004). Будівельне матеріалознавство. К.: ТОВ УВПК «Екс об». –2004.–704 с.

34. Марків Т. Є. Золовмісні композиційні портландцементи, модифіковані поліфункціональними додатками: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.11 „Технологія тугоплавких неметалічних матеріалів / Т. Є.Марків. - Львів: Націон. ун-т „Львівська політехніка”, 2004. - 18 с.

35. Модифіковані композиційні цементы: навч. посібник / Саницький М.А., Соболев Х.С., Марків Т.Є. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. -132 с.

36. Плугин, А. А., Плугин, А. Н., Калинин, О. А., Романенко, А. В., & Забияка, А. А. (2009). Бетоны и растворы для восстановления эксплуатационных свойств транспортных сооружений. *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво)/Державне підприємство*

«Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України.-Вип. 72.–Київ, ДП НДІБК, 357.

37. Плугин, А. Н., Плугин, А. А., & Трикоз, Л. В. (2012). Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: В 3-х тт. К.: Наук. думка.

38. Приймаченко, А. С., Шейніч, Л. О., Пушкарьова, К. К., & Гедулян, С. І. (2015). Дослідження сумісності роботи мінеральних добавок в складі високоміцних сульфатостійких бетонів. *Наука та будівництво*, (2), 4-8.

39. Пушкарьова К. К. Технічні переваги модифікації композиційних в'язучих систем цеолітовими додатками та перспективність їх використання для отримання бетонів із наперед заданими властивостями / К. К. Пушкарьова, О. А. Назим // Композиційні матеріали для будівництва: вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. - Макіївка, 2003. - Випуск 2003-1(38), - С. 88-91.

40. Рунова, Р. Ф., Руденко, И. И., & Троян, В. В. (2009). Концепция разработки высокопрочных бетонов на основе отечественной минеральной базы. *Міжвід. наук.-техн. зб. “Будівельні конструкції”*.–К.: НДІБК, 24-35.

41. Рунова, Р. Ф., Троян, В. В., Каменотрус, С. В., & Тихолаз, Є. В. (2012). Вплив хімічних добавок різної природи на кінетику карбонізації бетону. *Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка*, (43), 133-138.

42. Соболев Х.С. Вплив активних мінеральних додатків на властивості композиційних цементів / Х. С. Соболев, Т. Є. Марків, М. А. Саницький [та ін.] // *Хімія, технологія речовин та їх застосування: вісник нац. ун-ту „Львівська політехніка”*. - Львів, 2003. - №448. - С. 274- 278.

43. Соболев Х.С. Модифіковані композиційні цементні із додатками поліфункціональної дії: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня доктора техн. наук: спец. 05.17.11 „Технологія тугоплавких неметалічних матеріалів”/ Х.С. Соболев. - Львів: Націон. ун-т „Львівська політехніка”, 2006. -31 с.

44. Солодкий С. Й. Факторний експеримент у технології дорожніх бетонів на основі композиційних модифікованих цементів / С. Й. Солодкий, Р. М. Русин // Будівництво України. - 2004. - №3. - С. 8-12.

45. Солодкий С. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах: Монографія. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка» - 2008. – 144 с.

46. Солодкий, С. Й., Турба, Ю. В. (2014). Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю. Наукові нотатки, (46), 512-515.

47. Сопов, В. П., & Толмачев, Д. С. (2014). Влияние минеральных и воздухововлекающих добавок на усадку и свойства дорожных бетонов. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, (53), 363-368.

48. Тимашев В.В. Избранные труды. Синтез и гидратация в'яжущих материалов.-М.: Наука, 1986. – 224 с.

49. Толмачев, С. Н., & Бражник, А. В. (2014, June). Снижение прочности бетона при введении воздухововлекающих добавок в бетонную смесь. In *Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго-и ресурсосбережение: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции. Якутск, Северо-Восточный федеральный университет имени МК Аммосова, 3-4 марта 2014 г.* (p. 369). МЦНИП.

50. Толмачев, С. Н., Беличенко, Е. А., & Бражник, А. В. (2016). Способы защиты дорожных бетонов при действии агрессивных факторов. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, (62), 176-181.

51. Толмачов, С. М., Рідкозубов, О. О., & Захаров, Д. С. (2015). Проблеми підвищення міцності дорожніх бетонів на розтяг. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, (4), 219-225.

52. Троян, В. В. (2014). Моделювання тріщиностійкості бетону масивних монолітних конструкцій. *Вісник Одеської державної академії будівництва та*

архітектури, (53), 375-379.

53. Троян, В. В., & Сова, Н. О. (2013). Моделювання морозостійкості бетону. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, (49), 139-144.

54. Троян, В. В., & Товстоніс, В. В. (2008). Поліфракційність заповнювача як технологічний фактор формування структури високоміцного бетону. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*, (47), 661-670.

55. Факторы обеспечения долговечности дорожного цементного бетона / СН Толмачев, СЙ Солодкий. // *Вісник ОДАБА*. – Одеса, 2013. – Вип. 52. – С. 275-280.

56. Хероїм О. О. Ущільнення жорсткої бетонної суміші керованим вібраційним полем з пневмодовантажувачем / О. О. Хероїм, О. М. Черевко // *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвідомчий науково-технічний збірник / Національний університет "Львівська політехніка" ; відповідальний редактор З. А. Стоцько. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – Випуск 45. – С. 369–373.*

57. Чепурная, С. Н., Плугин, А. А., & Борзяк, О. С. (2018). Повышение коррозионной стойкости бетона транспортных сооружений добавкой высокодисперсного кальцита. *Науковий вісник будівництва*, (91, № 1), 292-298.

58. Чистяков, В. В. (2011). Вплив комплексної добавки на особливості твердіння і властивості цементобетону для покриття доріг. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, (39), 122-126.

59. Чистяков, В. В., та ін. "Цементобетони для покриття доріг." *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* 85 (2012): 48-55.

60. Чистяков, В. В., Шургая, А. Г., Дорошенко, Ю. М., Чиженко, Н. П., Кабусь, А. В., & Коваль, Л. Б. (2012). Модифіковані цементобетони для покриття доріг. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, (43), 212-216.

61. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий. – М., 1991. – 150 с.
62. Шейніч, Л. О., Іонов, Д. С., & Сопов, В. П. (2013). Особливості процесів структуроутворення цементного каменю, модифікованого комплексною органо-мінеральною добавкою. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, (52), 308-314.
63. Яцко, Ф. В. (2010). Довговічність захисного шару залізобетонних елементів мостів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 34, 154-158.
64. Afifi, M. S., & Abou-Zeid, M. N. (2016). Internal curing of high performance concrete using lightweight and recycled concrete aggregates. In *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*.
65. Ahmadi, B., & Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 134-141.
66. Aïtcin, P. C. (2011). *High performance concrete*. CRC press.
67. Aïtcin, P. C. (2003). The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and concrete composites*, 25(4-5), 409-420.
68. Atiş, C. D. (2002). High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3), 274–277.
69. Bentur, A., Igarashi, S. I., & Kovler, K. (2001). Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and concrete research*, 31(11), 1587-1591.
70. Bentz, D. P., Clifton, J. R., Ferraris, C. F., Garboczi, E. J., & Torrents, J. M. (1999). Transport properties and durability of concrete: literature review and research plan (No. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)-6395).
71. Bentz, D. P., Garboczi, E. J., & Quenard, D. A. (1998). Modelling drying shrinkage in reconstructed porous materials: application to porous Vycor glass. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 6(3), 211.

72. Bentz, D. P., Hansen, A. S., & Guynn, J. M. (2011). Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 824–831. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.008>
73. Bentz, D. P., Lura, P., & Roberts, J. W. (2005). Mixture proportioning for internal curing. *Concrete international*, 27(2), 35-40.
74. Bentz, D. P., & Weiss, W. J. (2011). *Internal curing: a 2010 state-of-the-art review*. Gaithersburg, Maryland: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
75. Bordelon, A. C. (2007). Fracture Behavior of Concrete Materials for Rigid Pavement Systems, M.S. Thesis. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2142/13722>
76. Bouzoubaâ, N., Bilodeau, A., Fournier, B., Hooton, R. D., Gagné, R., & Jolin, M. (2008). Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials: Laboratory and field test data. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(11), 1261–1275. <https://doi.org/10.1139/L08-067>
77. Brouwers, H. J. H., & Radix, H. J. (2005). Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research*, 35(11), 2116–2136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.002>
78. C. Bilim, Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3175–3180.
79. Caldarone, M. A. (2014). *High-strength concrete: a practical guide*. CRC Press.
80. Chatterji, S. (2003). Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), 759-765.
81. Collepardi, M. (1998). Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. *Cement and concrete composites*, 20(2-3), 103-112.
82. Craeye, B., Geirnaert, M., & Schutter, G. De. (2011). Super absorbing

polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.063>

83. Cusson, D., Lounis, Z., & Daigle, L. (2010). Benefits of internal curing on service life and life-cycle cost of high-performance concrete bridge decks - A case study. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.007>

84. D. Jana, A new look to an old pozzolan: clinoptilolite – a promising pozzolan in concrete, in: *Proceedings of the Twenty-Ninth Conference on Cement Microscopy*, Quebec City, PQ, Canada, 2007.

85. Daigic, L., Cusson, D., & Lounis, Z. (2009). Extending service life of high performance concrete bridge decks with internal curing. In *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Proceedings of the 8th Int. Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. <https://doi.org/10.1201/9780203882955.ch190>

86. Delatte, N. (2018). *Concrete pavement design, construction, and performance*. Crc Press. <https://doi.org/10.1201/9781482288483>

87. Deshpande, Y. S., & Hiller, J. E. (2012). Pore characterization of manufactured aggregates: recycled concrete aggregates and lightweight aggregates. *Materials and structures*, 45(1-2), 67-79.

88. DIN 1045-1:2008-08. *Concrete, Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Structures. – Part 1: Design and Construction*. BeuthVerlag GmbH, Berlin 2008.

89. Dvorkin, L., Bezusyak, A., Lushnikova, N., & Ribakov, Y. (2012). Using mathematical modeling for design of self compacting high strength concrete with metakaolin admixture. *Construction and Building Materials*, 37, 851-864.

90. Dyer, T. (2014). *Concrete durability*. Crc Press.

91. El-Dieb, A. S. (2007). Self-curing concrete: Water retention, hydration and moisture transport. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1282-1287

92. Erdem, T. K., Meral, Ç., Tokyay, M., & Erdoğan, T. Y. (2007). Use of perlite

as a pozzolanic addition in producing blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(1), 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.018>

93. Espinoza-Hijazin, G., & Lopez, M. (2011). Extending internal curing to concrete mixtures with W/C higher than 0.42. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1236–1242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.031>

94. Ghafari, E., Feys, D., & Khayat, K. (2016). Feasibility of using natural SCMs in concrete for infrastructure applications. *Construction and Building Materials*, 127, 724–732. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.070>

95. Ghafoori, N., & Tays, M. (2007). Abrasion Resistance of Early-Opening-to-Traffic Portland Cement Concrete Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(11), 925-935.

96. GjØrv, Odd E. *Durability design of concrete structures in severe environments*. CRC Press, 2014.

97. Hale, W. M., Freyne, S. F., & Russell, B. W. (2009). Examining the frost resistance of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 878-888.

98. Jamshidi, A., Kurumisawa, K., White, G., Nishizawa, T., Igarashi, T., Nawa, T., & Mao, J. (2019). State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement. *Construction and Building Materials*, 200, 713–755. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.286>

99. Karein, S., Joshaghani, A., Ramezaniapour, A., Isapour, S., & Karakouzian, M. (2018). Effects of the mechanical milling method on transport properties of self-compacting concrete containing perlite powder as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 172, 677-684.

100. Koval S. Modyfikowanie kompozytów cementowych przez dodatki – kompensatory skurczu / S.Koval, A.Jakóbczak, N.Abid // *Materiały, instalacje i technologie energooszczędne w budownictwie: Międz. konf., Biała Podlaska, 2012*. 184-189.

101. Kumar, S. V., & Santhanam, M. (2003). Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. *Indian Concrete Journal*, 77(9), 1324–1331.
102. Liu, Z., & Hansen, W. (2016). Freeze-thaw durability of high strength concrete under deicer salt exposure. *Construction and Building Materials*, 102, 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.194>
103. Lopez, M., Kahn, L. F., & Kurtis, K. E. (2010). High-strength self-curing low-shrinkage concrete for pavement applications. *International Journal of Pavement Engineering*, 11(5), 333–342. <https://doi.org/10.1080/10298436.2010.488731>
104. Lasser, F. P., Marchand, J., & Samson, E. (2008). Durability of concrete—degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 226–246.
105. Lv, Y., Ye, G., & De Schutter, G. (2019). Investigation on the potential utilization of zeolite as an internal curing agent for autogenous shrinkage mitigation and the effect of modification. *Construction and Building Materials*, 198, 669–676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.001>
106. Ma, X., Liu, J., & Shi, C. (2019). A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 218, 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.126>
107. Mangulkar, M., & Jamkar, S. (2013). Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. *International Journal Of Scientific & Engineering Research*, 4(5), 143–148.
108. Mehta, K. P. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete international*, 23(10), 61–66.
109. Mertens G., Snellings, R., Van Balen, K., Bicer-Simsir, B., Verlooy, P., & Elsen, J. (2009). Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 233–240.
110. Mohan Krishna, T., & Prafulla Devi, K. (2019). Internal curing efficiency of

pre-wetted lightweight fine aggregates on strength parameters of concrete. *International Journal of Recent Technology and Engineering*.
<https://doi.org/10.35940/ijrte.B1949.078219>

111. Mohr, P., Hansen, W., Jensen, E., & Pane, I. (2000). Transport properties of concrete pavements with excellent long-term in-service performance. *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1903-1910.

112. Moini, M., Flores-Vivian, I., Amirjanov, A., & Sobolev, K. (2015). The optimization of aggregate blends for sustainable low cement concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.019>

113. Nagrockiene, D., & Girskas, G. (2016). Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition. *Construction and Building Materials*, 113, 964–969. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.133>

114. Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete technology* (pp. 242-246). England: Longman Scientific & Technical.

115. Pleau, R., & Pigeon, M. (2014). *Durability of concrete in cold climates*. CRC Press.

116. PN-EN 12390-2 Testing hardened concrete. Part 2: Making and curing specimens for strength tests.

117. PN-EN 12390-3 Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.

118. PN-EN 12390-8 Testing hardened concrete. Part 8: Depth of penetration of water under pressure.

119. PN-EN 206:2014 Concrete – specification, properties, production and compatibility.

120. Polat, R., Demirboğa, R., & Khushefati, W. H. (2015). Effects of nano and micro size of CaO and MgO, nano-clay and expanded perlite aggregate on the autogenous shrinkage of mortar. *Construction and Building Materials*.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.032>

121. S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, P. Lura, M. Shekarchi, B. Ahmadi, An investigation on the use of zeolite aggregates for internal curing of concrete, *Construction and Building Materials* 40 (2013) 135–144.

122. Sabet, F. A., Libre, N. A., & Shekarchi, M. (2013). Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, 44, 175-184.

123. Smit, M. S., & Kearsley, E. P. (2015). Effect of paste content on the properties of high-strength concrete pavements. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 57(4), 20–29. <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2015/v57n4a3>

124. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete//Reported by ACI Committee 363, ACI 363R-92 (Reapproved 1997), p. 363R-2.

125. Thin and Ultra-Thin Whitetopping. (2004). Thin and Ultra-Thin Whitetopping. <https://doi.org/10.17226/23333>

126. Tran, Y. T., Lee, J., Kumar, P., Kim, K. H., & Lee, S. S. (2019). Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B: Engineering*, 165 (December 2018), 354–364. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.084>

127. Vejmelková, E., Koňáková, D., Kulovaná, T., Keppert, M., Žumár, J., Rovnaníková, P., ... Černý, R. (2015). Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance. *Cement and Concrete Composites*, 55, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.013>

128. Wei, Y., Wang, Y., & Gao, X. (2015). Effect of internal curing on moisture gradient distribution and deformation of a concrete pavement slab containing pre-wetted lightweight fine aggregates. *Drying technology*, 33(3), 355-364.

129. Weiss, W. J., Yang, W., & Shah, S. P. (1998). Shrinkage cracking of restrained concrete slabs. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(7), 765-774.

130. Weiss, W. J., Yang, W., & Shah, S. P. (2000). Factors influencing durability

and early-age cracking in high-strength concrete structures. Special Publication, 189, 387-410.

131. Wen, C., Chen, J., & Liu, Q. (2017). Research on Influence of Zeolite Powder on Internal Humidity and Autogenous Shrinkage of Self-Compacting concrete, 121(Icammce), 195–200. <https://doi.org/10.2991/icammce-17.2017.39>

132. Yu, L. H., Ou, H., & Lee, L. L. Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 33, 2003, no 1, p. 73-76.

133. Z. Sun, G.W. Scherer, Effect of air voids on salt scaling and internal freezing, *Cement and Concrete Research* 40 (2010) 260–270.

134. Zhang, J., Ding, X., Wang, Q., & Zheng, X. (2018). Effective solution for low shrinkage and low permeability of normal strength concrete using calcined zeolite particles. *Construction and Building Materials*, 160, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.029>

135. Zhutovsky, S., & Kovler, K. (2012). Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete. *Cement and concrete research*, 42(1), 20-26.

136. Zhutovsky, S., Kovler, K., & Bentur, A. (2002, June). Autogenous curing of high-strength concrete using pre-soaked pumice and perlite sand. In *Self-desiccation and its importance in concrete technology*, *Proceedings 3rd International Research Seminar, Lund, Sweden* (pp. 161-173).

ДОДАТКИ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Markiv, T., Sobol, K., Petrovska, N., & Hunyak, O. The Effect of Porous Pozzolanic Polydisperse Mineral Components on Properties of Concrete. In International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów. 2020. Springer, Cham. P. 275-282. (Scopus).

2. Hunyak, O., Sobol, K., Markiv, T., & Bidos, V. The effect of natural pozzolans on properties of vibropressed interlocking concrete blocks in different curing conditions. Production Engineering Archives, 2019. 22(22), P. 3-6. DOI:10.30657/pea.2019.22.01 (BazTech).

3. Гуняк О. М. Пуцоланічні добавки для портландцементів транспортного будівництва. Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. — № 877. — С. 88–93. (Index Copernicus).

4. Sobol, K., Markiv, T., Hunyak, O. Effect of mineral additives on structure and properties of concrete for pavements. Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering. 2017. Vol.12 №2. – P.95-100. (BazTech).

Статті у наукових фахових виданнях України:

5. Шевчук Г. Я., Гуняк О. М., Гнип О. П., Мішин В. М. Розробка бетонів для дорожніх покриттів підвищеної довговічності з використанням добавок полікарбонатного типу. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. Вип. 46. С. 371–376.

6. Markiv T., Huniak O., Sobol Kh. Optimization of concrete composition with addition of zeolitic tuff. Вісник Національного університету "Львівська політехніка".

Теорія і практика будівництва. 2014. № 781. С. 116–120.

7. Гуняк О. М., Соболь Х. С., Марків Т. Є. Оптимізація складів спеціальних цеолітовмісних портландцементів. Містобудування та територіальне планування. 2014. № 54. С. 139–143.

8. Марків Т. Є., Соболь Х. С., Бліхарський З. Я., Гуняк О. М. Дослідження будівельних розчинів з добавкою цеолітів. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2015. № 823. С. 222–228.

9. Солодкий С. Й., Гуняк О. М., Марків Т. Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 98. С. 247–255.

Наукові праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:

10. Solodkyu, S., Markiv, T., Sobol, K., Hunyak, O. Fracture properties of high-strength concrete obtained by direct modification of structure. In MATEC Web of Conferences. Vol. 116, p. 01016 -2017. EDP Sciences. eISSN: 2261-236X (SCOPUS)

11. Markiv T., Hunyak O., Sobol K., Blikharskyu Z. The effect of active mineral additives on properties of HSC in different hardening conditions // 20. Internationale Baustofftagung ibausil, Weimar, 12-14 September 2018. – 2018. – P. 851–857.

12. Markiv T., Sobol K., Hunyak O., Panek R., Franus M. The effect of zeolitic tuff on the properties of concretes // The 10th International Conference on the Occurrence, Properties, and Utilization of Natural Zeolites (24th to 29th of June 2018 in Cracow, Poland). – 2018. – P. 155–156.

13. Солодкий С.Й., Марків Т.Є., Гуняк О.М., Гостинецький Б.А. Вплив органо-мінеральних добавок на властивості високоміцних бетонів // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Харків: ХНУСА. -2015. - С. 29-34.

14. Марків Т.Є., Соболь Х.С., Гуняк О.М. Цеолітовмісні цемента для бетонів транспортного призначення. Сучасні тенденції розвитку і виробництва

силікатних матеріалів. - 2016, - С.97-99.

15. Hunyak O., Markiv T., Sobol K. Effect of mineral additives on structure and properties of concretes for pavements // XVI. International Scientific Conference Košice-Lviv-Rzeszów “Current Issues of Civil and Environmental Engineering Košice-Lviv-Rzeszów”. Book of abstracts. Kosice, 2017. – P. 21.

Відомості про апробацію результатів дисертації

Міжнародна науково-технічна конференція «Ефективні цеолітовмісні матеріали, їх властивості та особливості застосування» (м. Жовква, 21-23 квітня 2015 року);

Международная научно-практическая конференция "Эффективные технологические решения в строительстве с использованием бетонов нового поколения" (Харків, 14-15 жовтня 2015 року);

VI Міжнародна конференція SIKA по бетонам (Київ, 17-18 березня 2016 р.);
III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів» (Львів, 05-08 вересня 2016 року);

Міжнародна конференція «Сучасні методи і технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг, споруд на них та управління проектами їх розвитку» (м. Київ, 22-25 листопада 2016 року);

The 10th International Conference on the Occurrence, Properties, and Utilization of Natural Zeolites (24th to 29th of June 2018 in Cracow, Poland);

20. Internationale Baustofftagung Ibausil, (м. Веймар, Федеративна республіка Німеччина, 12-14 вересня 2018 року);

XVII International Scientific Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv - Košice – Rzeszów (Львів, 11 - 13 вересня 2019 року).

Затверджено

Зведений кошторисний розрахунок у сумі 596,879 тис. грн.
В тому числі зворотних сум _ тис. грн.

" _ " _____ 20__ р.

Калькуляція вартості 1000 м кв покриття товщиною 250 мм із стандартної цементобетонної суміші
Здобувацька

Локальний кошторис на будівельні роботи № 2-1-1
на на влаштування 1000 м кв покриття
1

Основа:
креслення (специфікації) №

Кошторисна вартість 496,648 тис. грн.
Кошторисна трудомісткість 0,1405 тис.люд.-год.
Кошторисна заробітна плата 6,558 тис. грн.
Середній розряд робіт 2,9 розряд

Складений в поточних цінах станом на "6 листопада" 2018 р.

№ п/п	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.-год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										заробітної плати	в тому числі заробітної плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	С331-38-2	Перевезення бетону, розчину спецтранспортом на відстань 30 км	т	600	<u>134,21</u>	<u>134,21</u>	80526	-	<u>80526</u>	-	-
2	ЕН27-30-1	Улаштування цементобетонного покриття товщиною 26 см бетоноукладальником при ширині укладання 6 м	1000 м2	1	<u>412755,17</u> <u>3656,71</u>	<u>8524,66</u> <u>1345,29</u>	412755	3657	<u>8525</u> <u>1345</u>	<u>67,38</u> <u>57,3479</u>	<u>67,38</u> <u>57,35</u>

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	ЕН27-30-5	Улаштування цементнобетонного покриття товщиною 26 см бетоноукладальником, при зміні товщини на кожні 0,5 см додавати або виключати до норм 27-30-1 – 27-30-4	1000 м2	-2	<u>46,70</u> -	<u>46,70</u> 6,99	-93	-	<u>-93</u> -14	<u>-</u> 0,3048	<u>-</u> -0,61
Разом прямі витрати по кошторису							493188	3657	<u>88958</u> 1331		<u>67,38</u> 56,74
Разом будівельні роботи, грн.							493188				
в тому числі:											
вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн.							400573				
всього заробітна плата, грн.							4988				
Загальновиробничі витрати, грн.							3460				
трудоємність в загальновиробничих витратах, люд.год.							16,38				
заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.							1570				
Всього будівельні роботи, грн.							496648				

-											
Всього по кошторису							496648				
Кошторисна трудоємність, люд.год.							140,5				
Кошторисна заробітна плата, грн.							6558				

Разом по главах 1-12:							496648				
ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.5.8.16	Кошторисний прибуток (П)						537				
ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.5.8.16	Кошти на покриття адміністративних витрат будівельних організацій (АВ)						214				
Разом (гл. 1-12 + П + АВ + Р + І)							497399				
Разом:							497399				
Податок на додану вартість							99480				
Всього по зведеному кошторисному розрахунку							596879				

Затверджено

Зведений кошторисний розрахунок у сумі 419,431 тис. грн.
В тому числі зворотних сум _ тис. грн.

" _ " _____ 20__ р.

Калькуляція вартості 1000 м кв покриття товщиною 180 мм із цементобетонної суміші з покращеними властивостями
Здобувацька

Локальний кошторис на будівельні роботи № 2-1-1
на на влаштування 1000 м кв покриття

1

Основа:
креслення (специфікації) №

Кошторисна вартість	348,813 тис. грн.
Кошторисна трудомісткість	0,13359 тис.люд.-год.
Кошторисна заробітна плата	6,34 тис. грн.
Середній розряд робіт	2,9 розряд

Складений в поточних цінах станом на "6 листопада" 2018 р.

№ п/п	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.-год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										заробітної плати	в тому числі заробітної плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	С331-38-2	Перевезення бетону, розчину спецтранспортом на відстань 30 км	т	360	134,21	134,21	48316	-	48316	-	-
2	ЕН27-30-1	Улаштування цементобетонного покриття товщиною 26 см бетоноукладальником при ширині укладання 6 м	1000 м2	1	505930,54	8524,66	505931	3657	8525	67,38	67,38
					3656,71	1345,29			1345	57,3479	57,35

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	ЕН27-30-5	Улаштування цементнобетонного покриття товщиною 26 см бетоноукладальником, при зміні товщини на кожні 0,5 см додавати або виключати до норм 27-30-1 – 27-30-4	1000 м2	-16	9488,53	46,70 6,99	-208748	-	-1027 -154	- 0,3048	- -6,71
Разом прями витрати по кошторису							345499	3657	55814 1191		67,38 50,64
Разом будівельні роботи, грн.							345499				
в тому числі:											
вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн.							286028				
всього заробітна плата, грн.							4848				
Загальновиробничі витрати, грн.							3314				
трудоємність в загальновиробничих витратах, люд.год.							15,57				
заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.							1492				
Всього будівельні роботи, грн.							348813				

-											
Всього по кошторису							348813				
Кошторисна трудоємність, люд.год.							133,59				
Кошторисна заробітна плата, грн.							6340				

Разом по главах 1-12:							348813				
ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.5.8.16	Кошторисний прибуток (П)						510				
ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.5.8.16	Кошти на покриття адміністративних витрат будівельних організацій (АВ)						203				
Разом (гл. 1-12 + П + АВ + Р + І)							349526				
Разом:							349526				
Податок на додану вартість							69905				
Всього по зведеному кошторисному розрахунку							419431				

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор ПП «Застава»
Прокопович З.Ф.



А К Т

про впровадження у виробництво партії високоміцних вібропресованих бетонних виробів типу «Старе місто» для дорожніх покриттів

Ми, нижче підписані, представник ПП «Застава» начальник виробництва Левочко Р.Б. та представники Національного університету "Львівська політехніка" к.т.н., доцент Марків Т.С., аспірант Гуник О.М., склали даний акт про те, що у жовтні-листопаді 2018 року проведено випробування дослідної партії високоміцних вібропресованих бетонних виробів типу «Старе місто» для дорожніх покриттів. Для приготування бетонних сумішей застосовували портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (витрата портландцементу – 340 кг на 1 м³ бетонної суміші), комплексу хімічну добавку для вібропресованих бетонів та цеолітовий полідисперсний компонент (ЦПК). Як заповнювачі використано кварцовий пісок Жовківського родовища ($M_{sp}=1,9$) та гранітний щебінь фракції 2-10 мм. Загальна кількість виготовлених бетонних виробів відповідає 27 м² влаштованого покриття.

Введення цеолітового полідисперсного компоненту в комплексі з хімічною добавкою до складу бетону дозволило досягти високої ранньої міцності (29,6 МПа), низького водопоглинання (4,3 мас.%) виробів при одночасній економії в'язучого, скороченні часу витримки в кліматичній камері. Використання ЦПК зменшує імовірність самообезводнення бетону, виготовленого при низькому водоцементному відношенні ($B/C=0,34-0,36$), та забезпечує отримання міцності 50,2 МПа (клас бетону за міцністю на стиск В35)

за рахунок внутрішнього догляду за бетоном, який після витримки в камері тверднув на складі готової продукції.

Акт підписали:

Представник ПП «Застава»
Начальник виробництва



Левочко Р.Б.

Представники Національного університету "Львівська політехніка"

Доцент, к.т.н.



Марків Т.С.

Аспірант



Гуняк О.М.



А К Т

про впровадження у виробництво партії високоміцного цементобетону
з підвищеною довговічністю для дорожнього покриття

Ми, нижче підписані, представник ТзОВ «Дрогобицький бетонний завод» завідувач виробництва Горячка Володимир Васильович та представники Національного університету "Львівська політехніка" д.т.н., професор Соболев Х.С., інженер Гуняк О.М., склали даний акт про те, що у серпні 2019 року проведено випробування дослідної партії бетонної суміші та бетону підвищеної довговічності на його основі, для влаштування покриття проїздів на території ТзОВ «Дрогобицький бетонний завод».

Загальний обсяг владеного бетону склав 22 м³.

Використання портландцементу ПЦ І-500-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент» з комплексним модифікатором (цеолітовий полідисперсний компонент, суперпластифікатор та повітронтигувальна добавка) у складі бетонів забезпечило необхідну рухливість бетонної суміші (клас за легковкладальністю Р3), що дозволило влаштувати покриття за допомогою засобів малої механізації. Також вирішено технологічні завдання забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик, одержання високої ранньої ($R_{bt}^7=4,9$ МПа) та проектної міцності на розтяг при згині (клас бетону В_{bt} 5,6).

Застосування високоміцних бетонів з підвищеною довговічністю забезпечило прискорений набір ранньої міцності, що дозволило знизити товщину плити покриття та пришвидшити відкриття руху по ній. Використання пористого цеолітового компоненту, що здійснює функцію внутрішнього догляду, створило можливість скоротити тривалість догляду за покриттям в сухих умовах та уникнути самообезводнення бетону.

Акт підписали:

Представник ТзОВ «ДБЗ»

Завідувач виробництва


Горячка В.В.

Представники Національного університету "Львівська політехніка"

Професор, д.т.н.


Соболь Х.С.

Інженер


Гуняк О.М.