

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Марків Тарас Євгенович

УДК 691.32; 691.328

ДИСЕРТАЦІЯ
НАУКОВІ ЗАСАДИ ОТРИМАННЯ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ
ТРИЩИНОСТІЙКІСТЮ ЗА РАХУНОК КЕРУВАННЯ
СТРУКТУРОУТВОРЕННЯМ НА РІЗНИХ РІВНЯХ

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

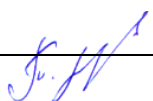
Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Учений секретар спеціалізованої

вченої ради _____  Холод П.Ф.

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

_____  **Марків Т.Є.**

Науковий консультант Бліхарський Зіновій Ярославович,
доктор технічних наук, професор

Львів – 2024

АНОТАЦІЯ

Марків Т.Є. Наукові засади отримання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.05 Будівельні матеріали та вироби. - Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розробленню теоретичних основ одержання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю. Розроблено алгоритм багатопараметричного проектування бетонів класів за міцністю на стиск С25/30-С50/60, який передбачає раціональний підбір та оптимізацію технологічних факторів на різних структурних рівнях, що забезпечує підвищення тріщиностійкості. Розроблено системний підхід до вибору мінеральних добавок і показано, що досліджені пуцоланові матеріали на основі природних і штучних цеолітів мають суттєвий потенціал для покращення властивостей бетонних сумішей та бетонів. Встановлено, що за здатністю поглинати СаО з його насиченого розчину використані мінеральні добавки можна розмістити в такому порядку за зростанням: гранульований доменний шлак → зола-винесення → природні пуцолани → штучні пуцолани. Запропоновано розділити ефекти дії таких матеріалів на основні і додаткові, які необхідно враховувати при проектуванні бетонів. Дослідженнями показано, що вивчення кінетики процесів гідратації і тверднення цементних систем з досліджуваними пуцолановими матеріалами, а також генезису їх мікроструктури має велике значення, тому що відкриває шлях до наукового прогнозування їх властивостей. Розкрито фізико-хімічні закономірності та можливості направленої формування фазового складу цементної матриці бетону з пуцолановими матеріалами, створюючи умови для утворення додаткової кількості рівномірно розподілених модифікованих дрібнодисперсних продуктів гідратації, в тому числі голчасто-волокнистих гідросилікатів кальцію, які кольматують поровий простір цементного каменю. Це забезпечує ефект його самоармування на рівні мікроструктури, зменшення кількості дефектів,

підвищення опору руйнуванню та синтез міцності бетонів як на розтяг при згині, так і на стиск, а також покращені експлуатаційні властивості. Показана важлива роль фракційного складу мінеральних добавок пуцоланової природи активності у покращенні гранулометрії тверднучих систем на мезоструктурному рівні. Встановлено, що використання полідисперсного цеолітового туфу фракції 0,4-800 мкм створює умови для неперервності гранулометричного складу і компенсує нестачу частинок розміром 60-160 мкм (вміст в цеолітовому туфі становить близько 50%) в звичайному бетоні, які знаходяться в системі “портландцемент-цеолітовий туф-дрібний заповнювач”. Це забезпечує впорядкування порового простору на рівні мезоструктури бетону та щільнішу упаковку зерен. Підтверджено ефективність використання полідисперсного цеолітового туфу, який є джерелом легкодоступної додаткової води для поглибленої гідратації портландцементу, та можливості одержання бетонів з підвищеною міцністю в повітряно-сухих ($t=40\pm 3^\circ\text{C}$, $\varphi=40\pm 3\%$) умовах тверднення. Полідисперсний цеолітовий туф, маючи внутрішні резервуари води, забезпечує рівномірний перебіг реакцій гідратації і розвиток міцності цементобетону в таких умовах, що підтверджено дещо вищою міцністю на стиск при заміні портландцементу на 10 мас.% цієї мінеральної добавки. Створення умов для поглибленої гідратації при введенні цеолітового туфу дає змогу попередити раннє тріщиноутворення бетону в повітряно-сухих умовах. Встановлено, що при введенні повітровтягувальних добавок зростає пластичність розчинової частини бетонної суміші за рахунок “ball-bearing” ефекту, а їх використання разом з додатковим цементуючими матеріалами з подібним ефектом (зола-винесення) може призвести до синергічного ефекту їх взаємодії.

Встановлено механізм підвищення тріщиностійкості бетону з повітровтягувальними добавками, який ґрунтується на формуванні в структурі бетону рівномірно розподілених повітряних пор з оболонкою, сформованою з продуктів гідратації портландцементу, зокрема волокнистих гідросилікатів кальцію, які можна розглядати як компенсатори напружень, що здатні гальмувати поширення тріщин, поглинаючи пружну енергію. Коли навантаження прикладається до такого бетону з повітровтягувальною добавкою та цеолітовим

туфом мікроармовані повітряні бульбашки призводять до дисипації енергії мікротріщиноутворення під навантаженням. Це супроводжується підвищенням характеристик тріщиностійкості та експлуатаційних властивостей бетонів.

Показано, що використання полідисперсного цеолітового туфу як пуцоланового матеріалу, незважаючи на його пористу структуру, у поєднанні з хімічними добавками пластифікуючої та повітровтягувальної дії робить їх ефективними компонентами бетонних сумішей різної консистенції. У бетонах (марка за осадкою конуса бетонної суміші S4, В/Ц=0,5) спостерігається деяке зниження міцності протягом 90 діб тверднення, але через 180 діб міцність на стиск бетонів, що містять полідисперсний цеолітовий туф, навіть перевищує на 2% міцність бетону без цеолітового туфу. Підвищується також морозостійкість (для F150 $\Delta f_{cm} = 17,9\%$) порівняно з бетоном без полідисперсного цеолітового туфу та повітровтягувальної добавки (для F150 $\Delta f_{cm} = 37,9\%$) та, як наслідок, довговічність, зменшуються усадка при висиханні та глибина проникнення води майже на 34%. Встановлено, що корозійна стійкість бетонів з 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу підвищується як в агресивному середовищі $MgCl_2$ ($C(Mg^{2+})=10$ г/л), так і в Na_2SO_4 ($C(SO_4^{2-})=10$ г/л).

Запропоновано до використання параметр питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_1 . Цей параметр, разом із стандартизованим показником питомих енерговитрат на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i), більш точно і в повній мірі характеризує поведінку бетону під навантаженням в докритичній і закритичній областях деформування і визначає ефективність армування. Рекомендовано при одержанні бетонів з підвищеною тріщиностійкістю керуватися значенням критерію крихкості χ^c_F , який перевищує 140 мм.

Аналіз порової структури бетону (марка за осадкою конуса бетонної суміші S1) з полідисперсним цеолітовим туфом та пластифікуюче-повітровтягувальними добавками з використанням комп'ютерної мікротомографії свідчить, що при об'ємі втягнутого повітря 6,5% такі бульбашки повітря виступають демпферами напружень, а разом із модифікуванням мікро- та мезоструктури бетону призводять

до зменшення мікротріщиноутворення на докритичній ($G_i=247,44$ Дж/м²) та сповільнення поширенню магістральних тріщин в закритичній ($G_l=492,28$ Дж/м²) стадіях. Такі бетони також характеризуються покращеними міцнісними та експлуатаційними властивостями: міцністю через 28 діб тверднення на стиск ($f_{cm}=65,8$ МПа) і розтяг при згині ($f_{ctb}=9,3$ МПа), низьким водопоглинанням ($W_m=2,1$ %), підвищеною морозо- (для F200 $\Delta f_{cm}=5,3$ %) та корозійною стійкістю ($KC_{зг}=1,23$).

Проведено оцінку впливу дисперсного армування бетону різними видами фібри на міцнісні властивості та характеристики тріщиностійкості бетонів. Досліджено, що поєднання поліпропіленових волокон типу ФПДП (з деформованою поверхнею) та ФПП (прямі довжиною 12 мм) є найбільш ефективними і дозволяє підвищити майже на 75 та 50% міцність на розтяг при згині та статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень відповідно. Аналіз бетону на рівні мезо- та макроструктури показує, що ці показники досягаються внаслідок “Bridge” ефекту, який створюється при армуванні бетону фібровим волокном. При цьому спостерігається сповільнення розвитку макротріщин в докритичній стадії деформування та зростає опір дефрагментації зразків в закритичній стадії руйнування таких бетонів. Відбувається стабілізація деформацій усадки через 22 доби тверднення та подальше їх зменшення на 26% порівняно з неармованим бетоном.

Обґрунтовано наукові засади розроблення принципово нової концепції створення бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, яка ґрунтується на можливостях регулювання параметрів тріщиностійкості за рахунок зміни параметрів проектування та різних технологічних факторів, а саме – пуцоланових матеріалів цеолітового типу, пластифікуюче-повітровтягувальних добавок оптимального складу, волокон різних типів та розмірів, що забезпечить отримання щільної неперервно армованої на всіх рівнях структури бетону, який характеризується покращеними експлуатаційними властивостями.

Встановлено, що бетон, який містить 10 мас.% цеолітового туфу, різні типи волокон (1,05 кг/м³ ФПП, 8 кг/м³ ФПДП), пластифікуючу (1,5 мас.%) і повітровтягувальну (0,4 мас.%) добавки, незважаючи на менший вміст

портландцементу, характеризується подібною поведінкою під навантаженням на стадії після утворення тріщин, як і бетон, в складі якого є тільки фібра. Такий мультикомпонентний бетон характеризується покращеними міцнісними властивостями та параметрами тріщиностійкості зі збільшенням енергії руйнування на 35,1% і критерія крихкості на 61,5% порівняно з еталонним звичайним бетоном. Водопоглинання модифікованого фібробетону становить 1,5 мас.%, стираність 0,2 г/см², марка за водонепроникністю та морозостійкістю W16 та F300 відповідно.

Здійснено промислове впровадження розроблених бетонів на ТзОВ «Угринів Еко Ферм» при бетонуванні ванни тваринницького комплексу із забезпеченням класу міцності C25/30, підвищеної корозійної стійкості та тріщиностійкості. Також результати роботи застосовані на ПП «Застава» та ПП «Захід-Бетон-Буд» при будівництві площадки для складування бетонних виробів та під'їзної дороги до складських приміщень у с. Малехів Львівської ОТГ відповідно із забезпеченням підвищеної міцності та тріщиностійкості бетонів, а також представництвом «Дрог-Буд» Сп. з о.о. та ТОВ «Автомагістраль-Південь» при будівництві мостових переходів. Ефективність впровадження результатів досліджень підтверджена довідками і актами про їх використання. Розраховано техніко-економічну ефективність використання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, одержаних за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях.

Отримані в дисертаційній роботі теоретичні і практичні результати використані в навчальному процесі при викладанні дисциплін для студентів першого (бакалаврського), другого (магістерського), а також третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Ключові слова: бетони з підвищеною тріщиностійкістю, пуцоланові матеріали, цеолітовий туф, пластифікуючі та повітровтягувальні добавки, фібра, структуроутворення, технологічні фактори, структурні рівні, довговічність.

ABSTRACT

Markiv T.Ye. Scientific principles of obtaining concretes with increased crack resistance due to control of structure formation at different levels. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

The thesis for Doctor of Technical Sciences degree. Specialty 05.23.05 Building materials and products. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2024.

The thesis is devoted to the development of scientific principles for obtaining concretes with increased strength and crack resistance. An algorithm for multi-parameter design of concretes of C25/30-C50/60 compressive strength classes has been developed, which foresee the rational selection and optimization of technological factors at different structural levels, which ensures increased crack resistance. A systematic approach to the selection of pozzolanic materials was developed and it was shown that the investigated pozzolanic materials based on natural and artificial zeolites have a significant potential for improving the properties of concrete mixtures and concretes. It was established that the used mineral additives can be placed in the following ascending order according to their ability to absorb CaO from its saturated solution: granulated blast furnace slag → fly ash → natural pozzolans → artificial pozzolans. It is proposed to divide the effects of such materials into main and additional ones, which must be taken into account when designing concrete. Researches have shown that the study of the kinetics of the hydration and hardening of cement systems with pozzolanic materials, as well as the genesis of their microstructure, is of great importance, because it opens the way to scientific prediction of their properties. The physico-chemical regularities and possibilities of the directed formation of the phase composition of the cement matrix of concrete with pozzolanic materials are revealed, creating conditions for the formation of an additional amount of evenly distributed modified finely dispersed hydration products, including needle-fibrous calcium hydrosilicates that colmatize the pore space of cement paste. This provides the effect of its self-reinforcement at microstructural level, the reduction of the number of defects, the increase of resistance to destruction and the synthesis of the tensile strength of concrete both in bending and compression, as well as improved operational properties of concrete. The important role of the fractional composition of materials of the

pozzolanic nature of activity in improving the granulometry of hardening systems at the mesostructural level is shown. It was established that the use of polydisperse zeolitic tuff fraction 0.4-800 μm creates conditions for the continuity of the granulometric composition and compensates for the usually lack of fractions 60-160 μm (the content in zeolitic tuff is about 50%) in ordinary concretes, which are in the system of "Portland cement-zeolitic tuff-fine aggregate", which ensures the arrangement of the pore space at the level of the mesostructure of concrete and denser packing of grains. The effectiveness of the use of polydisperse zeolitic tuff, which is a source of readily available additional water, to ensure deep hydration of Portland cement and the possibility of obtaining concrete with increased strength in air-dry ($t=40\pm 3^\circ\text{C}$, $\phi=40\pm 3\%$) hardening conditions has been confirmed. Polydisperse zeolitic tuff, having internal water reservoirs, ensures the uniform flow of hydration reactions and the development of the strength of cement concrete in such conditions, which is confirmed by a slightly higher compressive strength when Portland cement is replaced by 10 wt.% of this mineral additive. Creating conditions for deep hydration when introducing zeolitic tuff makes it possible to prevent early crack formation in air-dry conditions. It has been established that the addition of air-entraining admixture increases the plasticity of the mortar part of the concrete mixture due to the "ball-bearing" effect, and their possible simultaneous use with pozzolanic materials with a similar effect (fly ash) can lead to a synergistic effect of their interaction.

A mechanism for increasing the crack resistance of concrete with air-entraining admixtures has been established, which is based on the formation of evenly distributed in the concrete structure air pores with a shell formed from Portland cement hydration products, in particular, fibrous calcium hydrosilicates, which can be considered as stress compensators capable of inhibiting the propagation of cracks by absorbing elastic energy. When a load is applied to such concrete with air-entraining admixture and zeolitic tuff, the micro-reinforced air bubbles lead to the dissipation of microcracking energy under the load. This is accompanied by an increase in the characteristics of crack resistance and operational properties of concrete.

It is shown that the use of polydisperse zeolitic tuff as a pozzolanic material, despite its porous structure, in combination with chemical admixtures of plasticizing and air-

entraining action makes them effective components of concrete mixtures of various consistencies. In concretes (slump class S4, W/C=0.5), some reduction in strength is observed during 90 days of hardening, but after 180 days, the compressive strength of concrete containing polydisperse zeolitic tuff even exceeds by 2% the strength of concrete without zeolitic tuff. Frost resistance also increases (for F150 $\Delta f_{cm} = 17.9\%$) compared to concrete without polydisperse zeolitic tuff and air-entraining admixture (for F150 $\Delta f_{cm} = 37.9\%$) and, as a result, its durability, as well as shrinkage during drying and the depth of water penetration decreases by almost 34%. It was established that the corrosion resistance of concrete with 10 wt.% of polydisperse zeolitic tuff increases both in the aggressive environment of $MgCl_2$ ($C(Mg^{2+})=10$ g/l) and in Na_2SO_4 ($C(SO_4^{2-})=10$ g/l).

The specific energy consumption parameter for local static deformation in the main crack zone G_1 is proposed for use. This parameter, together with the standardized indicator of specific energy consumption for static deformation until the moment of the movement of the main crack (G_1), more accurately and fully characterizes the behavior of concrete under load in the precritical and post-critical stages of deformation and determines the effectiveness of reinforcement. It is recommended that the brittleness criterion of concrete χ_F^c exceeds 140 mm to attribute it to the concrete with increased crack resistance.

Analysis of the pore structure of concrete (slump class S1) with a polydisperse zeolitic tuff, plasticizer and air entraining admixtures using computer microtomography shows that with an entrained air volume of 6.5%, such air bubbles act as stress dampers, and together with the modification of the micro- and mesostructure of concrete lead to a decrease in the formation of microcracks in the precritical ($G_1=247.44$ J/m²) and a slowdown in the propagation of main cracks in the post-critical ($G_1=492.28$ J/m²) stages. Such concretes are also characterized by improved strength and operational properties: compressive ($f_{cm}=65.8$ MPa) and flexural ($f_{stb}=9.3$ MPa) strength after 28 days of hardening, low water absorption ($W_m=2.1\%$), increased frost (for F200 $\Delta f_{cm}=5.3\%$) and corrosion resistance ($CR_{stb}=1.23$).

The influence of dispersed concrete reinforcement with different types of fibers on the strength properties and crack resistance characteristics of concrete was evaluated. It has been studied that the combination of polypropylene fibers of FPDP type (with

deformed shape) and FPP (straight with length of 12 mm) are the most effective and allow to increase flexural strength and static critical stress intensity factor by almost 75 and 50%, respectively. Analysis of concrete at the meso- and macrostructural levels shows that these indicators are achieved due to the "Bridge" effect, which is formed when concrete is reinforced with fibers. At the same time, there is a slowdown in the development of macrocracks in the precritical stage of deformation, and the resistance to defragmentation of samples in the post-critical stage of destruction of such concretes increases. Shrinkage deformations stabilize after 22 days of hardening and their subsequent reduction by 26% compared to unreinforced concrete is observed.

The scientific bases of the development of a fundamentally new concept of creating concrete with increased strength and crack resistance are substantiated, which is based on the possibility of crack resistance parameters regulation due to changes in design parameters and various technological factors, namely the use of pozzolanic materials of the zeolite type, plasticizing and air-entraining admixtures of optimal composition, fibers of various types and sizes, which will ensure obtaining a dense, continuously reinforced concrete structure at all levels, which is characterized by improved operational properties.

It was established that concrete containing 10 wt.% of zeolitic tuff, different types of fibers (1.05 kg/m³ FPP, 8 kg/m³ FPDP), plasticizer (1.5 wt.%) and air-entraining admixtures (0.4 wt. %), despite the lower content of Portland cement, is characterized by a similar behaviour under load at the stage after the formation of cracks, as concrete, which contains only fiber. Such multi-component concrete is characterized by improved strength properties and crack resistance parameters with an increase in fracture energy by 35.1% and brittleness criterion by 61.5% compared to reference ordinary concrete. The water absorption of modified fiber concrete is 1.5 wt.%, abrasion resistance is 0.2 g/cm², classes of waterproofness and frost resistance are W16 and F300, respectively.

The industrial implementation of the developed concretes at Ugryniv Eco Farm Ltd was carried out in the concreting of animal husbandry complex baths with concrete of C25/30 strength class, increased corrosion and crack resistance. Also, the results of the work were implemented at the construction sites of PC «Zastava» and PC «Zahid-Beton-Bud» for the storage of concrete products and the access road to the warehouses in the

village of Malekhiv of the Lviv OTG in accordance with the provision of increased strength and crack resistance of concrete, as well as the representative office of «Drog-Bud» Sp. with o.o. and «Automagistral-Pivden» Ltd during the construction of bridge crossings. The effectiveness of the implementation of research results is confirmed by certificates and acts on their use. The technical and economic efficiency of using concrete with increased crack resistance, obtained as a result of structure formation regulation at different levels, is calculated.

The theoretical and practical results obtained in the dissertation were used in the educational process when teaching disciplines for students of the first (bachelor), second (master's), and third (educational and scientific) level of higher education in the specialty 192 Construction and civil engineering.

Keywords: concretes with increased crack resistance, pozzolanic materials, zeolitic tuff, plasticizing and air-entraining admixtures, fibers, structure formation, technological factors, structural levels, durability.

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Будівельні розчини з мікроармувальними добавками / Т. Є. Марків, Х. С. Соболев, Т. П. Кропивницька, П. В. Новосад. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2007. № 602. С. 139–143 (*Вивчено вплив мікроармувальних добавок на формування мезоструктури бетону*).
2. Концепція одержання низькоенерговмісних цементів / Т.Є. Марків, У.Д. Марущак, М.А. Саницький, Х.С. Соболев, Ю.Л. Новицький. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2009. № 655. С. 170-178 (*Інтерпретація одержаних результатів щодо впливу гранульованого доменного шлаку, золи-винесення та комплексних модифікаторів на властивості цементів та бетонів*).

3. Модифіковані малоенергоємні цементи для будівельних розчинів і бетонів / Т. Є. Марків, Т. П. Кропивницька, М. В. Штурмай, Б. В. Федунь. Будівельні конструкції, міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. п-во «Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій». Київ. НДІБК, 2009. Вип. 72. Сучасні технології бетону: зб. наук. пр. С. 216–222 (*Показано роль модифікування в забезпеченні необхідних проектних властивостей бетонів*).

4. Модифіковані бетони з поліпшеними експлуатаційними властивостями / Т. Є. Марків, П. В. Новосад, О. П. Новосад, І. В. Саїв. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2010. № 664. С. 93–97 (*Постановка завдання, аналіз результатів*).

5. Саницький М., Кропивницька Т., Марків Т. Мікроструктура та міцність будівельних розчинів з комплексними модифікаторами. Будівельні матеріали та вироби. 2010. № 1 (60). С. 6–9 (*Досліджено міцність будівельних розчинів з комплексними модифікаторами*).

6. Саницький М. А., Марків Т. Є., Круць Т. М. Волокнистоцементні вироби на основі портландцементу, одержаного з використанням вторинних паливних матеріалів. Будівельні матеріали та вироби. 2011. № 4 (69). С. 2–7 (*Показана роль волокнистих матеріалів у забезпеченні проектних показників виробів*).

7. Модифіковані бетони на основі портландцементу композиційного ПЦ Ш/Б-К (Ш-3)-400 / Т. Є. Марків, У. Д. Марущак, С. В. Міхін, О. О. Серкіз. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2013. Вип. 26. С. 286–291 (*Досліджено властивості модифікованих бетонів на основі композиційних портландцементів з добавкою золи-винесення*).

8. 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 (*Інтерпретація одержаних результатів щодо властивостей бетонів з добавкою цеолітового туфу*).

9. Гуняк О.М., Соболев Х.С., Марків Т.Є. Оптимізація складів спеціальних цеолітовмісних портландцементів. Містобудування та територіальне

планування. 2014. Вип. 54. С. 139–143 (*Оптимізація вмісту цеолітового туфу в цементуючій системі на рівні мікроструктури бетону*).

10. Солодкий С.Й., Марків Т.Є., Холод Т.П. Способи регулювання тріщиностійкості високоміцних бетонів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, зб. наук. пр. Рівне [б. в.], 2015. Вип. 31. С. 357–362 (*Інтерпретація одержаних результатів щодо тріщиностійкості високоміцних бетонів*).

11. Дослідження будівельних розчинів з добавкою цеолітів / Т. Є. Марків, Х. С. Соболю, З. Я. Бліхарський, О. М. Гуняк. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. 2015. № 823. С. 222–228 (*Вивчено властивості розчинової частини бетонів з добавкою цеолітового туфу*).

12. Солодкий С.Й., Гуняк О.М., Марків Т.Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, наук.-техн. зб. Київ, 2016. Вип. 98. С. 247–255 (*Показана роль модифікування у забезпеченні тріщиностійкості бетонів*).

13. Активність полідисперсних мінеральних компонентів та їх роль у формуванні структури та міцності цементів / Х. С. Соболю, Т. Є. Марків, Н. І. Петровська, О. М. Гуняк. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 175–182 (*Досліджено властивості цементів з полідисперсними мінеральними компонентами*).

14. Markiv T. Properties of fresh and hardened mortars with air-entraining agent. Theory and Building Practice. 2022. Volume 4(2). P. 105-110.

Патенти:

15. Пат. 154932 Україна. Спосіб одержання зв'язуючого / З. Я. Бліхарський, Х. С. Соболю, Т. Є. Марків, О. М. Гуняк. u 202302590; опубл. 03.01.2024, Бюл. № 1. 4 с. (*Патентний пошук, розроблення складів*).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз:

16. Peculiarities of hydration processes of cements containing natural zeolite / Kh. Sobol, T. Markiv, V. Terlyha, W. Franus. Budownictwo i Architektura. 2015. T. 14.

№ 1. P. 105–113 (**Index Copernicus**) (*Визначено активну структуроутворювальну роль цеолітового туфу при гідратації цементу*).

17. Effect of Natural Zeolite and Air-Entraining Agent on the Properties of High Strength Concretes / Z. Blikharskyu, S. Solodkyu, O. Pozniak, T. Markiv. Regional Barometer. Analyses & Prognoses. 13(2). 2015. P. 137-138 (**Index Copernicus**) (*Досліджено вплив цеолітового туфу на властивості високоміцних бетонів*).

18. Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite / T. Markiv, K. Sobol, M. Franus, W. Franus. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016. Vol. 16(4). P. 554–562 (**SCOPUS, Q1**) (*Планування досліджень, аналіз результатів та формулювання висновків*).

19. Fracture properties of high-strength concrete obtained by direct modification of structure / S. Solodkyu, T. Markiv, K. Sobol, O. Hunyak [Електронний ресурс]. MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 116 (**SCOPUS**) (*Узагальнення отриманих результатів тріщиностійкості високоміцних бетонів та встановлення ефективності модифікування структури*).

20. The effect of natural pozzolans on properties of vibropressed interlocking concrete blocks in different curing conditions / O. Hunyak, K. Sobol, T. Markiv, V. Bidos. Production Engineering Archives. 2019. Vol. 22. P. 3–6 (**SCOPUS, Q2**) (*Постановка експерименту з дослідження впливу природних пуцоланових матеріалів на властивості вібропресованих виробів*).

21. Turba Y., Solodkyu S., Markiv T. Strength and fracture toughness of cement concrete, dispersedly reinforced by combination of polypropylene fibers of two types. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 47. P. 488–494 (**SCOPUS, Q4**) (*Показано ефективність і доцільність поєднання поліпропіленової фібри різних типів*).

22. Effect of plasticizing and retarding admixtures on the properties of high strength concrete / T. Markiv, S. Solodkyu, K. Sobol, D. Rachidi. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 100. P. 286–293 (**SCOPUS, Q4**) (*Виявлено вплив модифікаторів різних типів на властивості високоміцних бетонів*).

23. Properties of concretes incorporating recycling waste and corrosion

susceptibility of reinforcing steel bars / Z. Blikharskyu, K. Sobol, T. Markiv, J. Selejdak. *Materials*. 2021. Vol. 14(10). 2638 (**SCOPUS, Q2**) (*Досліджено властивості бетону та корозійну стійкість арматури в бетоні з добавками побічних продуктів промисловості*).

24. Tomporowski D., Markiv T. Analysis of environmental consequences occurring in the life cycle of a retail facility. *Budownictwo i Architektura*. 2022. T. 21 (4). P. 5–12 (**Index Copernicus**) (*Проведено аналіз результатів*).

25. Markiv T., Blikharskyu Z. Effect of Calcium Nitrate-Based Admixture on the Strength of Concrete and Corrosion Susceptibility of Reinforcing Steel Bars. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Vol. 290. P. 253–261 (**SCOPUS, Q4**) (*Встановлено вплив комплексного модифікатора на міцність бетону*).

26. The effect of air-entraining agent on the properties of mortars / Z. Blikharskyu, T. Markiv, Kh. Sobol, Y. Turba, J. Selejdak. *Archives of civil engineering*. 2023. Vol. 69. № 3. P. 147-156 (**SCOPUS, Q3**) (*Досліджено вплив повітровтягувальних добавок на властивості розчинів*).

27. Mechanical and Fracture Properties of Air-Entrained FRC Containing Zeolitic Tuff / Z. Blikharskyu, T. Markiv, Y. Turba, O. Hunyak, Y. Blikharskyu, J. Selejdak. *Applied Sciences*. 2023. 13(16). 9164. (**SCOPUS, Q1**) (*Встановлено вплив органо-мінеральних добавок на властивості дисперсноармованих бетонів*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

28. Модифіковані будівельні розчини з мікроармуючими і хімічними добавками / Т. Є. Марків, Х. С. Соболю, Т. П. Кропивницька, В. А. Пристай, Р. А. Солтисік. I науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2007. С. 13-15. (Визначено ефективність використання мікроармуючих і хімічних добавок на мезоструктурному рівні бетонів).

29. Марків Т.Є., Кропивницька Т.П. Модифіковані будівельні розчини нової генерації. II науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2008. С. 43. (*Досліджено вплив повітровтягувальної добавки на властивості розчинової частини бетону*).

30. Саницький М. А., Соболев Х. С., Марків Т. Є. Модифіковані композиційні цементи. Навч. посіб. Львів. Вид-во Львів. політехніки, 2010. 132 с. *(Показано особливості підбору речовинного складу цементів загальнобудівельного призначення).*

31. Саницький М.А., Марків Т.Є., Русин Б.Г. Вплив лужних компонентів на компатибельність портландцементів з хімічними та мінеральними добавками. XII Міжнародна науково-практична конференція «Дні сучасного бетону». Будіндустрія ЛТД. Запоріжжя, 2012. С. 51-57 *(Досліджено вплив мінеральних добавок на властивості портландцементів).*

32. The effect of zeolitic tuff on structure formation and properties of cements / T. Markiv, W. Franus, Kh. Sobol, Z. Blikharskyu. IBAUSIL. 19 Internationale Baustofftagung. Weimar (Germany), 2015. Band 2. P. 415-422 *(Показано активну структуроутворюючу роль цеолітового туфу в забезпеченні властивостей цементу).*

33. Вплив органо-мінеральних добавок на властивості високоміцних бетонів / С. Й. Солодкий, Т. Є. Марків, О. М. Гуняк, Б. А. Гостинецький. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Харків. ХНУСА, 2015. С. 29-34 *(Проведено аналіз результатів, сформульовані висновки).*

34. Марків Т. Є., Соболев Х. С., Гуняк О. М. Цеолітовмісні цементи для бетонів транспортного призначення. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2016. С. 97-99 *(Планування експериментальних досліджень, аналіз результатів).*

35. 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, 2(12). 2017. P. 95-100. *(Постановка завдань досліджень, аналіз результатів, формулювання висновків).*

36. Markiv T., Turba Yu., Solodkyu S. The influence of polypropylene fibres on fracture parameters of concrete. IBAUSIL. 20 Internationale Baustofftagung. Weimar (Germany), 2018. Band 2. P. 923-929 *(Обґрунтовано використання поліпропіленової*

фібри для покращення параметрів тріщиностійкості бетонів).

37. The effect of zeolitic tuff on the properties of concretes / T. Markiv, Kh. Sobol, O. Hunyak, M. Franus, W. Franus. The 10th International conference „The occurrence, properties and utilization of natural zeolites”. Cracow, 2018. P. 153-154
(Проведено аналіз результатів, сформульовані висновки).

38. Турба Ю.В., Марків Т.Є., Солодкий С.Й. Вплив дисперсного армування поліпропіленовими фібрами на тріщиностійкість дорожніх бетонів. Матеріали міжнародного семінару “Моделювання і оптимізація будівельних композитів”. Одеса, 2018. С. 119-121. *(Досліджено вплив дисперсного армування поліпропіленовими фібрами на тріщиностійкість дорожніх бетонів).*

39. The durability properties of concrete incorporating zeolitic tuff / Z. Blikharskyu, Kh. Sobol, T. Markiv, O. Pozniak, W. Franus. Proceedings of the 9th Croatian-Slovenian-Serbian Symposium on Zeolites. Split (Croatia), 2021. P. 27-30
(Визначено ефективність використання цеолітового туфу для підвищення довговічності бетону).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМАТИКА ОДЕРЖАННЯ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ.....	31
1.1. Фактори тріщиностійкості бетонів.....	31
1.2. Роль структури в бетоні з підвищеною тріщиностійкістю.....	36
1.3. Мінеральні добавки в бетонах з покращеними властивостями	41
1.4. Вплив поверхнево-активних речовин на властивості та довговічність бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.....	52
1.5. Дисперсне армування бетонів різними видами волокон....	56
1.6. Постановка проблеми, обґрунтування напрямків досліджень та наукова гіпотеза.....	65
РОЗДІЛ 2. СХЕМА, ФАКТОРИ ТА МЕТОДОЛОГІЧНА БАЗА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	68
2.1. Розроблення структурно-логічної схеми досліджень.....	68
2.2. Аргументування раціонального підходу до вибору вихідних матеріалів та їх властивості.....	71
2.3. Обґрунтування вибору методології та процедура проведення досліджень.....	107
Висновки до розділу.....	112

РОЗДІЛ 3. РОЛЬ МІКРОСТРУКТУРИ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ПІДВИЩЕНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ БЕТОНІВ.....	115
3.1. Пуцоланові матеріали різного походження та їх вплив на властивості бетонів	115
3.2. Вплив пуцоланових матеріалів на властивості в'язучих систем та бетонів.....	140
3.3. Бетони з підвищеною міцністю, модифіковані органо-мінеральними добавками.....	150
3.4. Фазовий склад та мікроструктура модифікованої цементної матриці бетону з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю.....	157
Висновки до розділу.....	166
РОЗДІЛ 4. РОЛЬ МЕЗОСТРУКТУРИ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ПОКРАЩЕНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ, МОДИФІКОВАНИХ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ	169
4.1. Роль полідисперсного цеолітового туфу в мезоструктурі бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.....	169
4.2. Вплив повітровтягувальних добавок на властивості бетонів на мезоструктурному рівні.....	182
4.3. Властивості бетонів, модифікованих комплексними органо-мінеральними добавками.....	191
4.4. Бетони з підвищеною тріщиностійкістю, модифіковані комплексними органо-мінеральними добавками	207
Висновки до розділу.....	215

РОЗДІЛ 5. ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ, АРМОВАНІ ДИСПЕРСНИМИ ВОЛОКНАМИ.....	218
5.1. Вплив дисперсного армування базальтовою фіброю на силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетону.....	218
5.2. Властивості бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, армовані поліпропіленовими волокнами з деформованою поверхнею.....	227
5.3. Вплив прямих поліпропіленових волокон на параметри тріщиностійкості бетонів	235
5.4. Вплив полідисперсного армування на властивості бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.....	244
5.5. Структурування бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, армованих дисперсними волокнами різних видів.....	255
Висновки до розділу.....	258
РОЗДІЛ 6. ВЛАСТИВОСТІ, ПРАКТИКА ВИКОРИСТАННЯ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ	261
6.1. Властивості та тріщиностійкість бетонів, одержаних керуванням структуруванням на різних рівнях.....	261
6.2. Мікроструктура бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.	268
6.3. Промислово-дослідне впровадження та апробація бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.....	277
6.4. Техніко-економічні показники бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, одержані керуванням	

	21
структурутворенням на різних рівнях	287
6.5. Перспективи використання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.....	291
Висновки до розділу.....	293
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	297
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	301
ДОДАТКИ.....	339

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВН –водонасичений;

ВПМ - висушений до постійної маси;

В/Ц – водоцементне відношення;

ГДШ – гранульований доменний шлак;

ЗВ – зола-винесення.

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

K_i – статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, $\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$;

КОГ – крива оптимальної гранулометрії;

$K_{па}$ – коефіцієнт пуцоланічної активності;

K_c – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, $\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$;

ПДС – повна діаграма стану;

ПП – полідисперсний перліт;

ПТ – перліт тонкодисперсний;

ПЦТ – полідисперсний цеолітовий туф;

РПП – ртутна інтрузійна порозиметрія;

РЧР – розподіл частинок за розмірами;

ТЦТ – тонкодисперсний цеолітовий туф;

ФБ - фібра базальтова;

ФМ - фібра металева;

ФПДП – фібра поліпропіленова з деформованою поверхнею;

ФПП - фібра поліпропіленова пряма;

ЦТ – цеолітовий туф;

$f_{cm.cube}$ – міцність при стиску, МПа;

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

G_i – питомі енерговитрати на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини, $\text{Дж}/\text{м}^2$;

G_l – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини, $\text{Дж}/\text{м}^2$;

G_F – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування, Дж/м²;

LWA – пористий заповнювач;

SEM – скануюча електронна мікроскопія;

x_F^c – критерій крихкості, м;

XRD – рентгенівська дифрактометрія.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний досвід будівництва та експлуатації будівель і споруд свідчить, що в цементному бетоні в процесі укладання і тверднення можуть з'являтися дефекти, які зумовлюють недобір проектної міцності, однією з причин якого є тріщиноутворення, внаслідок силових і несилових впливів, що можуть призвести навіть до повного його руйнування. Бетони з підвищеною міцністю, які використовуються в сучасних будівлях і спорудах проектується з покращеними показниками довговічності. Оскільки бетони класів С25/30 і вище мають більш крихкий характер руйнування, ніж звичайний бетон, тому для оцінки та прогнозування поведінки бетону під навантаженням використані силові та енергетичні параметри тріщиностійкості.

Узагальнення результатів наукових досліджень у технології бетонів свідчать, що принципово новим підходом підвищення їх довговічності і надійності є впровадження концепції регулювання тріщиностійкості, що ґрунтується на використанні прийомів направленої формування мікро-, мезо- та макроструктури бетону за рахунок раціонального підбору пуцоланових матеріалів, що характеризуються основним та додатковим позитивними ефектами і забезпечують самоармування бетону на рівні мікроструктури, застосування повітровтягувальних добавок, які покращують властивості на мезоструктурному рівні, та полідисперсного армування фіброю різних видів на макрорівні, що в комплексі дозволяє регулювати та збільшити показники тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю. Застосування запропонованої концепції актуалізує експериментальні дослідження в цьому напрямку та відкриває шлях до розроблення наукових і технологічних засад створення бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю з необхідними показниками якості, що в результаті призводить до економії сировинних та енергетичних ресурсів, надійності будівельних конструкцій під навантаженням та в різних умовах експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації є складовою частиною науково-дослідних робіт кафедр будівельного

виробництва і автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка» і виконувалась в межах кафедральних тематик «Розроблення сучасних технологій енергоефективного будівництва, бетонів та розчинів поліфункціонального призначення, ефективних теплоізоляційних, оздоблювальних, гідроізоляційних матеріалів» (номер держреєстрації 0118U000275) і «Розроблення ефективних технологій і матеріалів для будівництва та ремонту дорожніх одягів; діагностика конструктивних елементів автомобільних доріг та дослідження дорожніх матеріалів, виробів, конструкцій і ґрунтів» (номер держреєстрації 0119U103557), міжнародного гранту № IPBU.01.01.00-06.570/11-00 «Розроблення інноваційної моделі транскордонного використання цеолітового туфу», а також науково-дослідної роботи за міжнародним проектом NAWA «Пуцоланові матеріали, отримані з золи-винесення, як добавки нового покоління, що використовуються в технології виробництва «зеленого» бетону» (договір № М/93-2023). Автор був виконавцем та відповідальним виконавцем зазначених робіт.

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення наукових засад отримання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- обґрунтувати актуальність вирішення проблеми одержання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю за рахунок направленої формування структури на різних рівнях;
- визначити напрями модифікування бетонів з підвищеною міцністю мінеральними добавками на рівнях мікро-, мезоструктури бетону та розробити шляхи направленої керування його властивостями;
- розкрити фізико-хімічні закономірності процесів формування структури на мезорівні бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, модифікованих добавками пластифікуюче-повітровтягувальної дії;
- встановити механізм покращення тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю, внаслідок використання природних пуцолан в комплексі з

пластифікуюче-повітровтягувальними добавками;

- встановити закономірності полідисперсного армування бетонів на мезо- та макрорівнях з використанням системного підходу до вибору видів фібри;
- розробити алгоритм одержання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, який передбачає раціональний підбір і використання мінеральних, пластифікуюче-повітровтягувальних добавок та полідисперсне армування різними видами фібри з подальшою їх оптимізацією;
- розробити критерії оцінки тріщиностійкості бетонів підвищеної міцності із заданою надійністю за рахунок регулювання технологічних чинників на поліструктурних рівнях;
- дослідити фізико-механічні властивості та характеристики тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю та встановити можливість їх регулювання за рахунок зміни технологічних факторів;
- здійснити промислове впровадження бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, а також обґрунтувати техніко-економічну ефективність їх виробництва і найбільш ефективні напрямки використання.

Об’єкт дослідження - процеси направленого регулювання мікро-, мезо- та макроструктури бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, а також особливості формування їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Предмет дослідження - бетони з підвищеною тріщиностійкістю та покращеними експлуатаційними властивостями і довговічністю, отримані за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях.

Методи досліджень. Експериментальні результати отримані із використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу, а саме рентгенівської дифрактометрії, лазерної гранулометрії, комп’ютерної мікротомографії, електронної мікроскопії з мікрозондовим аналізом та ртутної порометрії. Визначення фізико-механічних, будівельно-технічних та експлуатаційних властивостей бетонів здійснювали згідно з загальноприйнятими методиками та чинними нормативно-технічними документами. Для дослідження тріщиностійкості бетонів використано методи механіки руйнування. Оптимізацію

складів розроблених бетонів виконано із використанням експериментально-статистичних методів планування експерименту.

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

- розроблено наукові основи композиційної побудови бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, які базуються на комплексному врахуванні процесів структуроутворення на мікро-, мезо- та макрорівнях при цілеспрямованому модифікуванні пуцолановими матеріалами на основі цеолітів, пластифікуючими і повітровтягувальними добавками, а також дисперсному армуванні різними видами фібри;

- подальший розвиток отримали науково-концептуальні засади керування процесами структуроутворення на мікро- та мезорівнях шляхом раціонального підбору пуцоланових матеріалів, а на макрорівні – введенням пластифікуючих і повітровтягувальних добавок та дисперсних волокон. Зміна технологічних факторів та параметрів проектування дає змогу регулювати та прогнозувати поведінку бетонів в докритичній та закритичній стадіях деформування;

- розроблено алгоритм багатопараметричного проектування бетонів з підвищеними міцністю і тріщиностійкістю. Показано, що при використанні в бетоні пуцоланових матеріалів на основі природних і штучних цеолітів, пластифікуюче-повітровтягувальних добавок і фібри різних типів спостерігається синергічне підсилення їх сумісної дії, що дає змогу покращити як силові, так і енергетичні характеристики бетону ($f_{cm.cube} = 67,3$ МПа, $f_{ctfm} = 9,0$ МПа, при $F_c = 3834$ Н: $\chi_F^c = 176$ мм; $G_F = 350,47$ Дж/м²), а також його довговічність (F_{300} , W_{16} , $K_{зг} = 1,23$);

- поглиблено наукові уявлення про використання цеолітових туфів як для запобігання самообезводненню бетонів з низькими значеннями водоцементного відношення, так і як кристалоутворюючої добавки;

- уточнено механізм дисперсного армування бетонів на різних структурних рівнях як за рахунок саморегулювання фазового складу цементного каменю внаслідок формування волокнистих гідратних новоутворень, так і в результаті введення у склад бетону дисперсної фібри різних типів, що дає можливість

отримати неперервність армування, створити «Bridge» ефект та підвищити міцність ($f_{cm.cube} = 69,5$ МПа, $f_{ctfm} = 11,9$ МПа) і покращити параметри тріщиностійкості (при $F_c = 5400$ Н: $G_1 = 660,19$ Дж/м²; $G_F = 840,44$ Дж/м²; $\chi_F^c = 209$ мм);

- розраховано і запропоновано до використання параметр питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (G_1 , Дж/м²), який разом із стандартизованим показником питомих енерговитрат на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i , Дж/м²) більш точно і в повній мірі характеризує поведінку бетону під навантаженням в докритичній і закритичній областях деформування. Встановлено, що для одержання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю значення критерія крихкості χ_F^c має перевищувати 140 мм.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблено бетони з регульованими характеристиками тріщиностійкості, підвищеними показниками міцності на розтяг при згині ($f_{ctfm} = 9-11$ МПа) та довговічності (марка за морозостійкістю не менше F200, вищі коефіцієнти корозійної стійкості, глибина проникнення води до 3,5 мм);

– за алгоритмом багатопараметричного проектування складів розроблено та впроваджено модифікований бетон класу за міцністю на стиск C25/30 та підвищеною корозійною стійкістю на ТзОВ «Угринів Еко Ферм» при бетонуванні ванни тваринницького комплексу із забезпеченням підвищеної тріщиностійкості, внаслідок оптимізації технологічних факторів на різних структурних рівнях, а саме використання пуцоланових матеріалів з необхідними основним і додатковим ефектами та хімічних добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії;

– впроваджено бетони з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю на основі БСГ В40Р4F200W10 на ПП «Застава» при будівництві площадки для складування бетонних виробів та БСГ В40Р4F200W10 на ПП «Захід-Бетон-Буд» при будівництві під'їзної дороги до складських приміщень у с. Малехів Львівської ОТГ;

– проведено дослідно-промислову апробацію розроблених бетонів з підвищеною тріщиностійкістю ($G_F = 350$ Н/м, $\chi_F^c = 176$ мм) представництвом «Дрог-Буд» Сп. з о.о. при будівництві мостового переходу в с. Корчів;

– використання сучасних підходів при проектуванні складів бетонів з підвищеною міцністю дало змогу покращити тріщиностійкість та експлуатаційні властивості бетонів, які використані для бетонування монолітних стійок опор, ростверків, підферменників, ригелів, буронабивних паль при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 ТОВ «Автомагістраль-Південь»;

– оптимізація технологічних факторів на різних структурних рівнях забезпечила одержання однорідних самоущільнювальних бетонних сумішей та бетонів з підвищеною міцністю, тріщиностійкістю, покращеними експлуатаційними властивостями та досягнення високої якості бетонних робіт в умовах знакозмінних та від’ємних температур, що створило можливість вкладання сумішей без ущільнення механічним способом при бетонуванні монолітних, складних за формою, стійок опор при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 ТОВ «Автомагістраль-Південь»;

– результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисциплін «Будівельне матеріалознавство», «Бетони та будівельні розчини, заповнювачі для бетонів, ч.1 та ч.2», «Технологічний супровід виготовлення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій» для студентів 192 Будівництво та цивільна інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти (вибірковий блок «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів») та «Технології моделювання інформації у будівельному виробництві» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти (ОПП «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів»), а також при підготовці здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота ґрунтується на матеріалах науково-дослідних робіт, виконаних автором на кафедрі будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка» у 2007–2023 рр. Автору належать постановка мети і завдань дисертації, виконання, оброблення, аналіз та

інтерпретація результатів експериментальних досліджень, узагальнення інформації, формулювання висновків. Здобувач брав участь у дослідних та дослідно-промислових випробуваннях розроблених бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, одержаних керуванням структуроутворенням на різних рівнях. Основні наукові результати дисертації одержані здобувачем особисто, окремі складові теоретичних та експериментальних досліджень виконано із співавторами наукових праць, що вказано в списку публікацій. Участь автора в спільних публікаціях відображена у списку опублікованих праць.

Дисертаційні роботи, в яких використано результати спільних робіт, представлено авторефератами:

Гуняк О. М. Високоміцні бетони транспортного призначення з підвищеною довговічністю: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Національний університет “Львівська політехніка”. Львів, 2019. 21 с.;

Турба Ю. В. Тріщиностійкість дисперсно-армованого бетону: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Національний університет “Львівська політехніка”. Львів, 2021. 21 с.

Дисертація здобувача не містить матеріалів кандидатської дисертаційної роботи.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 39 наукових праць, з них 14 статей у наукових фахових виданнях України, 12 – у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз (з них 9 у Scopus), та у періодичних виданнях інших держав, 1 патент, 1 навчальний посібник, 11 публікацій апробаційного характеру.

Структура та обсяг дисертації. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 269 сторінках друкованого тексту та складається із вступу, шести розділів та загальних висновків. Повний обсяг дисертації становить 360 сторінок; робота містить 57 таблиць, 141 рисунок, список використаних джерел із 381 найменування та 9 додатків на 21 сторінці.

РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМАТИКА ОДЕРЖАННЯ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ

1.1. Фактори тріщиностійкості бетонів

Руйнування бетону - це процес утворення та росту тріщин. На відміну від інших широко поширених будівельних матеріалів, бетон є квазікрихким матеріалом. Це означає, що він працює одночасно в двох напрямках: крихкому (як скло) і пружно-пластичному (як сталь). Доведено, що застосування лінійно-пружної механіки руйнування (Linear Elastic Fracture Mechanic (LEFM)) є хорошим механізмом для прогнозування та запобігання руйнуванню штучних конструкцій на основі портландцементу. Гріффітс заснував галузь механіки руйнування у своїх оригінальних публікаціях [228, 229]. Він встановив і розвинув енергетичні критерії руйнування матеріалів, що базуються на першому законі термодинаміки. Основний висновок його досліджень полягає в тому, що створення нових поверхонь під час руйнування призводить до того, що пружна енергія тіла перетворюється на його поверхневу енергію. Він розробив теорію, згідно з якою тріщина починає поширюватися, коли поверхнева енергія тіла збільшується пропорційно до швидкості, з якою вивільняється енергія пружної деформації.

Питання напружено-деформованого стану пружних конструкцій з тріщиною отримало реальне вирішення в наукових публікаціях [13, 109, 279]. Розглянуто проблему напружено-деформованого стану тіл з тріщинами та характер поведінки поля напружень навколо їхніх вершин з урахуванням найновіших досягнень механіки руйнування.

Теорію Гріффітса вперше застосував до бетону Невілл [293, 294], який підкреслив умовний зв'язок між теорією і бетоном, міцність якого в першу чергу

диктується кінцевою деформацією, а не напруженням. Плуґін та ін. [242] вивчали вплив структурних характеристик на міцність бетону під динамічними впливами. Зроблено припущення, що пустоти та інші структурні дефекти є першопричиною утворення тріщин у бетоні. Тому до тих пір, поки не будуть досягнуті достатньо високі навантаження, які дозволять вільний ріст тріщини, поширення тріщини постійно зупиняється.

Відомо, що при руйнуванні бетон демонструє квазікрихку поведінку, поєднуючи як крихкі, так і пружно-пластичні властивості [155, 197]. Бетон з підвищеною міцністю для інфраструктурного використання потребує нижчого водоцементного відношення ($<0,45$), щоб ефективно протидіяти агресивному впливу різних факторів, є більш крихкий, ніж звичайний бетон із $В/Ц > 0,5$. Для прогнозування та зменшення розтріскування в таких конгломератних структурах на основі портландцементу використовуються підходи, які базуються на лінійно-пружній механіці руйнування [315]. Фундаментальні властивості руйнування бетону, включаючи критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, енергію руйнування та характеристичну довжину (критерій крихкості), можна визначити за допомогою простих зразків балок триточковим згином з надрізом [53, 107].

Слід відзначити, що при зміні відносної довжини тріщини в межах $1/2 \dots 1/6$ в'язкість руйнування практично не залежить від схеми навантаження балки та відносної довжини тріщини. Зі збільшенням розміру зразка в'язкість руйнування бетону зростає. У зоні великого напруження в процесі руйнування бетону може виникнути кілька тріщин, а руйнування не обмежується поширенням однієї тріщини.

Слід відзначити, що в'язкість руйнування залежить від водоцементного відношення та вмісту дрібного і крупного заповнювачів і не залежить від відносної довжини тріщини. Ince and Alyamac [237] заявили, що за рахунок збільшення $В/Ц$ відношення в'язкість руйнування зменшується. Carpinteri and Brighenti [160] вважають, що максимальна енергія руйнування досягається при середньому $В/Ц$ відношенні. Причиною цього стало те, що тріщини часто з'являються і поширюються в цементному камені і оптимальне $В/Ц$ відношення дає можливість

отримати цементний камінь з високою міцністю. При однаковій міцності на стиск існує наступна послідовність зниження в'язкості руйнування: важкий бетон > цементно-піщаний розчин > цементний камінь. З цього можна зробити висновок, що заповнювач має вплив на кінцеву в'язкість руйнування бетону. В'язкість руйнування бетону не суттєво залежить від віку, а просочення бетону полімером призводить до збільшення цього показника. В'язкість руйнування не залежить від відносної довжини тріщини і розміру зразка. Існує концепція, що руйнування відбувається, коли найвища концентрація розтягуючих напружень навколо еліптичних тріщин наближається до міцності бетону на розтяг. Слід відзначити, що при цьому не враховується напружений стан на кінцях цих тріщин, а також стабільна фаза поширення тріщини, яка передує руйнуванню при стисненні. Виникнення розгалужених тріщин не завжди призводить до швидкого руйнування системи, а розвиток окремих тріщин суттєво не змінюється при взаємодії тріщин. При відношенні критичної довжини тріщини до розміру крупного заповнювача більше 2, в'язкість руйнування бетону залишається постійною, однак в іншому інтервалі цього відношення закономірність не зберігається. Швидкість навантаження і температура бетонного зразка впливають на значення в'язкості руйнування.

Теорія деформування і міцності бетону, яка розглядає фізичні аспекти тріщиноутворення і руйнування, була створена на основі концепції Гріффітса-Ірвіна та ієрархічної структурної схеми бетону, яка включає характерні неоднорідності і дефекти [229]. Розглянуто проблему довготривалої міцності бетону і запропоновано розв'язок, що базується на апараті теорії повзучості. Для встановлення параметрів тріщиностійкості бетону необхідно проаналізувати повністю рівноважні діаграми деформування зразків з ініціаторами тріщин. Спадаюча гілка діаграми деформування може бути використана для визначення трьох основних параметрів опору руйнуванню - сили, енергії та деформації - на стадії сталого розвитку тріщини. На стадії сталого росту тріщини, довжина не впливає на її розкриття, яке відбувається пропорційно прогину. Як наслідок, існує очевидний зв'язок між прогином зразка, довжиною та швидкістю росту тріщини [126, 182].

Створено математичний апарат для моделювання розвитку тріщин і процесів руйнування композиційних матеріалів з різною початковою конфігурацією [114]. Виявлено, що на схильність матеріалу до утворення тріщин впливає його структурна неоднорідність. Так, порівняно з важким бетоном, цементний камінь і дрібнозернистий бетон, які мають однорідну структуру, значно більше схильні до руйнування. Виявлені залежності особливостей механіки руйнування від макроструктури бетону з певними механічними властивостями [107]. Визначено, що критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (ККІН) та міцність на розрив (границя міцності при згині) мають прямий взаємозв'язок. Принципи механіки руйнування можуть бути застосовані до бетону при дослідженні залежності ККІН від його структури. Солодким [106] виявлено, що значення ККІН спадають зі збільшенням однорідності матеріалу, що підтверджується порівнянням значень ККІН для важкого бетону, дрібнозернистого бетону та цементного каменю. Довжина зони непружних деформацій у вершині тріщини залежить від ряду змінних, включаючи розмір, міцність і природу заповнювача в бетоні [107].

Оскільки тріщини розкриваються і починають неконтрольовано розвиватися при досягненні критичного розміру, постійного для кожного матеріалу, потрібно оцінювати тріщиностійкість бетону за розміром критичної тріщини. Важлива роль крупного заповнювача в бетоні, який гальмує руйнування, збільшуючи критичну довжину макротріщини.

Відношення роботи руйнування до приросту поверхні тріщини відоме як густина енергії руйнування. При триточковому згині критична густина енергії руйнування цементного каменю, дрібнозернистого та крупнозернистого бетону є сталою характеристикою в досить великому діапазоні глибин тріщин.

У залізобетонних конструкціях існує критерій тріщиноутворення та розроблена методика розрахунку характеристик тріщиностійкості з врахуванням міцності зчеплення бетону з арматурою, усадки та повзучості [75]. Розроблено залежності для оцінки тріщиностійкості в перерізі з тріщинами за наявності функціональної арматури та враховано методику встановлення критичної глибини зони передруйнування [74, 76].

Бліхарський та ін. [11, 12, 243] дослідили, як вид і міцність бетону впливають на параметри міцності, деформативності, тріщиностійкості та швидкості поширення корозії при одночасній дії агресивного середовища і навантаження на залізобетонні балки.

На основі критеріїв механіки руйнування розроблено метод граничних станів бетонних і залізобетонних конструкцій, який дозволяє визначати граничні навантаження в елементах конструкцій, а також критичні довжини тріщин у бетоні. За допомогою цього методу можна визначити дійсні коефіцієнти запасу міцності конструкції шляхом прогнозування граничних станів конструкцій при складних навантаженнях з урахуванням тріщин, дефектів і пошкоджень, отриманих під час експлуатації [13].

Існує прямо пропорційна залежність між параметрами в'язкості руйнування та міцності бетону на розрив, що не залежить від типу бетону. Для важкого бетону значення кореляції становить 0,6. Будівельний розчин має нижчу в'язкість руйнування, ніж бетон з такою ж міцністю на розрив. Як легкий, так і важкий бетон відповідають цій залежності.

Стійкість бетону до тріщиноутворення підвищується за рахунок розподіленого армування з високомодульних волокон з матеріалів, таких як сталь, скло, азбест і вуглець [183, 204]. Слід відзначити, що навантаження на момент розвитку першої тріщини зростають при додаванні сталевих волокон порівняно зі зразками неармованого бетону. Зі збільшенням вмісту фібри підвищується міцність на момент утворення макротріщини. Опір руйнуванню при статичному навантаженні може в 1,5 рази перевищувати границю міцності на розтяг неармованого бетону. Ступінь дисперсного армування, який базується на діаметрі використовуваної фібри, має значний вплив на тріщиностійкість армованого фібробетону. Розміри волокон також мають значення і часовий інтервал між початком навантаження і появою тріщини може зростати. Високомодульні волокна малого діаметру впливають на початкову ширину тріщини. Значне зниження напружень у волокнах в момент утворення тріщин в бетоні зумовлене зростанням їх кількості на площу розрахункового перерізу, що пояснює механізм значного

підвищення тріщиностійкості при зменшенні діаметра волокон. Тому ці фактори мають бути враховані при проектуванні конструкцій, що потребують більш високого рівня тріщиностійкості [381].

1.2. Роль структури в бетоні з підвищеною тріщиностійкістю

При вирішенні проблеми підвищення тріщиностійкості бетонів взаємозв'язок між властивостями вихідних матеріалів, складом бетонної суміші, структурою і властивостями бетону, технологічними факторами, експлуатаційними і природно-кліматичними впливами має бути врахований [25, 30, 31, 124, 132, 170, 293, 354, 372].

Додавання хімічних і мінеральних добавок до бетону є одним з доступних на сьогоднішній день методів модифікування структури та покращення його властивостей. Практично у всіх сферах виробництва бетону використовуються органо-мінеральні добавки, що сприяє розвитку нових технологій, які без них були б неможливими. Також можуть використовуватися портландцементи з мінеральними добавками в комплексі з хімічними модифікаторами [67].

Серед відомих мінеральних добавок з пуцолановими властивостями можна виділити побічні продукти промисловості (паливні шлаки, зола-винесення) і природні пуцолани (пемза, діатоміт, природні та штучні цеоліти). Введення пуцоланових матеріалів сприяє позитивному впливу на розвиток структури бетону внаслідок "ефекту дрібнодисперсних порошків", який проявляється в розширенні відкритої поверхні, на якій відкладаються продукти гідратації, що прискорює процес формування цементної матриці бетону [21, 73].

Цеоліти представляють великий інтерес через їх доступність у великій кількості і, незважаючи на їх кристалічну структуру, чудову пуцоланову активність

і потенціал для модифікування мікроструктури бетону [136]. Дослідження [187, 361] показують, що деякі цеоліти залежно від розміру пор і каналів, можуть бути використані для пролонгованої гідратації в'язучої речовини. Природний цеоліт містить велику кількість реакційноздатних SiO_2 і Al_2O_3 , тому проведено ряд досліджень, щоб виявити його ефективність як пуцоланового матеріалу [140, 313, 371]. Іони лужних металів у цеолітах можуть бути заміщені кальцієм з наступним їх руйнуванням. Вивільнений кремнезем і глинозем зв'язують кальцію гідроксид, утворюючи гідросилікати і, можливо, гідроалюмінати кальцію. Саницький та ін. [103] вважають, що однією з особливостей цеоліту є те, що він, крім активного зв'язування вапна, ще активніше поглинає SO_3 за рахунок глинозему (міститься в цеоліті), а його активність (легке виділення з алюмосилікатної структури) зумовлена дисперсністю і кристалічністю. Унікальні характеристики, як висока питома поверхня, яка доступна для реакції, і відкрита пориста структура цеоліту сприяють підвищенню його реакційної здатності та забезпечують направлене формування фазового складу портландцементної матриці бетону.

Кропивницька [72], Іващишин та ін. [63, 339] виявили, що цемент, який містить цеолітовий туф, потребує більше води для отримання суміші такої ж консистенції. Коли він використовується для виробництва бетону, суперпластифікатор повинен бути доданий для контролю реологічних властивостей суміші. Слід відзначити, що модифікування бетонів пуцолановими добавками дає змогу змінити морфологію гідратних фаз, а додаткове введення хімічних добавок призводить до модифікування структури бетону на мікрорівні та прямого позитивного впливу на фізико-механічні властивості цементної матриці та підвищення в'язкості руйнування і, як наслідок, тріщиностійкості [242]. Застосування таких добавок сприяє підвищенню довговічності бетонів, особливо в агресивному середовищі, та зменшенню ймовірності лужної корозії [137, 186, 248].

Слід відзначити, що при низькій витраті портландцементу, яка спостерігається в сучасній технології бетону з високоефективними суперпластифікуючими добавками, в бетоні не вистачає дрібних частинок, що компенсується використанням раціонально підібраних пуцоланових матеріалів.

Заповнення пустот в структурі бетону, її ущільнення та розсув зерен цементу є повністю фізичними процесами, що не залежать від активності пуцоланових матеріалів, і здебільшого визначаються їх доступністю та вартістю. Розподіл частинок за розмірами визначає якість мезо- і макроструктури бетону з підвищеною міцністю [116]. Вибір розмірів і співвідношень частинок для заповнення проміжків і пустот є часто основною метою впроваджених моделей ідеального пакування компонентів бетонних сумішей. Існують безперервні моделі та дискретні моделі. Класична трикомпонентна важка бетонна суміш (крупний заповнювач, дрібний заповнювач і в'язуче) з переривчастою гранулометриєю складається з дискретних моделей. Розвитку неперервних моделей упакування сприяють сучасні тенденції до зниження витрати цементу і збільшення їх питомої поверхні, а також застосування тонкодисперсних заповнювачів і полідисперсних активних мінеральних добавок [269, 359]. Помітний вплив на оптимізацію розмірів частинок в діапазоні 0,1-1000 мкм дає використання вдосконалених моделей, заснованих на кривій Фуллера. За допомогою цього методу зола-винесення ТЕЦ з оптимальною гранулометриєю може замінити 35 мас.% портландцементу в цементно-піщаних розчинах без негативного впливу на їх ранню та проектну міцності, зменшення капілярної пористості або збільшення їх водонепроникності. За даними [157], можна знизити вміст цементного клінкеру до 50% без погіршення механічних і фізичних характеристик шляхом оптимізації вмісту в'язучого.

Саме такі підходи до формування структури та властивостей використовуються в бетонах для будівництва транспортної інфраструктури, а для їх виготовлення зменшення водоцементного відношення для забезпечення щільної структури є необхідною умовою.

Відомо, що проникність, пористість, міцність бетону пов'язують з його довговічністю [131]. Водопоглинання та стійкість до поперемінного замерзання та відтаювання затверділого бетону є ще одними важливими параметрами для бетонів, які використовуються для будівництва мостів і доріг. За даними [302], на морозостійкість впливають такі фактори, як розмір, тип і розподіл пор і капілярів у бетоні. Закриті та дрібні пори в такій структурі не повністю насичені водою і

виступають як резервні пори. Під час замерзання вода може мігрувати до цих пор, зменшуючи внутрішні напруження в бетоні, спричинені розширенням льоду при замерзанні води та підвищуючи тріщиностійкість за рахунок послаблення несилкових впливів. Повітровтягуючі добавки виявилися надійним методом покращення властивостей бетонної суміші [239] і характеристик затверділого бетону, особливо в умовах замерзання/відтавання [367].

Вища міцність на стиск, розтяг при згині, високий модуль пружності, підвищена стійкість до стирання і знижена водопроникність є типовими характеристиками бетонів на основі сумішей з В/Ц нижче 0,4 [332]. Однак при виробництві бетону з низьким В/Ц йому не завжди вистачає води для повної гідrataції в'язучого. Довготривале вологе тверднення має вирішальне значення для транспортних бетонних споруд з метою забезпечення оптимальних початкових і проектних характеристик, оскільки недостатня кількість рідкої фази може призвести до усадки, деформацій, тріщиноутворення і зниження експлуатаційних характеристик [366]. Хоча традиційні методи, такі як покриття вологоутримуючими та плівкоутворюючими речовинами або використання туманних завіс, можуть допомогти, вони не контролюють вологісну усадку, спричинену дефіцитом води при низьких В/Ц відношеннях ($V/C < 0,4$), що призводить до активного тріщиноутворення та зниження міцності і довговічності конструкції [133].

Суміші з низьким В/Ц, які містять пуцоланові матеріали, такі як зола-винесення теплових електростанцій, мелений гранульований доменний шлак та природні і штучні пуцолани потребують тривалого догляду для досягнення повноти реакції гідrataції у цементній системі. Деякі пуцоланові матеріали, завдяки своїй підвищеній питомій поверхні та високій реакційній здатності, можуть посилювати самообезводнення та хімічну усадку в сумішах з низьким В/Ц [146]. Крім того, надзвичайно низька проникність при низькому В/Ц може перешкоджати інфільтрації зовнішньої води, навіть на ранній стадії тверднення. Як наслідок, зовнішня вода може не досягти незволожених зерен цементу, обмежуючи ступінь гідrataції і реакцію з пуцолановими матеріалами. Запропоновано і

розвинуто концепцію «internal curing» в таких бетонах [133, 147, 148, 149, 198, 250, 380]. Ця концепція передбачає введення в бетон додаткових внутрішніх резервуарів води для забезпечення процесів гідратації [262]. Згідно з [146], ефективність такого підходу залежить від ступеня гідратації в'язучого та проникності бетону, тому доцільно вводити пористі компоненти в суміш при $V/C \leq 0,4$. Для бетонів транспортного призначення поглиблена гідратація є необхідною через велику відкриту поверхню, що інколи обмежує традиційні варіанти догляду [259]. Додаткова вода також допоможе максимізувати гідратацію цементу та пуцоланічних мінеральних добавок в бетоні, що потенційно сприятиме підвищенню міцності та тріщиностійкості.

Процес створення внутрішнього резерву води для гідратації в'язучого передбачає введення в цементну матрицю спеціальних добавок. До них відносяться пористі компоненти, такі як легкі заповнювачі та водоутримуючі суперабсорбуючі гранули, які вивільняють вологу в бетонну матрицю для подовження процесу гідратації [264]. Крім того, хімічні добавки використовуються для зменшення поверхневого натягу в порах бетону, що допомагає зменшити усадку.

Використання суперабсорбуючих полімерів і пористих заповнювачів для створення внутрішніх резервуарів води широко вивчалось в декількох наукових роботах [174, 176, 177, 366]. Включення внутрішнього резервуару води у бетон з підвищеною тріщиностійкістю дозволяє зменшити несилкові впливи на його структуру внаслідок зменшення усадочних деформацій.

Використання попередньо зволоженого спеченого зольного залишку (sintered fly ash) при виробництві бетонної дорожньої плити дозволило забезпечити тривалу гідратацію цементу в сухих умовах тверднення, підвищити міцність бетону на розтяг при згині на 40% і вище та зменшити капілярне водопоглинання [373].

Легкі заповнювачі є найбільш економічно ефективним і простим способом підтримання високої міцності бетону в сухих умовах тверднення. Заміна дрібного заповнювача на попередньо змочений легкий заповнювач має значний вплив на зменшення усадочних деформацій, морозостійкість і проникність бетону [198, 374]. Однак, як правило, це знижує міцність бетону на стиск [287]. Тверднення бетонів в

сухих умовах із відношенням В/Ц $\geq 0,42$, до складу яких входить водонасичений керамзит, мають ступінь гідратації цементу на 16% вищий і на 19% більшу міцність на стиск та на 30% нижчу проникність порівняно з аналогами без керамзиту. Це демонструє ефективність створення внутрішніх резервів води для бетонів з низьким В/Ц відношенням.

Загалом, замочування пористих компонентів під час виробництва є технологічно складним та економічно недоцільним. Однак використання порошкоподібних дрібнопористих мінеральних компонентів може бути вигідним завдяки їх здатності швидко поглинати воду та високій питомій поверхні. На відміну від інертних легких заповнювачів, активні мінеральні добавки можуть частково замінити цемент у бетоні, знижуючи його собівартість та формуючи структуру з підвищеною міцністю, довговічністю і тріщиностійкістю.

Зазвичай при зведенні бетонних конструкцій в районах зі значними коливаннями температури і вологості, на ранніх стадіях тверднення бетону можуть виникати мікротріщини через комбінований вплив усадки і температурних напружень [377]. Це питання особливо актуальне в теплу пору року при будівництві конструкцій з великою площею поверхні, таких як покриття доріг і аеродромів, а також мостових прольотів. Тому важливе значення для стримування процесів розвитку мікротріщин, внаслідок несилових впливів, і підвищення тріщиностійкості має структура цементної матриці, наявність в ній неоднорідностей, а саме пори гелю, поверхні поділу фаз та мікрокапіляри [107].

1.3. Мінеральні добавки в бетонах з покращеними властивостями

Портландцемент та вироби на його основі протягом багатьох років відіграють

дуже важливу роль у розвитку будівництва, а бетони на основі портландцементу є найбільш використовуваними матеріалами в будівельній галузі [217, 323]. Технологія виробництва портландцементу, який залишається основним компонентом бетону на основі мінерального в'язучого, спричиняє значні викиди парникових газів, що зумовлює зміни клімату та глобального потепління [278, 321]. Процес виробництва портландцементу є дуже енергоємним [95, 277, 335] і генерує майже 7% світових викидів парникових газів [69, 159, 234, 266, 267, 283]. Тому зменшення вмісту портландцементу в бетоні та часткова заміна його пуццолановими матеріалами може зробити суттєвий внесок у сталий розвиток та зменшення негативного впливу цементного виробництва на довкілля [27, 29, 99]. Раціональний підбір їх типу та вмісту дозволяє отримати бетон із заданим набором властивостей при збереженні фізико-механічних характеристик [24, 181, 302, 359]. Пуццоланові матеріали часто використовуються в технології бетону для підвищення його технічних властивостей [4, 244]. Порівняно з іншими добавками, вони найбільше впливають на структуру і властивості бетону. Процес виготовлення бетону різної міцності з використанням однієї марки портландцементу пояснює простоту, з якою пуццоланові матеріали можуть бути введені в бетон. Як показує практика, використання оптимально диспергованих пуццоланових матеріалів може зменшити використання цементу на 20% при одночасному збільшенні міцності на 15%.

Мінеральні добавки пуццоланової природи активності можуть бути природними (цеолітовий туф), побічними продуктами спалювання палива (зола-винесення), синтезовані (штучні цеоліти) або з металургійного сектору (кремнеземний пил, доменний гранульований шлак) [14, 35]. Пуццолані матеріали, особливо алюмосилікати (зола-винесення, цеолітовий туф тощо), мають численні переваги [218]. Ці матеріали дуже ефективні через легку доступність деяких з них, що дає економічну перевагу, здатність підвищувати механічні властивості та довговічність будівельних матеріалів [97, 162, 218, 265, 344].

Такі мінеральні добавки - альтернативи цементу є окремою і досить самостійною категорією. Вони додаються безпосередньо до бетонної суміші. Пуццоланові матеріали знижують вартість будівництва, підвищують міцність,

морозостійкість і водонепроникність бетону, а також впливають на кінцеву якість бетону через гідравлічні або пуцоланові ефекти [232]. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-128:2006 [43], мінеральні добавки до цементу класифікуються на три типи, виходячи з їх функцій, а саме ті, що здатні до слабкої (прихованої) гідратації, до активної взаємодії з продуктами гідратації цементу, інертні, але за хімічним складом подібні до продуктів гідратації цементу.

Використання побічних продуктів як пуцоланових матеріалів замість клінкеру в технології виробництва цементу та цементу в бетоні сприяє частковому вирішенню проблем збереження матеріальних, енергетичних ресурсів та забруднення довкілля [60, 130, 199, 255]. Мелені гранульований доменний шлак (ГДШ) і зола-винесення (ЗВ) належать до побічних продуктів, які успішно використовуються в будівництві.

ГДШ є досить цінним відходом і використовується в будівельній промисловості [2, 119]. Мелений гранульований доменний шлак почав широко застосовуватися після відкриття його прихованих гідравлічних властивостей. Багато дослідників проводили численні експерименти для визначення властивостей цементів і бетонів, що містять ГДШ і золу-винесення [188, 193, 203 297, 339, 347, 357]. За даними Іващишин та ін. [339] і Курдовського [254], властивості цементів і бетонів, що містять доменний шлак, залежать від хімічного складу, крупності шлаку і кількості склоподібної фази в шлаку. Kumar та ін. [274] також дійшли висновку, що ефективність шлаку залежить від розміру його частинок. Дисперсність шлаку та співвідношення шлак/цемент впливають на міцність бетону, що містить ГДШ. Існує багато переваг ефективного використання ГДШ у бетонах, таких як зменшення виділення теплоти гідратації, менша проникність, більш висока міцність у більш пізньому віці та підвищена стійкість до корозії [178, 300]. Було також зазначено, що використання дуже високих рівнів заміни портландцементу шлаком може вплинути на корозійну стійкість арматурної сталі. Menéndez та ін. [280] доведено ефективність потрійного змішаного цементу, що містить вапняковий наповнювач (ВН) і доменний шлак. ВН в таких системах викликає підвищення гідратації на ранніх стадіях, тоді як шлак сприяє гідратації на середніх

і пізніх стадіях. Domenico та ін. [336] досліджували поведінку залізобетонних балок, що містять шлак електродугових печей, під навантаженням. Шлак використовувався як крупний заповнювач. Зроблено висновок, що кінцева міцність на згин і зсув вищезгаданих балок з шлаком електродугових печей була вищою завдяки покращеним властивостям такого бетону.

Зола-винесення (ЗВ) є побічним продуктом теплових електростанцій [247]. Використовується як у технології виробництва цементу, так і бетону [210, 281, 333]. Це позитивно впливає на такі властивості бетонних сумішей і затверділих бетонів, як легкоукладальність, міцність, усадка при висиханні, термічні властивості та стійкість до стирання [141, 171, 305, 311]. Ghais та ін. [299] стверджують, що додавання 10 мас. % золи-винесення підвищує міцність бетону, а більша кількість – знижує. Вищезгадані дослідження були зосереджені на використанні як подрібненої, так і неподрібненої (неактивованої механічно) золи-винесення. Використання неактивованої золи-винесення дозволяє уникнути додаткових операцій, таких як її подрібнення, що зменшує споживання електроенергії і, як наслідок, природні енергетичні ресурси, які все ще використовуються для виробництва електроенергії, і викиди парникових газів. Неактивована зола-винесення дозволяє оптимізувати розподіл частинок за розміром у цементах і бетонах, оскільки вона відіграє роль мінеральної добавки з пуцолановими властивостями та як мікронаповнювач [89, 305].

Соболь та ін. [103] і Li та ін. [256] дійшли висновку, що комбіноване використання ГДШ і ЗВ як в цементі, так і в бетоні є дуже ефективним [233]. З одного боку, деякі дослідники показали, що в'язуча система, що містить портландцемент, ГДШ і ЗВ, забезпечувала вищу міцність у будь-якому віці, ніж в'язуча система, що включає ГДШ і ЗВ окремо [256, 346]. З іншого боку Jeong і ін. [282] не знайшли жодних відмінностей у цементній системі, що включає ГДШ та ЗВ.

Фернандес та ін. [208] також зазначили, що синергетичний ефект між ГДШ і ЗВ залежить від хімічного складу портландцементу у в'язучій системі, яка складається з цих компонентів. Таким чином, хімічний і зерновий склади

портландцементу, меленого гранульованого доменного шлаку і золи-винесення можуть впливати на властивості цементної системи в бетоні.

Застосування ГДШ та ЗВ також може мати вплив на початковий рН цементної системи та захисний пасивуючий шар, який утворюється на арматурних стержнях за рахунок лужного середовища в бетоні [306]. В останні кілька десятиліть корозія арматурних стрижнів у залізобетонних конструкціях є одним із основних факторів, що викликає їх передчасне руйнування та серйозно впливає на експлуатаційну придатність та безпеку [154, 172]. Проте в літературі небагато публікацій, пов'язаних із впливом кількості пуцоланових матеріалів на корозійну стійкість арматурних стрижнів у бетонах, незважаючи на тенденцію до значного зниження клінкер-фактора (CF) у цементах відповідно до сучасних тенденцій, що може впливати на стійкість сталевих арматурних стрижнів у таких бетонах. Крім того, дуже важко отримати високий клас міцності цементів з низьким CF, і це може призвести до збільшення витрати цементу в бетоні, викликати більшу повзучість і деформацію усадки і, як наслідок, вплинути на корозійну стійкість арматури і довговічність конструкцій. Розробка цементу з меншим рівнем заміщення клінкеру і більшою міцністю на стиск забезпечує зниження його витрати в бетонах і поліпшення механічних властивостей бетонів і його довговічність, а також стійкості сталеві арматури в залізобетоні [263]. За даними Yeau and Kim [375], ймовірність корозії арматурних сталевих стрижнів у бетоні на основі цементу типу V була вищою, ніж у бетоні на основі портландцементу типу I. Встановлено, що площа прокородованої поверхні залежить від кількості ГДШ, а стійкість до корозії сталі краща в бетоні на основі портландцементу типу I з більшою кількістю ГДШ. Торсу та Воґа [364] досліджували корозійні властивості сталевих арматурних стрижнів у бетоні, що містить 25 та 50 мас.% ГДШ. Дослідження виконані в умовах класу впливу навколишнього середовища на бетон XC1 (неконтрольована відносна вологість і температура) і XC2 (у воді з температурою 20 ± 2 °C) у віці 28, а також 90 діб. Дослідники показали, що час руйнування подовжується в бетоні, який містить 25% маси ГДШ, для обох умов тверднення. Відповідно до Song і Saraswathy [331], зниження рН бетону, що містить ГДШ, не мало істотного впливу на

корозійну стійкість арматури. Дослідники також помітили, що сталева арматура в цементі, який містить неактивовану золу-винесення, зазнала сильної корозії [325]. Проте бетон, що містить активовану золу-винесення, характеризується покращеною корозійною стійкістю. Polder [304] резюмував, що заміна клінкеру 50–70 мас. % ГДШ і 20–30 мас.% золи-винесення призвела до підвищеної стійкості проникненню хлориду та питомого електричного опору, зменшуючи ризик корозії в середовищах, забруднених хлоридами. Композиційні цементи, що містять 25 мас.% як шлаку, так і золи-винесення, поведуться подібно.

Серед природних пуцоланових матеріалів, які можуть використовуватися в технології бетону особливий інтерес представляє цеолітовий туф, який виявляє значну пуцоланову активність [289, 319]. Великі родовища цеоліту, придатні для видобутку, знаходяться в багатьох країнах світу. Річний обсяг виробництва природних цеолітових туфів залишається відносно стабільним протягом останнього десятиліття і становить приблизно 3 млн. тонн.

Цеолітовий туф [8, 168] є одним з найбільш перспективних матеріалів для часткової заміни портландцементу в бетонах та клінкеру в портландцементях. Цеоліти - це велика категорія мінералів, що складаються з водних алюмосилікатів кальцію і натрію, які іноді заміщуються К, Ва, Sr та іншими елементами. Сьогодні відомо кілька природних цеолітів (цеолітових туфів), найпоширенішими з яких є кліноптилоліт, гейландит, філіпсит і морденіт.

Хімічний склад цеолітовмісних порід нестабільний, що можна пояснити наявністю різних домішок та гідрохімічними умовами утворення. Згідно з дослідженнями Franus [213], цеоліти являють собою групу алюмосилікатів кристалічної структури, що включає порожнини, об'єднані відкритими каналами – вікнами, які мають велике значення для процесів, пов'язаних з адсорбцією та масообміном. Тому цеоліти часто називають «пористими кристалами» або «молекулярними ситами» [143]. Цеолітові туфи належать до гідратованих алюмосилікатів лужних і лужноземельних катіонів з тривимірною каркасною структурою. Цеолітовий туф, який містить кристалічні алюмосилікати, що складаються з тривимірного розташування кремнієво-кисневих (SiO_4) і алюмінієво-

кисневих (AlO_4) тетраєдрів, широко використовується в деяких регіонах світу як пуцоланові матеріали. Відомо, що вони виявляють значну пуцоланову активність, незважаючи на їх чітку кристалічну структуру [134, 300, 309, 334]. Uzal та ін. [307, 334] стверджують, що кліноптилолітовий цеоліт має значну пуцоланічну реакційну здатність, яку можна порівняти з кремнеземом і вищу, ніж у золи-винесення. Вони також дійшли висновку, що висока реакційна здатність кліноптилоліту пояснюється його питомою поверхнею, яка залежить від методу і часу подрібнення, а також вмісту реакційноздатного SiO_2 . Цеолітові туфи мають велику кількість дрібних пор і каналів з великою питомою поверхнею 35-45 m^2/g (внутрішньою і зовнішньою) і здатністю поглинати і втрачати воду до 30 мас.%. Велика кількість реакційноздатних SiO_2 та Al_2O_3 у цеолітовому туфі, які реагують із $Ca(OH)_2$ з подальшим утворенням кальцію гідросилікату та гідроалюмосилікату, відповідають за пуцоланову активність цього матеріалу [134, 324]. Це призводить до зростання міцності на стиск бетону, що містить цеолітовий туф, і підвищує довговічність за рахунок зниження проникності бетону і особливо покращує стійкість до лужної корозії [134].

Цеоліт використовується також як активна мінеральна добавка при виробництві портландцементу [23, 180, 251], силікатної цегли, сухих будівельних сумішей та бетонів. Незважаючи на виражену кристалічну структуру, цеоліти мають значну пуцоланову активність, яка не поступається мікрокремнезему, що підтвердили Mertens і ін. [308]. На думку В. Ahmadi та М. Shekarchi [134], ці особливості пояснюються значною питомою поверхнею матеріалу (завдяки пористій структурі), а також підвищеним вмістом реакційноздатних Al_2O_3 та SiO_2 , які взаємодіють з $Ca(OH)_2$ з утворенням гідросилікатів та гідроалюмосилікатів кальцію. Саницький, Соболь та ін. [8, 103, 251, 292, 378] встановили, що це підвищує міцність на пізніх термінах тверднення, зменшує тепловиділення при гідратації та покращує корозійну стійкість цементних композицій та бетонів, що містять цеолітовий туф.

Враховуючи пористу природу цеолітів, вітчизняні та зарубіжні фахівці провели багато досліджень з метою визначення ефективності їх використання для

одержання бетонів із заданими властивостями та можливості забезпечити «internal curing» ефект [96, 322]. Так, використання водонасиченого цеоліту для заміни частини кварцового піску знижує усадочну деформацію високоміцного бетону при збереженні його міцності на пізніх термінах твердіння. Згідно з результатами роботи [138], ультрадисперсний цеоліт (0,1-10 мкм) з високим вмістом кліноптилоліту (понад 95 мас. %) не є ефективним у забезпеченні внутрішніх резервів води у високоміцному бетоні з В/Ц = 0,3 порівняно з керамзитовим порошком. Однак його використання як пуцоланового матеріалу - мікронаповнювача є перспективним. У проведених дослідженнях [189] автори підтвердили позитивний вплив цеолітового туфу фракції 1-500 мкм на зменшення усадочних деформацій бетону на 42% при одночасному підвищенні його міцності та водонепроникності на пізніх стадіях тверднення.

Nagroškiene і Girskas [289] показали, що додавання 10% цеоліту до бетону підвищило його міцність на стиск на 15% і зменшило водопоглинання в 2,3 рази. Закрита пористість цеолітовмісного бетону зростала, збільшуючи морозостійкість у 3,3 рази. За даними Shekarchi [322], самоущільнювальний бетон з вмістом 10-20% цеолітового туфу має підвищені показники довговічності: до 20% нижче водопоглинання, стійкість до хлоридної корозії та в 4,5 рази вищий електричний опір; однак вміст 20 мас.% цеолітового туфу дещо знижує міцність бетону і значно збільшує витрати пластифікатора для забезпечення рухливості суміші. Крім того, згідно з висновками Vejmelková та ін. [201], додавання до 20 мас.% цеолітового туфу забезпечує найкращий баланс між зниженням водопоглинання, міцності бетону та підвищенням його довговічності, а саме морозо- та корозійної стійкості.

Показано, що використання цеолітового туфу в цементі та бетоні значно підвищує їх довговічність [268, 328], а також механічні [291] властивості та забезпечує більш тривале збереження марки за легкоукладальністю [240]. Nagroškiene та ін. [290] досліджували вплив модифікованого цеоліту на стійкість цементного каменю до попереминого замерзання/відтавання та солей проти обледеніння. Результати показали значне покращення щільності, міцності та морозостійкості, а також стійкості до шкідливої дії солей. Дослідження [216]

свідчать, що морозостійкість бетону, який містить цеолітовий туф, демонструє дещо нижчі показники, ніж контрольного бетону під час початкової фази циклів заморожування/відтавання. Із збільшенням кількості циклів морозостійкість бетону, що містить цеолітовий туф, значно перевищує морозостійкість звичайного бетону, що пов'язано з проявом ефекту поглибленої гідратації. Однак у вищезазначених дослідженнях не вивчався сумісний ефект використання як цеолітового туфу, так і повітровтягувальних добавок.

Ще одним цікавим пористим пуцолановим матеріалом є спучений перліт. Однак, на відміну від цеолітового туфу, пористість перліту є відкритою, а не внутрішньокристалічною.

Завдяки своїй високій здатності до подрібнення, перліт не потребує для цього процесу багато енергії і може бути використаний як ефективний пуцолановий матеріал [195]. Робота [370] демонструє, що використання перліту для заміни 20% клінкеру в цементі дозволяє досягти високих показників міцності без значного впливу на водопотребу.

Згідно з дослідженнями [376], пуцоланова активність дрібнодисперсного перліту в бетоні може підвищити міцність на стиск і згин на 12-15% через 91 добу тверднення. Введення перліту до складу самоущільнювального бетону [195] підвищує його міцність у віці 91 діб, а також електричний опір бетону, довговічність, стійкість до хлоридної корозії та водонепроникність.

Так як спучений перліт має велику водопоглинальну здатність (понад 200% за масою) завдяки розвиненій відкритій пористості, його рекомендують використовувати для створення внутрішніх резервуарів води в бетоні. Використання водонасиченого перліту знижує усадочні деформації цементного каменю, одночасно підвищуючи опір згинальному навантаженню і енергію руйнування в самоущільнюваному бетоні.

Дослідження [303] підтвердили активний вплив 10 мас.% спученого перліту на зменшення майже на 33% усадочних деформацій цементного розчину. Zhutovsky та ін. [379] виявили, що використання перлітового компонента з ефективним розміром і пористістю дозволяє повністю запобігти усадочним деформаціям бетону

при витраті лише 10 кг/м^3 спученого перліту. Досліджено також вплив розміру зерна дрібного заповнювача на фізико-механічні властивості розчину.

Штучні цеоліти, більшість з яких отримують із відходів промисловості (наприклад, золи-винесення), є перспективними інноваційними пуцолановими матеріалами. Значна увага приділяється дослідженню можливості їх використання в будівельній галузі, зокрема в технології бетону. Такі цеоліти можуть бути синтезовані з кристалічних і аморфних матеріалів, з гелів силікатів алюмінію, лужних металів або шляхом нагрівання мінеральних суспензій силікатів алюмінію, гідроксидів і води. Із зростанням кількості та різноманітності промислових відходів існує широкий вибір сировини та побічних продуктів для синтезу штучних цеолітів, таких як скляний брукт, різноманітні шлаки та глини, вугільні зольні залишки та зола-винесення, побічні продукти видобутку та відходи хімічної промисловості [285].

Дослідженнями Caputo та ін. [158] встановлено вплив структури двох синтетичних Na-цеолітів А і Х (із співвідношенням $\text{Si/Al} = 1,0\text{--}1,2$) на їх пуцоланову активність. Результати показали, що механізм дії обох цеолітів включав такі етапи: катіонний обмін, розчинення та/або руйнування, утворення метастабільного алюмосилікатного гелю та осадження гідратованих силікатів кальцію та алюмінатів із розчину. Дослідженнями встановлено, що цеоліт А вступає в реакцію активніше, ніж цеоліт Х, проте останній характеризується вищим вмістом кремнезему, що сприяє інтенсивнішому набору міцності цементного каменю у ранні терміни тверднення.

Додавання синтетичного цеоліту у цементне тісто суттєво впливає на його реологічні властивості. У роботі [317] автори зазначають, що використання цеоліту 5А є перспективним, оскільки він контролювано змінює параметри в'язучого, підвищуючи його механічні властивості при збереженні пластичності. Результати досліджень вказують, що оптимальний вміст синтетичного цеоліту становить 10%, що підтверджується емпіричними випробуваннями у бетоні.

Подібні результати були отримані литовськими вченими [222] з використанням синтетичного цеоліту на основі відходів виробництва AlF_3 . Так,

розплив цементного тіста з вмістом 10 мас.% цеоліту зменшується у два рази, а введення 5 мас.% підвищує в'язкість цементного тіста з 81,11 до 746,5 мПа·с. Подальші дослідження [220] показали, що додавання 10% синтетичного цеоліту призводить до зменшення вмісту портландиту та утворення гідроалюмінатних сполук у затверділому цементному камені. Заміна 10% цементу на синтетичний цеоліт збільшує морозостійкість бетону, зменшуючи втрату маси після 28 циклів заморожування-відтавання більше, ніж в 1,6 рази. Також встановлено [221], що 5% цеоліту знижують водопоглинання, збільшують міцність на розколювання більш ніж на 10% і зменшують стиранисть на 6,5% верхнього шару бетону вібропресованої бруківки. Крім того, втрата маси після 28 циклів заморожування-розморожування у 3% розчині NaCl зменшується приблизно в 4 рази.

Часткова заміна цементного клінкеру відпрацьованим синтетичним цеолітом ZSM-11 [310] підтвердила, що цю добавку можна вводити до 10 мас.% без суттєвого негативного впливу на властивості в'язучого, що робить його перспективною мінеральною добавкою у виробництві екологічно безпечного цементу.

При введенні синтетичного цеоліту, виготовленого з промислових відходів, початок тужавіння цементу скорочується [153], без зниження його ранньої міцності, та одночасно знижується температура гідратації з підвищенням вмісту цеоліту. Найвищий показник міцності на стиск спостерігався через 28 діб з заміною портландцементу цеолітом у кількості 5 мас.%.

Дослідження Frontera [362] показують, що Al_2O_3 і SiO_2 у складі синтетичних цеолітів Na-A та Ca-A, при взаємодії з $Ca(OH)_2$ сприяють утворенню C-S-H гелю та алюмінатів, що, у свою чергу, покращує мікроструктуру затверділого цементобетону, підвищуючи його щільність.

Заміна до 10% цементу на штучний цеоліт [316] прискорює настання температурного максимуму та збільшує загальну теплоту гідратації цементу на 8,5%. Авторами встановлено, що структура, міцність на стиск і водопоглинання цементного каменю залежить від співвідношення Al/Na, рН і значень електропровідності цеоліту. Результати свідчать, що синтетичний цеоліт завдяки

наявності мінералу гіббситу, який прискорює утворення фази C-S-H у продуктах гідратації цементу, підвищує його міцність на стиск до 28,6% через 28 діб тверднення та зменшує водопоглинання до 1,5% порівняно із зразком без цеоліту.

Sujjavanich та ін. [341] дослідили, що заміна 7,5 і 10% цементу на синтетичний цеоліт типу А значно зменшили легковкладальність і міцність на стиск бетону. На відміну від природнього клиноптилоліту, досліджений авторами штучний цеоліт незначно впливає на розширення, викликане лужною реакцією аморфного кремнезему у заповнювачах. Загалом, властивості, активність та вплив штучного цеоліту на цементні системи суттєво залежить від його типу, вихідної сировини та параметрів синтезу, дозування та інших факторів.

Отже, використання пуцоланових матеріалів не тільки покращує характеристики бетону, а й при застосуванні деяких з них, а саме цеолітового туфу та перліту забезпечує зсередини внутрішні резерви води в бетоні завдяки їх пористій структурі. Зростання водопотреби бетону, що містить полідисперсний цеолітовий туф, вимагає використання хімічних добавок, щоб забезпечити необхідні технологічні властивості бетонної суміші при збереженні запроектованого водоцементного відношення.

1.4. Вплив поверхнево-активних речовин на властивості та довговічність бетонів з підвищеною тріщиностійкістю

Концепція виробництва бетонів нового покоління з підвищеною міцністю, тріщиностійкістю та експлуатаційними характеристиками не може бути реалізована без застосування складних хімічних добавок і модифікаторів [3, 19, 22, 81, 90, 93, 128]. Сучасний цементобетон, завдяки новим хімічним добавкам,

перетворився на більш складний композиційний матеріал з кращими властивостями, порівняно з звичайними бетонами [5, 86, 110, 124, 225, 236, 254, 320]. Показано, що ефективність дії пластифікаторів залежить від способу їх додавання до складу бетону [88]. Одним з найбільш перспективних напрямків технологічного вдосконалення технології бетону є отримання цементної матриці, яка має потенціал для кардинального поліпшення фізико-технічних властивостей бетону. У багатьох випадках ці питання можуть бути успішно вирішені з використанням різних хімічних модифікаторів. Рунова, Троян та ін. [115, 320] показали, що при введенні в невеликих кількостях вони мають значний вплив на фізико-хімічні процеси тверднення в'язучих, а також на технологічні властивості розчинових та бетонних сумішей і будівельно-експлуатаційні властивості затверділого бетону [63, 66, 113, 122].

Однак, для досягнення підвищеної міцності, морозостійкості, водонепроникності та корозійної стійкості цементного бетону, найкраще використовувати спеціально підібраний комплекс добавок, виходячи з функціональної сумісності компонентів, призначення та вимог до бетону [68, 94, 97, 121, 123, 127, 295].

На світових ринках доступний широкий асортимент добавок-модифікаторів. Певні модифікатори надають бетону та конструкціям на його основі різноманітні додаткові характеристики [249]. Найпоширенішими типами є пластифікуючі та структуроутворюючі модифікатори, регулятори тверднення (прискорювачі та сповільнювачі) бетону та комплексні модифікатори з декількома функціями [120].

Пластифікатори та суперпластифікатори для бетонних сумішей відіграють значну роль як хімічні модифікатори [26, 71, 97, 217, 224]. Collepardi [167], Gelardi та ін. і Leu та ін. [165, 360, 367] встановили, що хімічна природа пластифікаторів впливає на спосіб їх дії, а Кривенко та ін. [135] показали ефективність пластифікуючих добавок під час формування структури лужних цементів. Так, найбільш ефективними вважаються модифікатори на основі карбоксилатних та акрилових поліоксидів. Позняк та ін. [93] і Марущак [79] стверджують, що вдало підібрані вид та кількість модифікатора, враховуючи особливості його дії,

відкривають можливість направлено керувати фазовим складом та мікроструктурою цементного каменю. Можливість регулювання водопотреби бетонної суміші за рахунок використання суперпластифікаторів і значного зниження (до 25 - 40%) водоцементного відношення забезпечує виробництво бетонів з підвищеною міцністю класів В30 і вище, а також виготовлення конструкцій з таких бетонів без збільшення виробництва енергоємних високомарочних цементів.

Повітровтягувальні добавки – ще один вид добавок, які в основному використовуються для підвищення морозостійкості бетонів. Зима - це період року, який може визначити довговічність конструкцій через певну кількість циклів заморожування та відтавання, яким можуть піддаватися бетони, і це завжди виклик для будівельників [191]. Вода в бетоні, що піддається поперемінному заморожуванню і відтаванню, замерзає і розширюється приблизно на 9% [173, 191, 342, 367]. Поведінку води в цементному тісті (рівень мікроструктури бетону) при негативній температурі вивчали Koniorczyk та ін. [215]. Відзначено, що відсутність достатнього простору для розміщення цього додаткового об'єму призводить до того, що внутрішні напруги перевищують міцність на розрив. Вони можуть провокувати розтріскування та лущення каменю [173, 342]. Саме тому одним із важливих винаходів у технології бетону стало використання повітровтягувальних добавок [129, 200]. Такі поверхнево-активні речовини (ПАР) є амфіфільними молекулами. Вони можуть бути аніонними, катіонними, амфотерними та неіонними. Слід зазначити, що аніонні поверхнево-активні речовини (головна група заряджена негативно) домінують на ринку повітровтягувальних добавок через їх визнану надійність і низьку вартість [367]. Природа таких поверхнево-активних речовин також може бути різною. Слід зазначити, що повітровтягувальні добавки складаються переважно з різноманітних поверхнево-активних речовин [185, 202]. Їх стабілізація відбувається шляхом адсорбції на межі поділу фаз рідина-газ. Там вони створюють еластичні мономолекулярні плівки за рахунок бічних зв'язків окремих молекул піноутворювача, що створює об'ємні деформації. Однак, як і у випадку з пластифікаторами, гідрофільні відгалуження молекул переходять у

рідку фазу [302]. Молекули ПАР орієнтовані полярними функціональними групами до води, а неполярними - до бульбашок повітря, які заряджаються однаково і чинять опір один одному, перешкоджаючи коалесценції.

Повітровтягувальні добавки позитивно впливають на легкоукладальність бетонних сумішей. Під дією поверхневого натягу бульбашки повітря зберігають свою сферичну форму, слугуючи дрібним заповнювачем з дуже малою поверхнею зчеплення і високою гнучкістю. Повітря надає бетонній суміші властивостей суміші з більшим вмістом дрібного заповнювача, тому при використанні повітровтягуючих добавок відсоток піску повинен бути знижений. Це дозволяє зменшити В/Ц відношення та підвищити опір внутрішнім напруженням і, як наслідок, частково компенсувати втрату міцності, спричинену наявністю пор [167]. Деякі дослідники [338] стверджують також, що границя текучості зростає, а пластична в'язкість зменшується в бетонах з повітровтягувальними добавками.

Структура бетону, що містить повітровтягувальні добавки, характеризується системою рівномірно розподілених дрібнодисперсних повітряних пор з щільною міцною армованою оболонкою на межі повітря/цементне тісто. Вона відрізняється за хімічним складом та морфологією від звичайного цементного тіста [360, 367]. Наявність повітровтягувальних добавок захищає розчинову частину від пошкодження внаслідок замерзання води [191, 326]. Об'єм втягнутого повітря в бетоні без повітровтягувальних добавок становить від 1 до 3%. Діаметр пор у таких бетонах зазвичай перевищує 0,5 мм [367]. Встановлено, що відсутність повітровтягувальних добавок в бетоні, що піддається певній кількості циклів заморожування та відтавання, спричиняє досить значне зниження міцності на стиск. Бульбашки повітря, одержані внаслідок використання повітровтягувальних добавок, в тілі затверділого бетону діють як резервна ємність для заморожування капілярної води без створення великих внутрішніх напружень [115, 223].

Вивченню властивостей розчинової частини бетону багато вчених присвятили чимало досліджень, серед них Atahan та ін. [358], Chatterji [164] та Ouyang та ін. [296]. За даними Du та ін. [185], Fonseca та ін. [211], Jin та ін. [246], Struble та ін. [338] та Ugur Ozturk та ін. [369] повітровтягувальні добавки крім покращення

легкоукладальності та здатності утримувати запроектовану марку за легкоукладальністю, підвищують стійкість до попереминого заморожування та відтаювання [191]. Застосування повітровтягувальних добавок призводить до отримання рівномірно розподілених невеликих повітряних пор майже сферичної форми зазвичай діаметром у діапазоні 10–100 мкм як у розчині, так і в бетоні та до покращення таких технологічних властивостей розчинової суміші, як розшарування та водовідділення, а також, як результат, до підвищення експлуатаційних властивостей та довговічності [131, 169, 175, 190, 301]. Ефективний вміст втягнутого повітря зазвичай становить 4-7%. Структура бетону на мезорівні суттєво впливає на властивості бетонів. Згідно з [164, 259], ці добавки покращують морозостійкість бетону, водночас різко знижуючи його міцність (1% втягнутого повітря знижує на 4-7% міцність на стиск, залежно від водоцементного відношення). У той же час, дослідження Толмачова та ін. [111, 112] показують, що кожен відсоток втягнутого повітря знижує міцність бетону більш ніж на 14%. Тому для збільшення тріщиностійкості бетонів з повітровтягувальними добавками значний практичний інтерес представляє використання дисперсного армування.

1.5. Дисперсне армування бетонів різними видами волокон

Армований фібробетон - це широко імплементована закордонна технологія, яка бере свій початок у 1970-80-х роках 20-го століття. Окремий комітет CEN створив єдину систему стандартів, яку сьогодні впроваджує Європейський Союз. Використання фібробетону вже регулюється нормативними документами в деяких країнах. З міжнародного досвіду варто згадати застосування фібробетону в будівництві перекриттів промислових будівель, морських платформ, доріг і тунелів. Крім того, вважається доцільним використовувати його при зведенні

каркасних конструкцій, особливо у випадку сейсмічної активності.

У світі діють будівельні норми, що передбачають та допускають проектування, методи виготовлення та застосування конструкцій з фіброю на основі звичайного і дрібнозернистого бетонів. У цих нормах наведені типи конструктивних елементів, архітектурно-конструктивні форми та номенклатура фібробетонних конструкцій і виробів.

До бетону, що використовується в промисловому та цивільному будівництві, висуваються інші вимоги, ніж до бетону, що використовується в транспортному будівництві. Наприклад, для дорожніх бетонів існують вищі стандарти щодо міцності на розтяг при згині, тріщиностійкості, морозостійкості, водонепроникності, стійкості до стирання тощо. Для досягнення цих властивостей бетон армують фіброволокном.

Дисперсноармований бетон є ефективним конструкційним матеріалом, який може компенсувати основні недоліки бетону, зокрема низьку міцність на розрив і крихкість [241]. Відомо [10, 11], що руйнування цементобетону під впливом зовнішніх факторів, таких як навантаження, температура і вологість, а також агресивних середовищ відбувається шляхом утворення і поширення мікротріщин в його структурі. Крім того, використання більш щільного і компактного бетону в будівництві може підвищити його вразливість до пошкоджень. Для забезпечення довговічності бетону підвищення його тріщиностійкості має вирішальне значення. Одним з потенційних рішень є дисперсне армування волокнами. Армований фібробетон характеризується покращеними властивостями, зокрема вищою міцністю на розрив, ударною в'язкістю, тріщиностійкістю, пружністю, морозостійкістю, водонепроникністю і вогнестійкістю [209, 284, 286]. За характеристиками руйнування фіброармований бетон може бути в 15-20 разів кращим за звичайний неармований бетон. Такі бетони належать до широкого класу композитних матеріалів, які все частіше використовуються в різних галузях промисловості [152, 184].

Дисперсноармовані бетони та фібробетони становлять інтерес з огляду на їх перспективне застосування в різних конструкціях, таких як дорожні та аеродромні

покриття, стійкі до стирання і динамічних навантажень, промислові підлоги цехів, відповідальні частини систем водовідведення гідротехнічних споруд, елементи облицювання промислових і житлових будівель, залізобетонні труби та опори ліній електропередач, а також комбіновані конструкції.

Для покращення властивостей цементних бетонів до їх складу вводять дисперсне армування у вигляді різних волокон: сталевих, полімерних, поліпропіленових, сополімерних, базальтових, скляних, вуглецевих та ін. [61, 64, 108, 118, 196, 381].

Відповідно до класифікації за модулем пружності, синтетичні волокна поділяються на дві групи: низькомодульні (нейлон, поліетилен, поліпропілен, поліестер) і високомодульні (скло, вуглець). Перші мають значне відносне подовження при розриві і використовуються для досягнення вищої ударної в'язкості бетону, тоді як другі - для підвищення міцності на розрив, жорсткості та стійкості до динамічних навантажень.

Більшість синтетичних волокон хімічно стійкі до лужного середовища портландцементу. Дисперсне армування досягається за допомогою волокон, рівномірно розподілених по всій бетонній матриці. Асортимент штучних волокон широкий: від дорогих матеріалів, таких як вуглець, бор, сапфір і вольфрам, до більш доступних, таких як сталь, базальт, скло і полімер. Натуральні волокна, такі як дерево, бамбук, сизаль, джут, очерет тощо, також можуть використовуватися як армувальні матеріали, але вони поступаються за характеристиками штучним волокнам.

Розвиток теорії дисперсного армування бетонних матеріалів тісно пов'язаний з вирішенням питань в області моделювання дисперсноармованих систем (композитів), перетворення хаотичного і дискретного армування в рівномірно спрямоване, врахування напружено-деформованого стану елементів, визначення ефективної об'ємної частки волокнистого армування, що сприяє усуненню крихкого руйнування в конструкціях і підвищенню опору поширенню тріщин в бетоні, визначення здатності армованого матеріалу сприймати механічні впливи [337].

Принцип побудови дисперсноармованих композитів лежить в основі організації структури багатьох природних матеріалів. Одним з найпоширеніших композитних матеріалів є бамбук, який є одночасно легким і міцним. У бамбуку м'який компонент целюлози зміцнюється кристалами оксиду кремнію, які витягуються у вигляді ниток. Розсіяна дисперсія кристалів у матриці, а також їх адгезія та орієнтація надають композиту велику міцність і стійкість до розривів. «Чутливість» матеріалу до зовнішніх впливів значно знижується, а тісний зв'язок між кристалами запобігає утворенню в ньому тріщин під час деформації. Однак, оскільки модуль пружності кісткової тканини (21 000 МПа) практично не відрізняється від модуля пружності звичайного бетону, речовина, що нагадує кісткову тканину, не може бути корисним армуючим матеріалом для бетону. Таким чином, для створення більш міцних композицій необхідно виконати такі умови: матриця повинна бути хімічно інертною до матеріалу волокон, фібра має характеризуватись вищим модулем пружності, ніж матриця, матриця повинна мати достатньо високу міцність на зсув, слід прагнути до орієнтованого розподілу волокон у матриці (бетоні, розчині), волокна фібри повинні бути рівномірно розподілені по всій матриці, але вони не мають безпосередньо контактувати одне з одним.

За допомогою методів дисперсного армування можна отримати як спрямовану, так і довільну (вільну) орієнтацію волокон в об'ємі бетону. Єдиною довільною орієнтацією коротких волокон, яка розглядається в даному випадку, є стиснуто-довільна орієнтація, яка обмежена свободою довільної орієнтації волокон фібри в об'ємі бетону, оскільки принаймні два геометричні параметри конструктивних елементів мають обмеження за розмірами: висота і ширина для балок і довжина грані для кубів.

На ймовірність рівномірного розподілу волокон у бетонній суміші впливають численні змінні, які здебільшого залежать від співвідношення довжини і діаметру волокон, об'ємного вмісту, розміру і кількості частинок заповнювача, а також технології змішування [231].

Оскільки бетон не здатен передавати статичні зусилля волокнам, які мають

нижчі значення модуля пружності, ніж бетон, огляд експериментальних даних показує, що додавання синтетичних волокон до бетону, як правило, не має помітного впливу на міцність матеріалу на розтяг, згин або стиск при статичних навантаженнях. Таким чином, залежно від умов експлуатації конструкцій під час будівництва, монтажу та експлуатації, рекомендується використовувати синтетичні волокна. Стійкість бетону до ударних навантажень значно підвищується завдяки синтетичним волокнам. Коли в залізобетоні виникають тріщини, енергія, необхідна для його руйнування, повинна бути спрямована на висмикування волокон з бетонної матриці при швидкому прикладенні навантаження. Щоб гарантувати, що значна маса надзвичайно тонких і пластичних волокон буде витягнута з об'єму бетону за дуже короткий час дії навантаження, потрібно виконати більше роботи за цей проміжок часу. В результаті бетон, армований синтетичними волокнами, має дуже високу стійкість до ударних навантажень.

Згідно з результатами експерименту, який проводили в США, кілька груп бетонних елементів, які були армовані звичайною стержневою арматурою, і тих, що додатково містять дисперсне армування, в тому числі із сталевих фібр, синтетичних і азбестових волокон, були встановлені в епіцентр вибуху. Дослідження цих компонентів після детонації показали, що кожен вид волокон дає певний результат. Проте найкращі результати показала комбінація нейлонових ниток і сталевих волокон. Компоненти, армовані нейлоновими волокнами, зазнали найменших пошкоджень, що є типовим. Завдяки використанню волокон значно підвищилася стійкість бетону до дроблення під час вибуху, а також зменшилася швидкість розльоту осколків бетону. Бетонні елементи з дисперсним армуванням зберегли свою форму і розміри і можуть бути повністю відновлені після реставрації, елементи з простою стержневою арматурою були повністю зруйновані під час вибуху.

Погана змочуваність синтетичних волокон призводить до їх низької адгезії до цементного каменю. Тільки шляхом механічного прикріплення волокон можна забезпечити їх сумісну роботу з бетоном. Волокна зі спіральною або переплетеною

джгутовою структурою є найбільш цікавими з цієї точки зору. Чим більша відносна довжина (l/d) волокон, тим краща їх ефективність, а бетони з вмістом синтетичних волокон 0,15-0,25% за масою (0,4-0,65% за об'ємом) і довжиною 10-100 мм мають найвищі результати за міцністю.

Використання фібри в деяких випадках може зменшити потребу в арматурі. Тому дисперсне армування є популярним рішенням завдяки простоті використання [7, 139, 343]. Найпоширенішим видом фібри, яка застосовується в будівництві, є сталева [206, 219, 288]. Однак вона має певні недоліки, пов'язані з технологією виготовлення бетонних сумішей. Щоб одержати якісну бетонну суміш, необхідно рівномірно розподілити волокна по всьому об'єму бетону. Додавання сталевих фібри до суміші може призвести до злипання, утворення сталевих «їжаків», які важко розподілити і які можуть перешкоджати досягненню однорідності суміші під час перемішування. Кінашем та ін. [65] показано, що відносні деформації в піковій точці діаграми деформування сталевібробетону, армованого фіброю типу HE1050, залежать від вмісту фібри. Проте, зростання цін на звичайну сталеву арматуру на світових ринках зумовлює пошук альтернатив, які обмежують використання сталі та сталевих фібри.

У бетонних конструкціях базальтові волокна також можуть використовуватися для мікроармування. Базальтова фібра може ефективно замінити стрижневу арматуру в конструкціях перекриттів, промислових підлогах, дорожніх покриттях та у згинаних елементах. Включення базальтової фібри може ефективно протидіяти ключовим недолікам бетону, таким як низька міцність на розрив і крихкість руйнування. Використання базальтової фібри підвищує морозостійкість, жаростійкість, стійкість до стирання, вологостійкість і зменшує усадочні деформації. Крім того, значно підвищується тріщиностійкість, ударна в'язкість і діелектричні властивості [6, 9, 219]. Широке поширення базальтових родовищ по всьому світу, в тому числі значні поклади в Україні, робить використання базальтової фібри для армування бетону перспективним. Слід відзначити, що виробництво базальтових волокон зростає, тому що сировиною є широко доступні гірські породи, а формування здійснюється за аналогією із скляними волокнами -

фільтрним способом. Вони бувають у вигляді мотків, ровінгів і штапельних волокон. Залежно від родовища хімічний склад дещо може змінюватися.

Базальтова фібра ефективно знижує негативний вплив концентрації напружень в зонах зі структурними дефектами цементного каменю, підвищує міцність, деформативність і довговічність бетону [252]. Згідно з теоретичними та експериментальними дослідженнями, застосування базальтової фібри дає значний техніко-економічний ефект при дисперсному армуванні.

Для використання базальтової фібри в якості армування в бетоні, вона повинна мати хімічну стійкість в лужному середовищі бетону. Дослідження показують, що за певних умов базальтове волокно можна використовувати для армування бетону [16]. Досліджено вплив довжини базальтової фібри діаметром 16 мкм (довжина 12, 24 і 50 мм) та кількості фібри (1, 2 і 3 мас. % від маси сухої суміші) на міцність при згині дрібнозернистого бетону, армованого базальтовою фіброю. Результати свідчать, що використання базальтової фібри довжиною до 12 мм не змінює крихкого характеру руйнування бетонних призм при згині, а при вмісті такої фібри 1-2 % призводить до збільшення міцності на розтяг при згині бетону класу С16/20 в 1,2 рази. При армуванні бетону С 16/20 базальтовою фіброю довжиною 24 і 50 мм і вмістом фібри 1-3 об.% спостерігається більш пластична картина руйнування, а границя міцності бетону на розтяг при згині збільшується в 1,8-2,2 рази. Базальтові волокна мають великі перспективи як армувальний матеріал при виготовленні фібробетону для відновлення захисного шару мостових конструкцій.

Порівняно зі скловолокном, базальтові волокна демонструють більшу стійкість до кислот і лугів, низьку теплопровідність, вищу температуру застосування та відмінні фізико-механічні властивості [340]. Крім того, базальтові волокна нетоксичні. Завдяки цим характеристикам можна створювати нові високоефективні будівельні матеріали.

Вплив поліпропіленової фібри на характеристики бетону також досліджувався багатьма вченими [205, 343]. Одним з шляхів підвищення тріщиностійкості бетону є введення в бетон поліпропіленових волокон різної форми, довжини та характеристик у певних об'ємах [59]. Результати показують, що додавання

поліпропіленової фібри до бетону може підвищити його міцність на розтяг при згині і стиск на 25% і 20% відповідно, а його початковий модуль пружності на 15% нижчий, ніж у звичайного бетону. Такі бетони мають вищий рівень тріщиностійкості [59], що має вирішальне значення для забезпечення довговічності бетонних конструкцій. Згідно з дослідженнями [163, 238], армування поліпропіленовою фіброю покращує міцність, жорсткість та стійкість до розтріскування дрібнозернистого бетону. Було зафіксовано збільшення руйнівного навантаження та міцності на розтяг при згині на 6 та 14% відповідно. Фібра в бетоні замінює потребу в металевій сітці для армування основи підлоги (стяжки) за умови правильного змішування і відповідного розподілу.

Визначення оптимальної кількості поліпропіленової фібри для додавання в бетон з метою покращення його властивостей має важливе значення для ефективного використання дисперсноармованого бетону в конструкціях.

Вивчення унікальних характеристик армованого поліпропіленовою фіброю бетону має важливе значення для його застосування в будівництві аеродромів, доріг і мостів. Тому дослідження властивостей бетону, армованого поліпропіленовими волокнами, має вирішальне значення для використання цього матеріалу в майбутньому.

Вид і якість використовуваних волокон, а також співвідношення і рівень взаємодії між ними є основними факторами, що визначають ступінь позитивних змін властивостей бетону при його дисперсному армуванні і особливості роботи конструкцій на його основі [18]. Тісний взаємозв'язок армувальних волокон з цементною матрицею бетону забезпечується величиною поверхні розділу. Вона, в свою чергу, залежить від геометричних характеристик і поверхневої енергії волокон, ступеня насичення ними бетону [32]. Теоретично можна припустити, що найбільший позитивний вплив на структуру і властивості фібробетону може мати композитне дисперсне армування - поєднання двох або більше типів волокон з різним складом, розмірами, фізико-механічними і пружно-пластичними характеристиками. Метою композиційного армування є розробка матеріалу, який би позбувся недоліків класичного залізобетону, зберігаючи при цьому його

позитивні характеристики якості. Слід відзначити деякі переваги поліармування, або композитного розподіленого армування в забезпеченні більш однорідної структури фібробетону. Це, в свою чергу, створює передумови для досягнення вищих значень міцності, ніж у випадку моноармування; підвищення довговічності та експлуатаційних характеристик фібробетону; уникнення або значне зменшення розшарування фібробетонної суміші при її приготуванні, транспортуванні та укладанні; цілеспрямоване керування комплексом фізико-механічних властивостей фібробетону в більш широкому діапазоні, ніж при моноармуванні.

Аналіз літературних джерел свідчить, що застосування полідисперсного армування для покращення характеристик фібробетонних сумішей та самого фібробетону є перспективним [34, 125]. Сталеві та поліпропіленові волокна можуть бути використані для створення композитної дисперсної армованої структури, як показано в роботах [92, 337]. Відзначено, що при досягненні їх ідеального співвідношення і вмісту, композит може стати більш однорідним, відкрита пористість зменшується, а ймовірність злипання волокон під час змішування може бути усунена. В роботі [17] представлена модель багаторівневого розподіленого армування самоущільнюваного бетону. Мікроструктуру такого фібробетону формує утворення волокнисто-голчастих субмікроармуючих кристалоподібних утворень, які реалізують ефект «самомікроармування» та підвищують опір руйнуванню.

Ідея полідисперсного армування полягає в тому, що різноманітні геометричні характеристики фібри, які використовуються для цієї мети, гарантують розвиток просторових комірок на різних рівнях структури бетону. Більші комірки нашаровуються на менші, а параметри армування визначають, наскільки великими будуть структурні комірки на кожному рівні. В результаті в мікроармованій композитній матриці виявляються волокна більшого діаметру, тоді як волокна меншого діаметру розташовані в більших комірках. Оскільки мікрволокна знаходяться в зоні контакту з волокнами більшого діаметру, вони гальмують розвиток мікродефектів на стадії утворення тріщин і мінімізують концентрацію напружень, що сприяє перерозподілу мікродефектів по більшому об'єму бетону.

Міцніше зчеплення волокон більшого діаметру з матрицею в кінцевому результаті призводить до збільшення міцності композиту.

Крім цього, загальнотеоретичного підходу до структуроутворення фібробетону, який базується на класичних закономірностях композиційних матеріалів, необхідно враховувати структуроутворюючу роль бетонної матриці та значення контактної зони на межі розділу фібра-матриця, стан якої значною мірою визначає найбільш значущі характеристики дисперсноармованого бетону. На кожному структурному рівні фібробетону можна виділити дві окремі фази, які взаємодіють між собою по межі поділу через контактну зону на кожному етапі структуроутворення та подальшої роботи матеріалу. До цих фаз відноситься дисперсна фаза, що являє собою сукупність волокон певного розміру та дисперсійне середовище, яке є матрицею, завдяки якій формується структура і характеристики композиту. Структура дисперсноармованого бетону створюється термодинамічно за рахунок прагнення фаз до рівноваги шляхом зниження їх внутрішньої поверхневої енергії. Тому питання композиційного розподіленого армування фібробетону є дуже важливим.

Таким чином, актуальними з теоретичної і практичної точок зору є дослідження, спрямовані на вивчення впливу пуцоланових матеріалів, хімічних добавок-модифікаторів та армування різними видами фібри на процеси структуроутворення, властивості та тріщиностійкість бетонів з підвищеною міцністю.

1.6. Постановка проблеми, обґрунтування напрямків досліджень та наукова гіпотеза

Проблема покращення тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю

значною мірою вирішується пошуком шляхів керування структуроутворенням бетонів на різних рівнях, що визначає необхідність розроблення ефективних алгоритмів регулювання технологічними факторами. Узагальнення результатів наукових досліджень у технології бетонів свідчать, що принципово новим підходом впровадження концепції регулювання тріщиностійкості є використання прийомів направленої формування мікро-, мезо- та макроструктури бетону, внаслідок раціонального підбору пуцоланових матеріалів, добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії та полідисперсного армування фіброю різних видів. Застосування запропонованої концепції актуалізує експериментальні дослідження в цьому напрямку та відкриває шлях до розроблення наукових і технологічних засад створення бетонів з підвищеною тріщиностійкістю з необхідними показниками якості.

Детальний і всебічний аналіз наукових літературних джерел і патентних матеріалів (П.В. Кривенко, Л.Й. Дворкін, О.В. Ушеров-Маршак, А.М. Пługін, А.А. Пługін, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницький, Т.П. Кропивницька, С.Й. Солодкий, З.Я. Бліхарський, Д.А. Пługін, Г.М. Шабанова, Х.С. Соболев, У.Д. Марущак, С.М. Толмачов, І.І. Руденко, В.М. Дерев'янка, С.О. Кровяков, К.К. Пушкарьова, В.М. Вировой, І.В. Барабаш, В.І. Гоц, М.В., Суханевич, Н.С. Сторчай, О.С. Борзяк, А.В. Мішутін, В.В. Троян) та зарубіжних вчених (Z. Xu, F. Qiang, M.A. Caldarone, P.K. Mehta, A. Neville, M. Pigeon, J. Stark, P. Aitcin, E. Tunstall, T. Ley, K. Folliard, G. Gelardi, M. Collepari, Z. Sun, G.W. Scherer, L. Struble, P. Monteiro, Giergiczny, J. Malolepshy, K. Scrivener, A. Nonat, J. Plank, H. Taylor, M. Schneider, J. Stark, M. Shekarchi, N. Stevulova, B. Uzal, D. Jana, C. Bilim, R. Zollo, J. Broda) в області технологій бетонів свідчать, що особливої уваги потребує питання забезпечення необхідної тріщиностійкості та можливості її регулювання і прогнозування, будівельно-технічних властивостей та довговічності. На сьогодні міцність є основним критерієм при виготовленні бетонів. В той же час, в межах одного класу міцності бетони можуть характеризуватися різною тріщиностійкістю, що зумовлює зміну значень силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості в широкому діапазоні. У зв'язку з цим, тріщиностійкість є надзвичайно важливим

показником бетонів, тому що процес їх руйнування відбувається під дією внутрішніх та зовнішніх впливів шляхом зародження та поширення в структурі тріщин. Це має важливе значення, а особливо в конструкціях транспортної інфраструктури.

Аналіз проведених досліджень дав змогу висунути наукову гіпотезу про доцільність розроблення бетонів з підвищеною тріщиностійкістю за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях, що включає модифікування та направлене формування фазового складу цементної матриці пуцолановими матеріалами та реалізацію функції поглибленої гідrataції, використанням добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії з метою забезпечення впорядкованої структури на мікро- та мезорівнях, що разом із застосуванням комплексного дисперсного армування фіброю на макрорівні забезпечує також досягнення нормативних характеристик міцності, експлуатаційних властивостей та довговічності.

РОЗДІЛ 2. СХЕМА, ФАКТОРИ ТА МЕТОДОЛОГІЧНА БАЗА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Розроблення структурно-логічної схеми досліджень

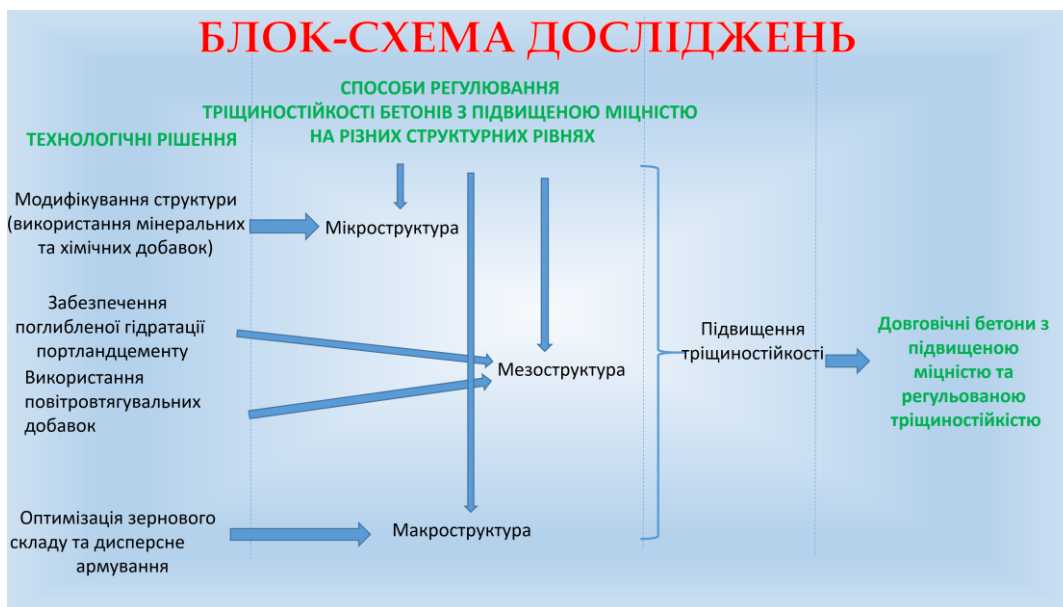
Побудова ефективної структурно-логічної схеми досліджень є однією з передумов розроблення наукових основ проектування та технології бетонів з підвищеною тріщиностійкістю. Особливості проведення досліджень базуються на принципах поліструктурної теорії, які полягають у направленому керуванні процесами структуроутворення бетонів на мікро-, мезо- та макроструктурних рівнях для одержання необхідних показників композиту, зокрема підвищеної тріщиностійкості та довговічності.

Аналітичний огляд публікацій щодо існуючих підходів підвищення тріщиностійкості бетонів з прогнозованими експлуатаційними властивостями та систематизація цих матеріалів дали можливість сформулювати науково-прикладне завдання дослідження - розроблення наукових і технологічних основ одержання бетонів з підвищеною міцністю і регульованою тріщиностійкістю із використанням системного підходу до вибору матеріалів та технологічних факторів на різних структурних рівнях, ефективність яких визначається багаторівневою оптимізацією раціонально підібраних компонентів.

Загальна блок-схема досліджень, яка розроблена внаслідок реалізації теоретичних та експериментальних робіт в межах визначеної проблеми, сформульованого об'єкта і предмета досліджень, а також послідовності вирішення поставлених завдань, представлена на рис. 2.1, а.

Розроблено алгоритм багатопараметричного проектування бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, який передбачає використання

ефективного підходу до раціонального підбору пуцоланових матеріалів, їх обов'язкове використання при застосуванні в технології бетону портландцементу типу I без мінеральних добавок [103, розділ 1]. Модифікування структури бетону добавками пластифікуюче-повітровтягувальної дії, а також дисперсне армування волокнами різних типів є важливою передумовою для забезпечення можливості регулювання тріщиностійкості бетонів (рис. 2.1, б).



а



б

Рисунок 2.1 – Загальна блок-схема досліджень (а) та алгоритм багатопараметричного проектування бетонів з підвищеною тріщиностійкістю (б)

На першому етапі досліджень обґрунтовано актуальність проблеми бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю та проведено пошук шляхів її вирішення на основі огляду публікацій за цією тематикою, що дозволило висунути робочу гіпотезу досліджень про доцільність розроблення бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю шляхом оптимізації технологічних факторів, що включають модифікування та направлене формування фазового складу цементної матриці пуцолановими матеріалами та реалізацію функції поглибленої гідратації, використання добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії з метою забезпечення впорядкованої структури на мікро- та мезорівнях, що разом із застосуванням комплексного дисперсного армування фіброю на макрорівні дає змогу досягнути нормативних характеристик міцності, експлуатаційних властивостей та довговічності.

Другий етап присвячений вибору в'язучих, пуцоланових матеріалів, хімічних добавок та різних типів фібри для дисперсного армування бетонів та вибору методів проведення досліджень. Аналіз показників якості матеріалів для бетону дозволив визначити основні компоненти, які будуть використовуватися для проектування бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю. Досліджено пуцоланічну активність пуцоланових матеріалів та вивчено вплив дисперсних волокон різних видів на властивості бетонів з підвищеною міцністю.

На третьому етапі встановлено особливості використання пуцоланових матеріалів, їх оптимальний вміст та вплив на процеси структуроутворення та властивості бетонів.

На четвертому етапі досліджень показана роль полідисперсних пуцоланових мінеральних добавок та пластифікуюче-повітровтягувальних добавок при формуванні мезоструктури бетонів з підвищеною міцністю та їх вплив на параметри тріщиностійкості.

П'ятий етап включає експериментальні дослідження, пов'язані з регулюванням параметрів тріщиностійкості при введенні дисперсних волокон різних видів, а також виявленню закономірностей процесів структуроутворення

дисперсноармованих бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.

На шостому етапі проведено дослідження силових, енергетичних параметрів тріщиностійкості та можливості їх регулювання за рахунок зміни параметрів проектування, а також довговічності розроблених бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, отриманих внаслідок прийняття раціональних технологічних рішень на мікро-, мезо- та макроструктурному рівнях, оптимізації технологічних факторів на цих рівнях. Досліджено особливості структури, експлуатаційні властивості розроблених бетонів з підвищеною тріщиностійкістю. Цей етап включає також впровадження розроблених бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю у виробництво та їх використання при зведенні різних конструкцій житлової і нежитлової інфраструктури таких як дороги та мости. Розраховано економічний ефект від впровадження бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю.

Запропонована блок-схема досліджень встановлює взаємозв'язок між технологічними факторами та формуванням властивостей бетонів підвищеної тріщиностійкості на мікро-, мезо- та макроструктурних рівнях, що дозволяє вирішувати завдання досліджень та досягнути мети відповідно до запропонованої гіпотези.

2.2. Аргументування раціонального підходу до вибору вихідних матеріалів та їх властивості

Важливу роль у забезпеченні реологічних властивостей бетонних сумішей та необхідної кінетики набору міцності, а також властивостей бетону на усіх стадіях тверднення відіграє портландцемент. Хіміко-мінералогічний склад портландцементного клінкеру є ключовим в забезпеченні цих властивостей. Для розроблення бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю використовували портландцементи загальнобудівельного призначення ПЦ І-500-Н ПрАТ "Кривий

Ріг Цемент", ПЦ І-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент» і ПЦ І-500 та ПЦ ІІ/А-Ш-500Р-Н ПрАТ «Волинь-цемент». Аналіз хімічного складу цих портландцементних клінкерів, представлений на рис. 2.2, показав, що вони відносяться до висококальцієвих. Мінералогічний склад портландцементних клінкерів коливається в межах, мас. %: C_3S – 60-62; C_2S – 14-15; C_3A – 5-7; C_4AF – 10-12, що дозволяє віднести їх до високоалітових, які характеризуються високою активністю ($R_{ct}^{28} > 50$ МПа), та дає змогу проектувати бетони з підвищеною міцністю при оптимальних витратах портландцементу.

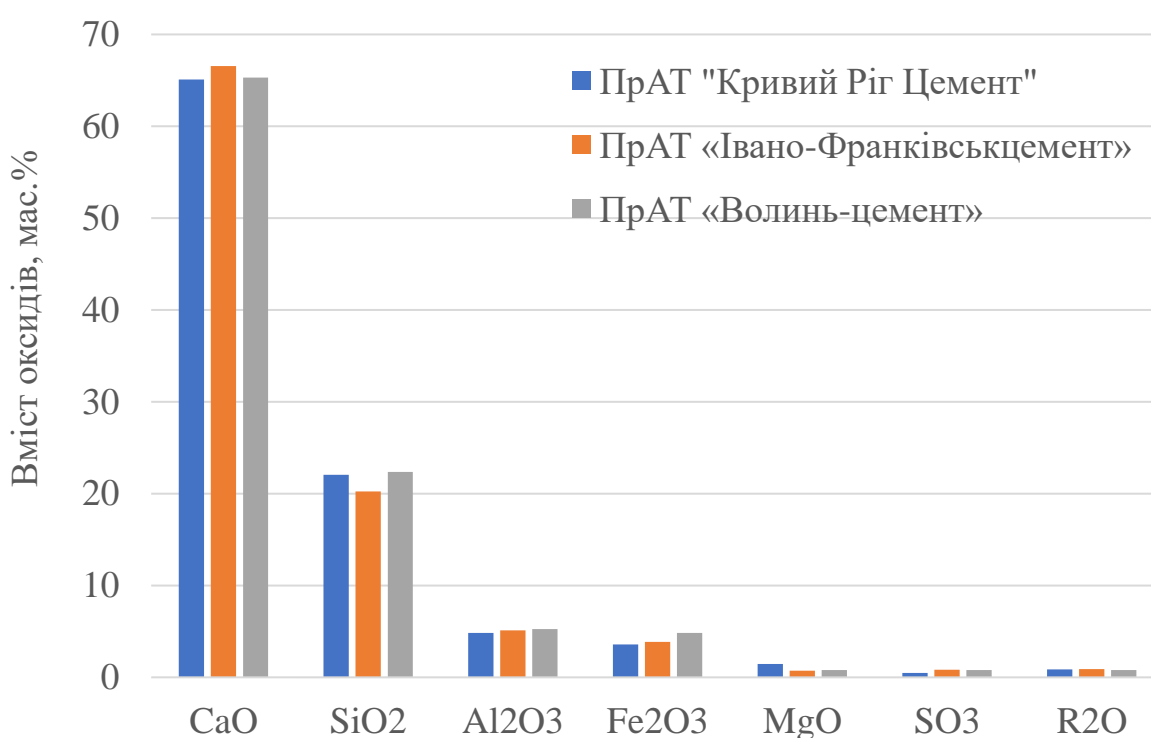


Рисунок 2.2 – Хімічний склад портландцементних клінкерів

Портландцементи, які використовували в дослідженнях, задовольняють вимоги ДСТУ Б В 2.7-46:2010 [38] за показниками тонини розмелювання, термінів тужавіння та міцності як в ранньому віці, так і через 28 діб (табл. 2.1).

Один з технологічних факторів, який дозволяє регулювати властивості бетону на мікроструктурному рівні, є введення до їх складу активних мінеральних добавок природного або техногенного походження з позитивним основним та додатковими ефектами. У дослідженнях застосовували гранульований доменний шлак, золу-винесення, цеолітовий туф (ЦТ), спучений перліт. Хімічний склад цих

матеріалів наведений на рис. 2.3.

Таблиця 2.1 - Фізико-механічні властивості портландцементів

Портландцемент	$S_{\text{пит.}}$, м ² /кг	A_{008} , %	НГТ, %	Терміни тужавіння, год-хв		Границя міцності при стиску, МПа, у віці, діб		
				початок	кінець	2	7	28
ПрАТ «Кривий Ріг Цемент»								
ПЦ І-500-Н	431	0,2	29,5	2-40	3-30	25,4	38,7	52,1
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»								
ПЦ І-500Р-Н	345	0,2	30,0	2-20	3-20	32,5	44,5	55,4
ПрАТ «Волинь-цемент»								
ПЦ І-500Р-Н	390	2,8	29,0	2-30	4-00	29,5	39,3	53,5
ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 Р-Н	395	1,8	26,5	2-30	4-00	25,0	38,7	52,5

За дисперсністю вихідна зола-винесення відноситься до класу А ($S_{\text{пит.}} > 300$ м²/кг) з питомою поверхнею 310 м²/кг і 510 м²/кг. Питома поверхня вихідного доменного шлаку становила 310 м²/кг, а домеленого 380 і 500 м²/кг.

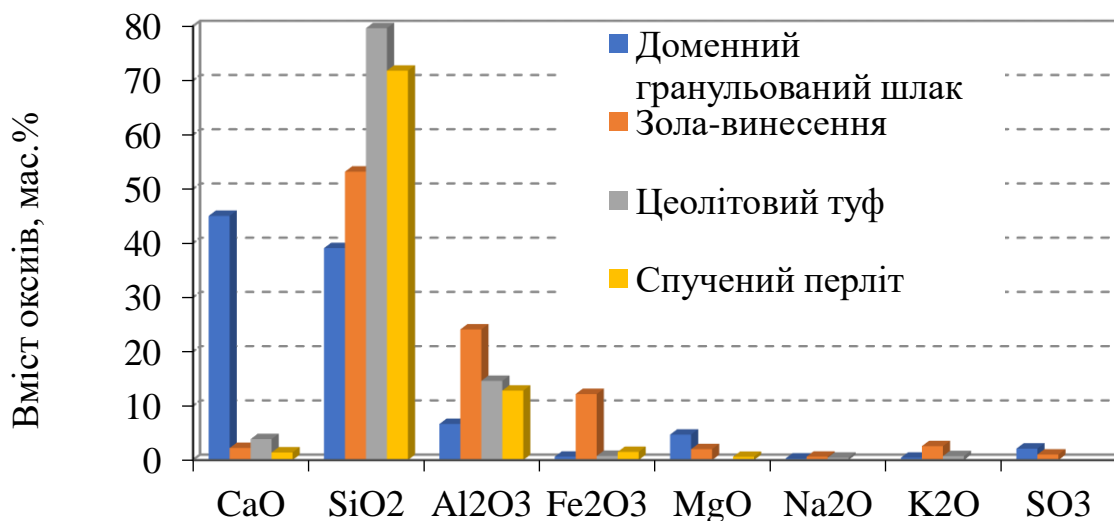


Рисунок 2.3 – Хімічний склад пуцоланових матеріалів

Серед найпоширеніших природних пуцоланових матеріалів є цеолітові туфи,

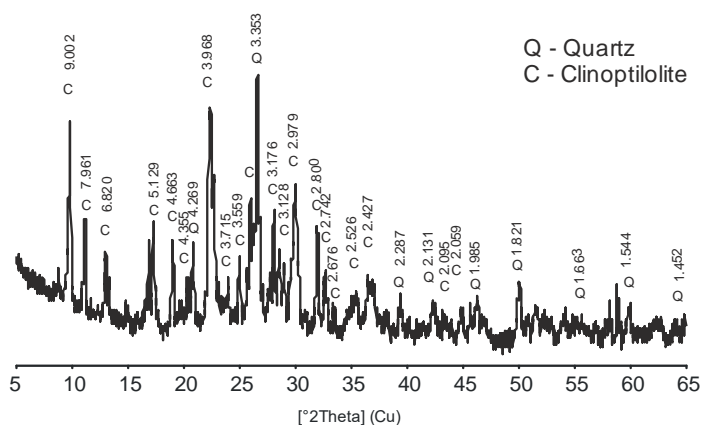
які використовуються в деяких регіонах світу через їх меншу вартість та доступність [166, 207]. Незважаючи на те, що цеолітові туфи є кристалічними, вони характеризуються необхідною пуцолановою активністю [137].

Основним цеолітовим мінералом туфу Сокирницького родовища є кліноптилоліт – 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 $0,35 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Його вміст є основним показником якості цеолітової породи (табл. 2.2).

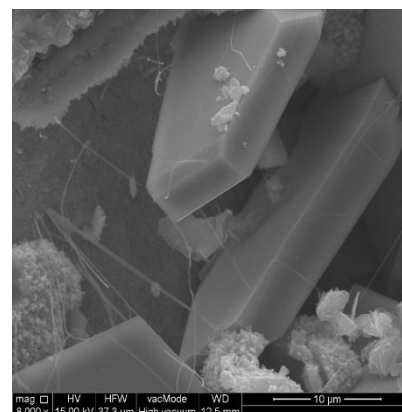
Таблиця 2.2 - Технічні характеристики цеолітового туфу

Показники	Значення
Зовнішній вигляд	сірий порошок
Вміст кліноптилоліту, мас.%	79
Середня густина, $\text{кг}/\text{м}^3$	1890
Насипна густина, $\text{кг}/\text{м}^3$	570
Фракція, мм	<1,0

Кліноптилоліт, а також незначна кількість кварцу є основними кристалічними фазами використаного в дослідженнях цеолітового туфу (рис. 2.4, а). Кліноптилоліт зустрічається у вигляді тонких пластинок 10-30 мкм, деякі мають чітку шестикутну форму (рис. 2.4, б).



(а)



(б)

Рисунок 2.4 - Дифрактограма (а) (Q: кварц, С: кліноптилоліт) і мікроструктура (б) цеолітового туфу

За даними термічного аналізу, перший ендоефект та втрата маси зразка цеолітового туфу відбувається в діапазоні температур 20 – 200 °С (рис. 2.5). Це пов'язано з виділенням «вільної» фізично - поглинутої води. Друга фаза термолізу зразка відбувається в діапазоні температур 200 - 440°С і відповідає виділенню «структурованої» хімічно зв'язаної води, яка координаційно і хімічно пов'язана з кристалічною решіткою мінералу і утворює аквакомплекси з катіонами металів, які входять до складу цеолітового туфу.

В інтервалі температур 440 - 580°С спостерігається неглибокий ендотермічний ефект, який пов'язаний з процесом дегідроксилювання поверхні за рахунок відщеплення ОН – груп, що відповідає невеликій втраті маси на кривій ТГ.

У високотемпературному діапазоні 580 - 1000°С появу ендотермічного ефекту на кривій ДТА можна пояснити поєднанням кількох процесів: більш глибокого поверхневого дегідроксилювання та руйнування кристалічної структури цеоліту під дією високих температур.

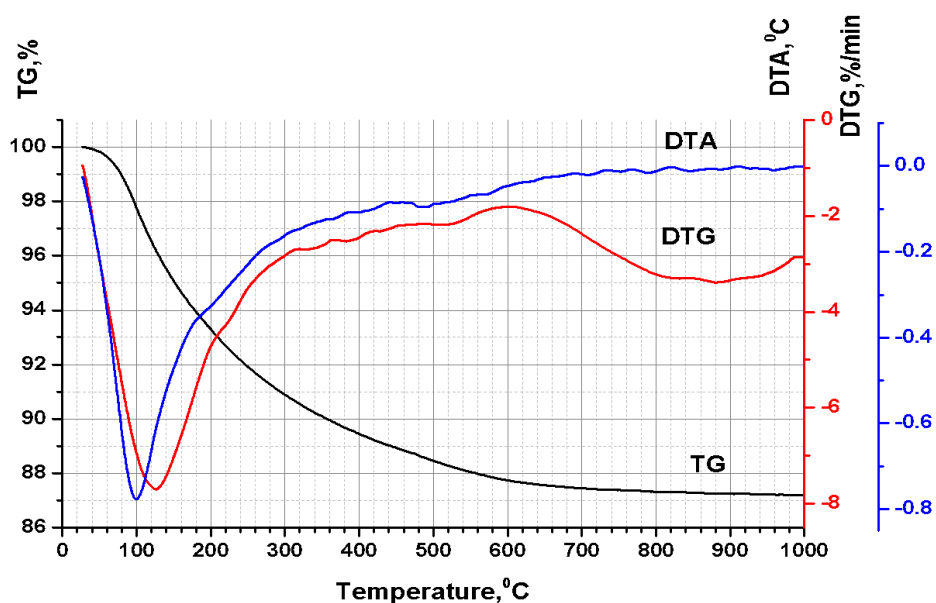


Рисунок 2.5 – Дериватограми цеолітового туфу.

Ртутну інтрузійну порозиметрію (РІП) використовували для визначення розподілу розмірів пор цеолітового туфу. Випробування проводилися в діапазоні тиску від 0,1 до 200 МПа або радіусів пор від 10,0 до $3,8 \cdot 10^{-3}$ μm . Об'єм ртуті V

$[\text{м}^3\text{кг}^{-1}]$, що проникає при заданому тиску P [Па], дає об'єм пор, до яких можна отримати доступ. Тиск проникнення було переведено на еквівалентний радіус пор R [м] за рівнянням Уошберна:

$$P = -A \sigma_m \cos\alpha_m / R, \quad (2.1)$$

де σ_m — поверхневий натяг ртуті (0,485 Н·м⁻¹), α_m — контактний кут ртуті/твердого тіла (141,3° для всіх досліджуваних матеріалів), а A — коефіцієнт форми (дорівнює 2 для передбачуваних капілярних пор). Знаючи залежність V від R , розрахований нормалізований розподіл розмірів пор, $\chi(R)$, і виражений у логарифмічній шкалі:

$$\chi(R) = 1/V_{\max} dV / d\log(R) \quad (2.2)$$

Результати РІП показують, що пористість цеолітового туфу становить 54,7%. Графічна інтерпретація отриманих результатів свідчить, що майже 65% загального об'єму пор природного цеоліту можна віднести до пор діаметром від 0,4 до 40 мкм (рис. 2.6). Що стосується кількісної оцінки, то частка дрібних пор у діапазоні 0,01–0,15 мкм відносно дуже мала в досліджуваному розмірі частинок цеолітового туфу.

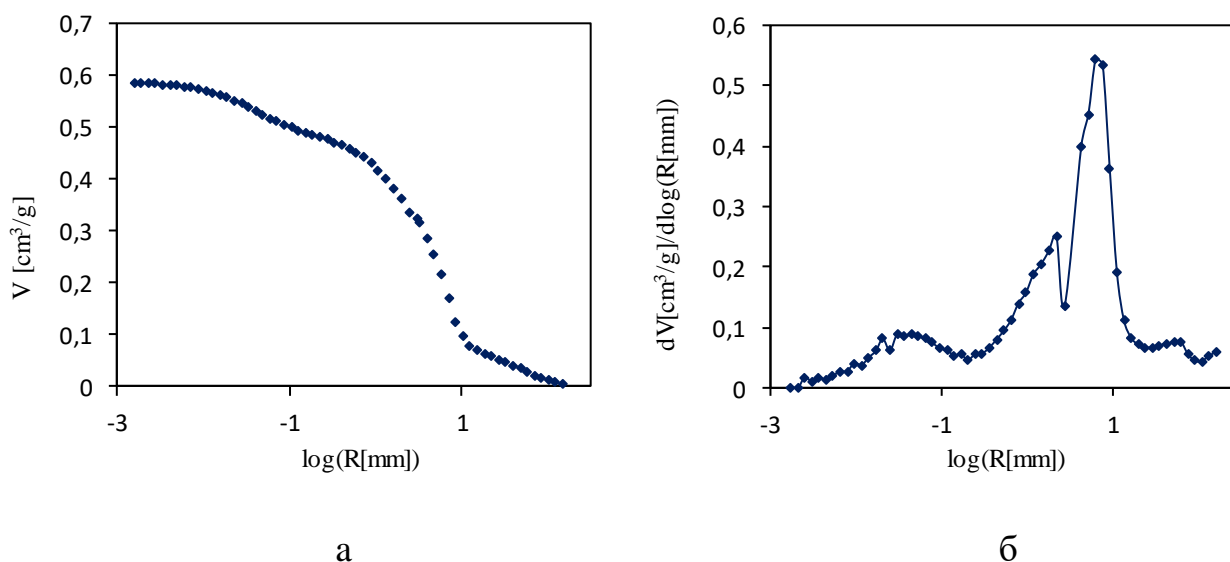


Рисунок 2.6 – Повний об'єм пор (а) і радіус пор (б) природного цеоліту

Розподіл частинок за розміром (РЧР) вимірювали методом лазерної гранулометрії на Mastersizer 2000 з дисперсійною установкою Hydro G з діапазоном

вимірювання від 0,02 мкм до 2 мм. Міє теорія була застосована для визначення РЧР з параметрами рівними 1,52 для показника заломлення світла та 0,1 для коефіцієнта поглинання. Вимірювання проводили при частоті обертання насоса та мішалки 1750 та 700 об/хв відповідно.

Бімодальна крива РЧР природного цеоліту представлена на рис. 2.7. Як свідчать результати гранулометрії, розмір частинок цеолітового туфу коливається в широкому діапазоні 0,01-2000 мкм. При цьому диференційна крива розподілу характеризується двома максимумами 25 мкм і 227 мкм. Дрібнодисперсні частинки цеолітового туфу будуть визначати пуцоланічні властивості добавки, а крупні – поглиблену гідратацію в умовах пониженого водоцементного відношення за рахунок іммобілізованої води у порах

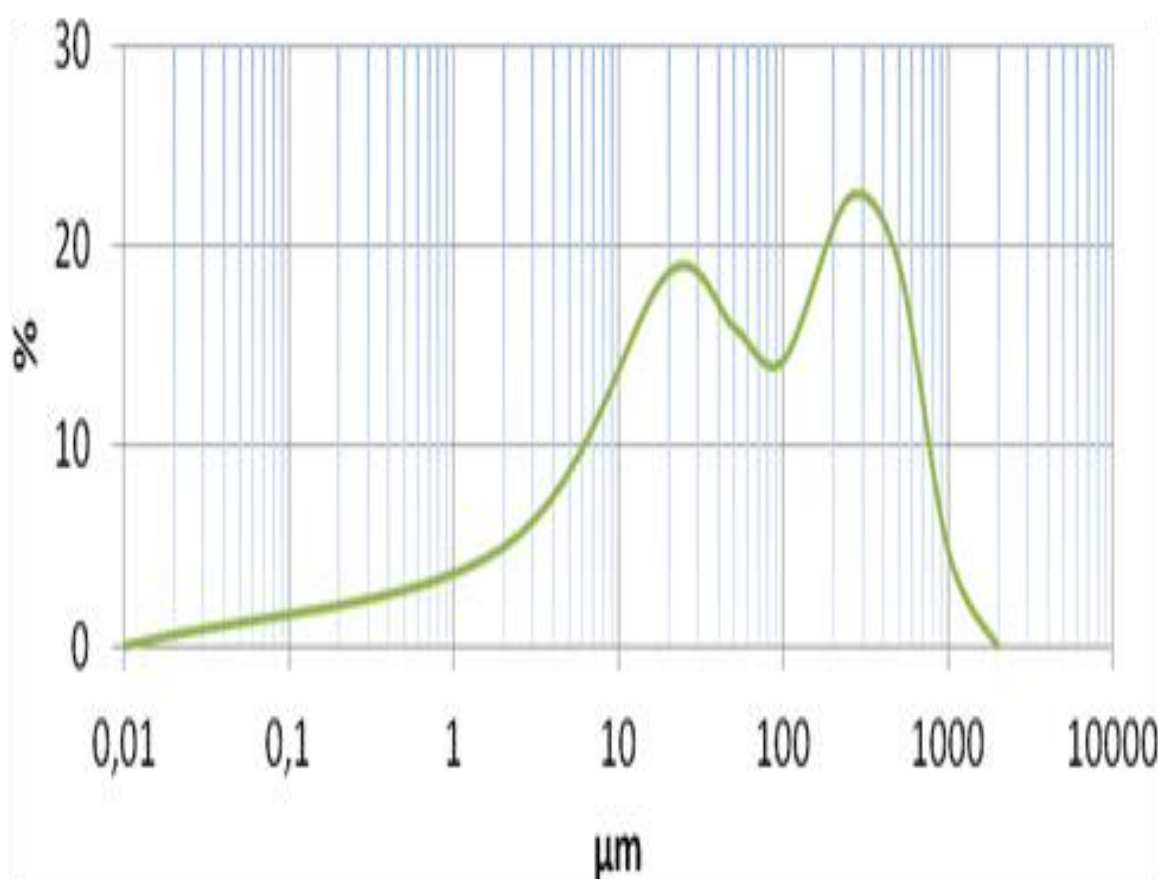


Рисунок 2.7 – Гранулометричний склад цеолітового туфу

Спучений перліт - пористий матеріал, що представлений вулканічним

лужним гідроалюмосилікатним склом. Частинки перліту внаслідок термообробки переходять у піропластичний стан, бурхливо виділяючи воду, збільшуючись в об'ємі до 20 раз, та набувають високої пористості. Проте цей матеріал характеризується відкритою пористістю і, як наслідок, значним водопоглинанням (табл. 2.3). Завдяки підвищеному вмісту активних Al_2O_3 і SiO_2 спучений перліт характеризується покращеною пуцоланічною активністю, тому є перспективною пуцолановою добавкою. За рахунок високої пористості спучений перліт має значну розмелювальну здатність.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики спученого перліту

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

У дослідженнях використовували також штучні матеріали пуцоланічної природи активності, отримані в результаті синтезу з побічних продуктів промисловості [214]. Хімічний склад синтезованих пуцоланових матеріалів наведений в табл. 2.4. За даними хімічного аналізу мольне співвідношення $Na_2O:Al_2O_3:SiO_2$ для цеоліту Na-X становить 1:2,3:6,1; для цеоліту Na-P1 – 1:1,3:4,8; для цеоліту Na-A – 1:1,9:5,8.

Встановлено, що для кожного запропонованого режиму синтезу цеолітові матеріали були отримані в продуктах реакції як основні мінеральні фази.

Дифрактограми для різних типів цеолітів наведено на рис. 2.8. Інтенсивні дифракційні піки вказують на утворення відповідного цеолітового матеріалу кристалічної структури. Наявність Na-X цеолітної фази в продуктах реакції

визначали за характеристичними лініями $d/n = 14,47; 3,81; 5,73; 8,85; 4,42; 7,54; 4,81$ і $3,94 \text{ \AA}$. Кількісний вміст цеоліту, розрахований за допомогою рентгеноструктурного аналізу, становив 70 мас.%. Наявність цеолітової фази Na-P1 в продуктах реакції визначали за лініями $d/n = 7,10; 5,01; 4,10$ і $3,18 \text{ \AA}$. Кількісний вміст цеоліту, розрахований за XRD, становив 75 мас.%.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад синтезованих пуцоланових матеріалів

Оксидний склад	Вміст, мас.%, для матеріалу		
	Na-X	Na-P1	Na-A
Na ₂ O	5,909	7,980	6,599
MgO	2,436	1,556	1,899
Al ₂ O ₃	22,658	17,843	21,897
SiO ₂	34,636	37,99	38,245
P ₂ O ₅	0,731	0,546	1,101
SO ₃	0,008	0,077	0,067
K ₂ O	0,711	1,003	1,569
CaO	9,625	13,550	9,988
TiO ₂	1,770	0,989	1,351
Fe ₂ O ₃	6,780	4,679	5,780
LOI	14,736	13,787	11,504

Наявність цеолітної фази Na-A в продуктах реакції визначали за лініями $d/n = 12,18; 8,63; 7,06; 5,47; 4,09; 3,70$ і $3,40 \text{ \AA}$. Побічні продукти реакцій синтезу включали муліт, кварц, кальцит і аморфне алюмосилікатне скло.

Розподіл частинок за розміром усіх трьох типів цеолітних матеріалів дуже подібний і характеризується мономодальним розподілом з максимумом у діапазоні від 26 до 30 мкм.

Дослідження структури кристалів дає змогу визначити, який габітус матимуть зразки певного мінералу та розрізнити отримані синтетичні цеоліти.

Залежно від типу такого цеоліту спостерігалися різні кристали. Вивчення їх морфології та габітусу дозволило ідентифікувати окремих представників цієї групи мінералів.

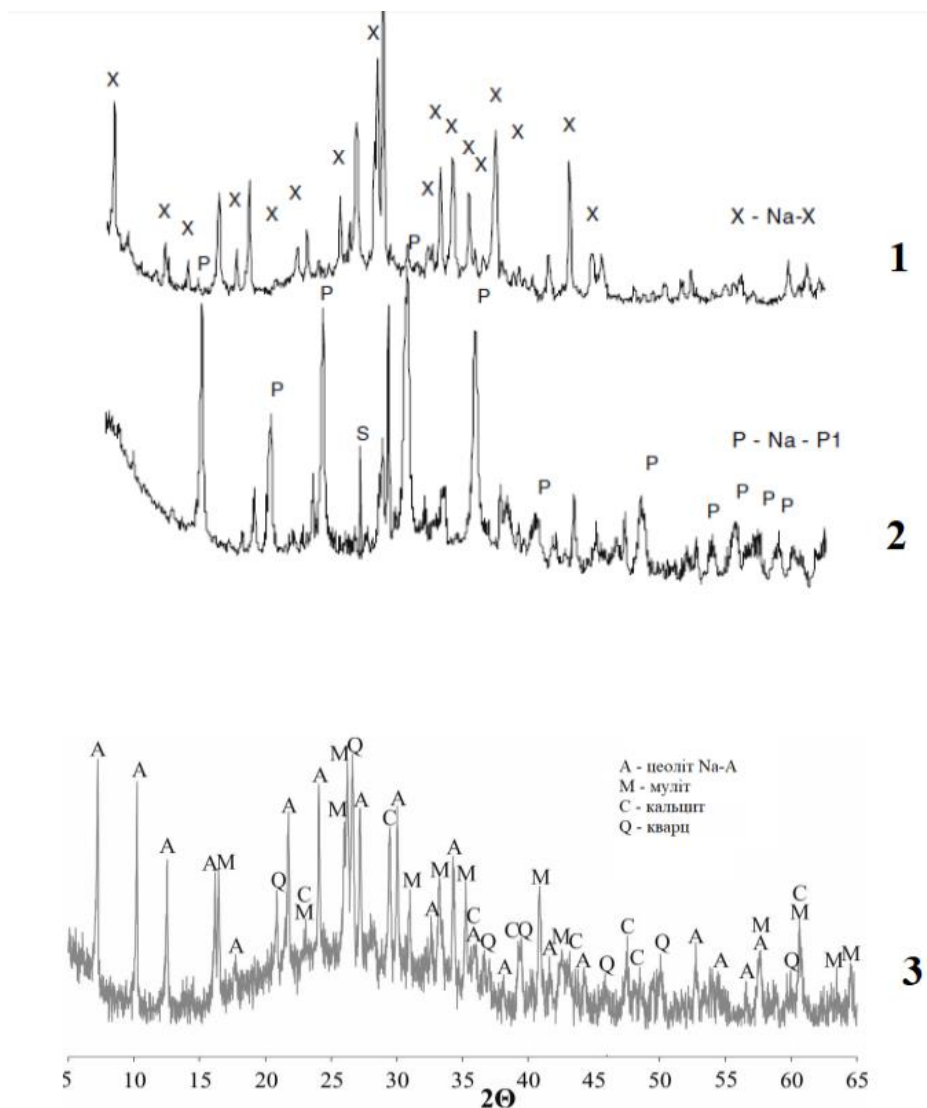


Рисунок 2.8 – Дифрактограми отриманих цеолітових матеріалів:

1 - Na-X; 2 - Na-P1; 3 - Na-A

Визначення форми зерен за допомогою SEM (рис. 2.9) показало, що синтетичний цеоліт типу Na-X складається з ізометричних і октаедричних кристалів розміром приблизно 1-2 мкм, часто зрослих один з одним. Цеоліти з такими кристалами (зростання кристалів паралельно в трьох вимірах) характерні для фожазитової групи цеолітів. Цеоліт Na-P1 утворює агрегати з пластинчастого габітусу довжиною 2–3 мкм. Такі габітуси характерні для гісмондітової групи

цеолітів. Цеоліт Na-A характеризується наявністю ізометричних октаедричних кристалів розміром 2-3 мкм, розподілених в аморфній масі.

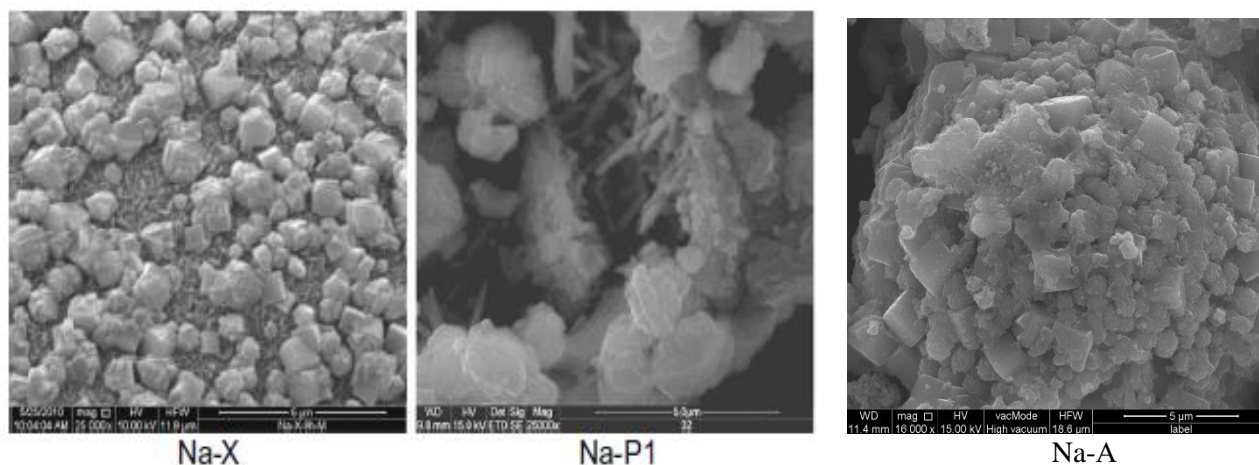
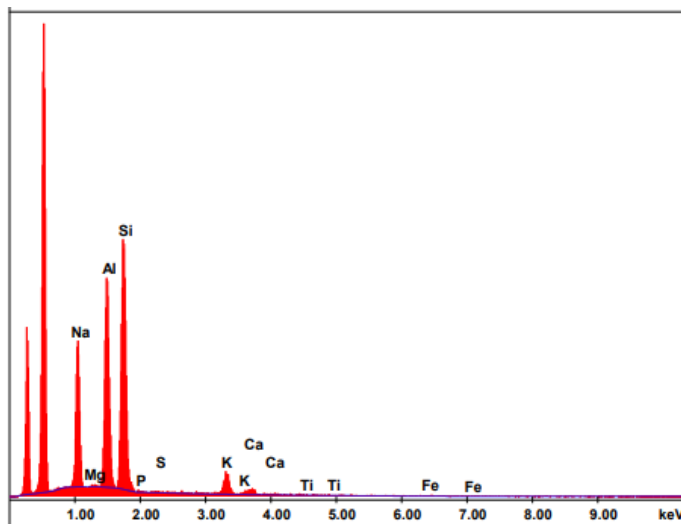


Рисунок 2.9 – Мікрофотографії отриманих цеолітових матеріалів

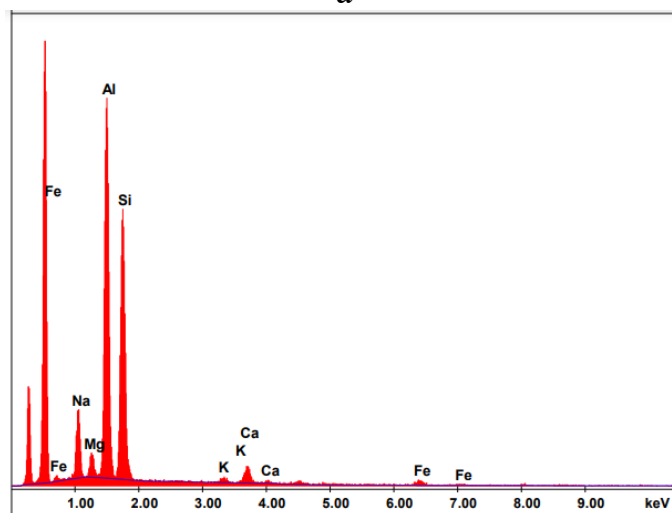
Мікрозондовий хімічний аналіз (SEM-EDS) Na-X показав, що натрій є основним катіоном обміну в структурі, збалансовуючи заряд алюмосилікатної решітки (рис. 2.10, а). Середні співвідношення окремих катіонів, отриманих з мікрохімічного аналізу EDS, такі: $\text{Na}+\text{K}/\text{Si} = 0,55$, $\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}/\text{Si} = 0,60$, $\text{Na}+\text{K}/\text{Si} = 0,65$, $\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}/\text{Si} = 0,79$ та $\text{Si}/\text{Al} = 1,12$. Для Na-P1 натрій також є основним катіоном обміну, збалансовуючи заряд алюмосилікатної решітки (рис. 2.10, б). Середні співвідношення окремих катіонів з мікрохімічного аналізу EDS такі: $\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}/\text{Si}=0,44$, а $\text{Si}/\text{Al}=1,42$. Середні співвідношення окремих катіонів для цеоліту Na-A, отриманих з мікрохімічного аналізу EDS, такі: $\text{Na}+\text{K}/\text{Si}=0,19$; $\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg}/\text{Si}=0,27$ та $\text{Si}/\text{Al}=1,75$ (рис. 2.10, в).

Аналіз результатів текстури Na-X показує значне збільшення питомої поверхні порівняно із золю-винесення, з якої він отримується. Питома поверхня за методом BET у відношенні до золи-винесення зросла приблизно з 10 до $166 \text{ м}^2/\text{г}$ для Na-X. Практично всі текстурні параметри (об'єм V_{mic} та площа S_{mic} мікропор, об'єм V_{mes} мезопор та питома поверхня S_{BET} за методом BET) показують чітке зростання порівняно з текстурними даними золи-винесення. Для цеоліту Na-P1

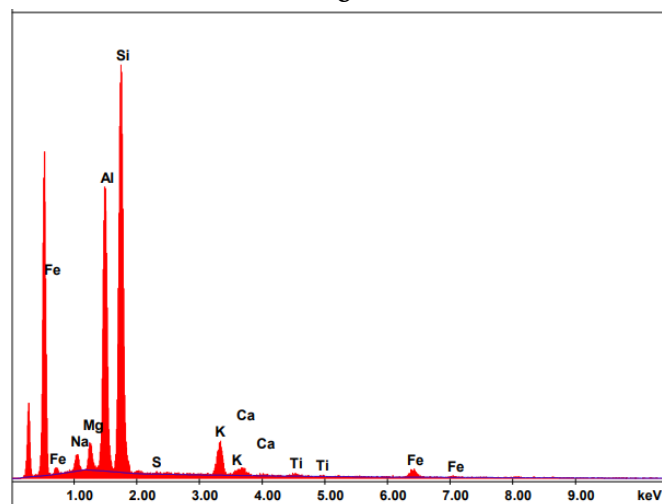
питома поверхня становить $71 \text{ м}^2/\text{г}$.



а



б



в

Рисунок 2.10 – Мікрозондовий хімічний аналіз цеолітових матеріалів: а - Na-X; б - Na-P1; в - Na-A

Розподіл розмірів пор в діапазоні від 1,7 до 100 нм визначали на основі

рівняння Барретта-Джойнера-Халенда. Для Na-X переважають пори з діаметром у діапазоні від 3,3 до 4,7 нм, з максимальною кількістю пор з діаметром приблизно 3,8 нм. Середній діаметр пор, визначений на основі десорбції азоту, становить приблизно 7,4 нм. Розподіл розмірів пор для Na-P1 показує переважання пор з діаметром приблизно 3,8 нм, а середній діаметр пор - приблизно 9,0 нм.

Описаний синтез цеолітових матеріалів дозволяє використовувати значний об'єм відходів ТЕС, зокрема золи-винесення. Отримані цеоліти мають подібні до комерційно доступних синтетичних цеолітових продуктів поверхневі параметри. Крім того, виробництво цеоліту із золи-винесення є економічно вигідним порівняно з цеолітами, синтезованими з використанням інших матеріалів, таких як перліт [345], каолінит [220] та іліт-сметит [142]. Наприклад, виробництво Na-X та гідроксисодаліту з метакаолініту вимагає високої температури кальцинування каолініту (650 °C) та подальшого гідротермального синтезу при 68 °C [220]. Чистий цеоліт з групи фаужаситу отримують синтезом з перліту [230, 345]. Ще однією перевагою описаних цеолітів є їхній вміст у кінцевих твердих речовинах, для Na-X становить 70 мас. %, а Na-P1 - 75 мас. %. Тоді як у цеолітах, отриманих з іліт-сметиту, їхній вміст у кінцевих продуктах становить 47–58 мас. % для Na-P1 [142].

Для встановлення можливості використання синтезованих штучних цеолітових матеріалів, отриманих з золи-винесення, необхідно дослідити їх пуцоланову активність, що визначатиме кількість їх введення в цементні системи та бетони. Для порівняння властивостей синтетичних цеолітів Na-X, Na-P1 та Na-A використано синтетичний пуцолановий мезопористий кремнеземистий матеріал MCM-41.

Вміст SiO₂ у MCM-41 становить 98,91 % (табл. 2.5), що підтверджується результатами мікрозондового аналізу (рис. 2.11, в).

Таблиця 2.5 – Хімічний склад MCM-41

Мінеральний компонент	Вміст оксидів, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	ВПП
MCM-41	98,91	0,69	0,05	0,02	0,0	0,02	0,29

Дифрактограма (рис. 2.11, а) підтверджує аморфність отриманого продукту. Згідно з результатами електронної мікроскопії для частинок МСМ-41 характерна видовжена форма з аморфізованою поверхнею завдовжки 2-3 мкм, спостерігаються також округлі зерна розміром 0,5 мкм (рис. 2.11, б).

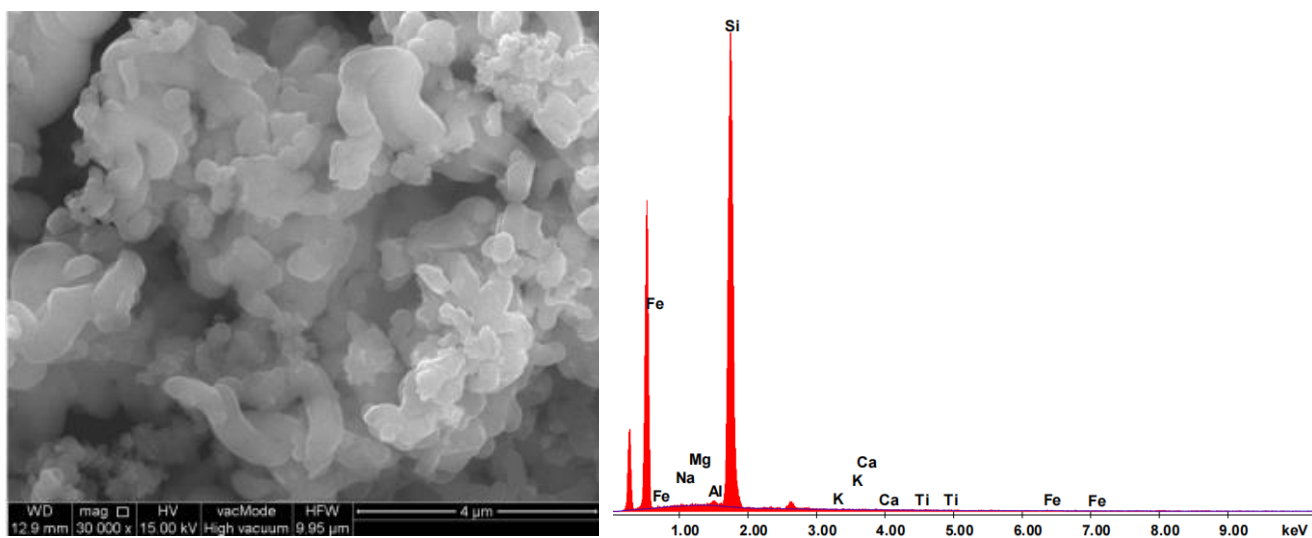
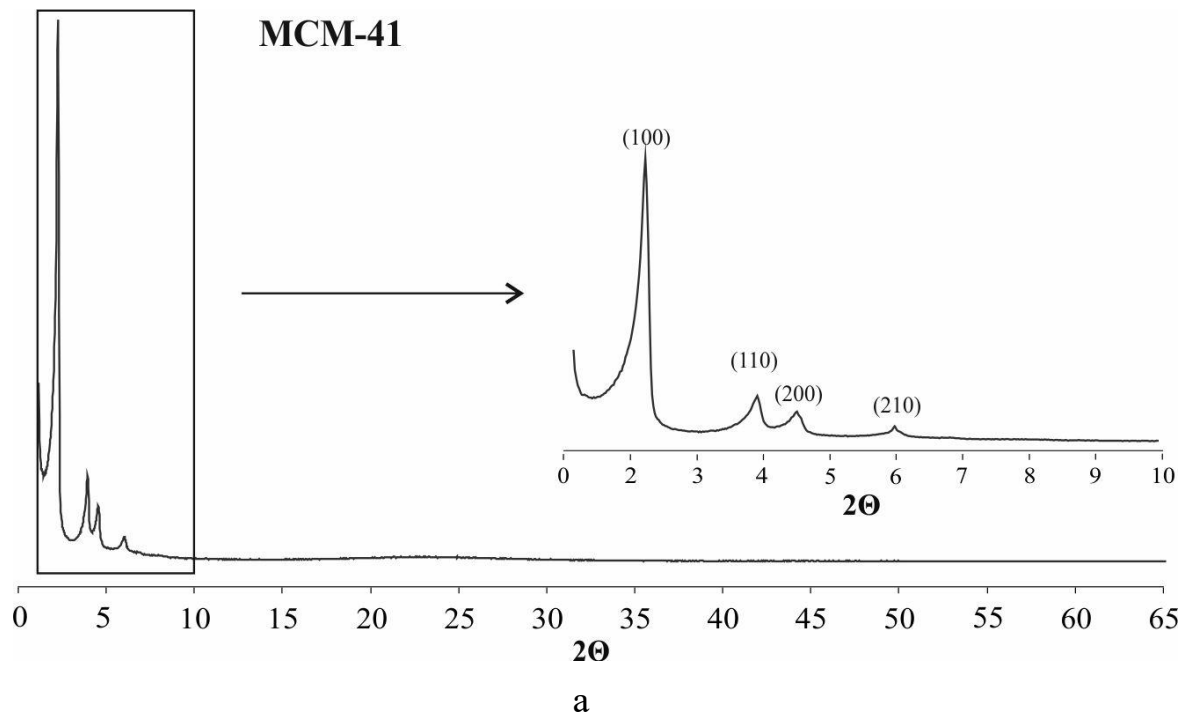


Рисунок 2.11 – Дифрактограма (а), мікрофотографія (б) та мікрозондовий аналіз (в) МСМ-41

Ефективність використання пуцоланових матеріалів в технології бетонів визначається активністю, яка залежить від їх походження, природи та складу.

Активність цих матеріалів зумовлена здатністю взаємодіяти з продуктами гідратації портландцементу, в першу чергу з кальцієм гідроксидом, з утворенням нових гідратних фаз. При цьому ступінь цієї взаємодії пов'язується із вмістом активного SiO_2 в матеріалі. В той же час, при їх використанні необхідно враховувати, що основний фактор, який обмежує вміст - гранично допустиме зниження міцності, а особливо в ранньому віці. Хіміко-мінералогічний склад і природа визначає їх вплив на властивості як бетонних сумішей, так і бетонів.

Залежно від природи і складу пуцоланових матеріалів, їх активність зумовлюється наявністю аморфного SiO_2 та хімічно і термодинамічно нестійких фаз, а здатність вступати в хімічну взаємодію визначається типом портландцементу та хімічними добавками, які використовуються в бетоні.

В технології бетонів з підвищеною міцністю більш доцільним і ефективним є використання мінеральних добавок, які володіють крім основного (гідралічна (ГДШ) і пуцоланічна (ЗВ, різні штучні цеоліти) активність), ще й позитивним додатковим ефектом (табл. 2.6), а саме доменний гранульований шлак (незначні пуцоланічні властивості), зола-винесення (покращення пластичності суміші (ефект роликотидшипниика)), цеоліти (ефект поглибленої гідратації та зменшення водовідділення сумішей).

Слід відзначити, що основною реакцією будь-якого додаткового цементуючого матеріалу з пуцолановими властивостями є взаємодія SiO_2 або $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ з іонами OH^- , які в подальшому приєднуються до силіцію або інших атомів, утворюючи каркас, з подальшим руйнуванням зв'язків між ними і атомами кисню.

За результатами досліджень пуцоланової активності пуцоланових матеріалів – побічні продукти промисловості (гранульований доменний шлак, зола-винесення), природного (цеолітовий туф), а також синтетичних матеріалів (Na-P1, Na-X, Na-A, MCM-41) за здатністю поглинати CaO з його насиченого розчину встановлено, що показники активності синтетичних матеріалів перевищують активність відходів промисловості та природного цеоліту (рис. 2.12). Кінетичні залежності зв'язування кальцію оксиду мінеральними добавками описуються лінійною залежністю виду $y=kx+b$ з величиною апроксимації $R^2=0,952\text{--}0,992$.

Вільний член прямої свідчить про інтенсивність поглинання СаО добавками у початковий період, а кутовий коефіцієнт про швидкість зв'язування вапна. Як свідчать результати досліджень, вищою активністю за зв'язуванням СаО у ранній період характеризуються синтетичні цеоліти Na-P1 та Na-X з показником b 21,004 та 16,739 відповідно, тоді як для цеолітового туфу він знижується до 13,821. Вищі значення кутових коефіцієнтів кінетичних прямих зв'язування СаО вказують на більшу активність синтетичних цеолітів Na-P1 ($k=9,402$) та Na-X ($k=7,771$) порівняно з природним цеолітом ($k=6,8325$).

Таблиця 2.6 – Позитивні ефекти при використанні мінеральних добавок

Активна мінеральна добавка	Основний ефект	Додаткові ефекти
Гранульований доменний шлак	Приховані гідравлічні властивості	Забезпечення додаткових пуцоланічних властивостей, підвищення корозійної стійкості
Зола-винесення	Забезпечення пуцоланічних властивостей (активність (взаємодія з Са(ОН) ₂) та міцність)	Покращення пластичності суміші, підвищення корозійної стійкості
Природні пуцолани (цеолітовий туф)		Забезпечення поглибленої гідратації, зменшення водовідділення суміші, підвищення корозійної стійкості
Штучні пуцолани (цеоліти)		Забезпечення поглибленої гідратації, зменшення водовідділення суміші, підвищення корозійної стійкості

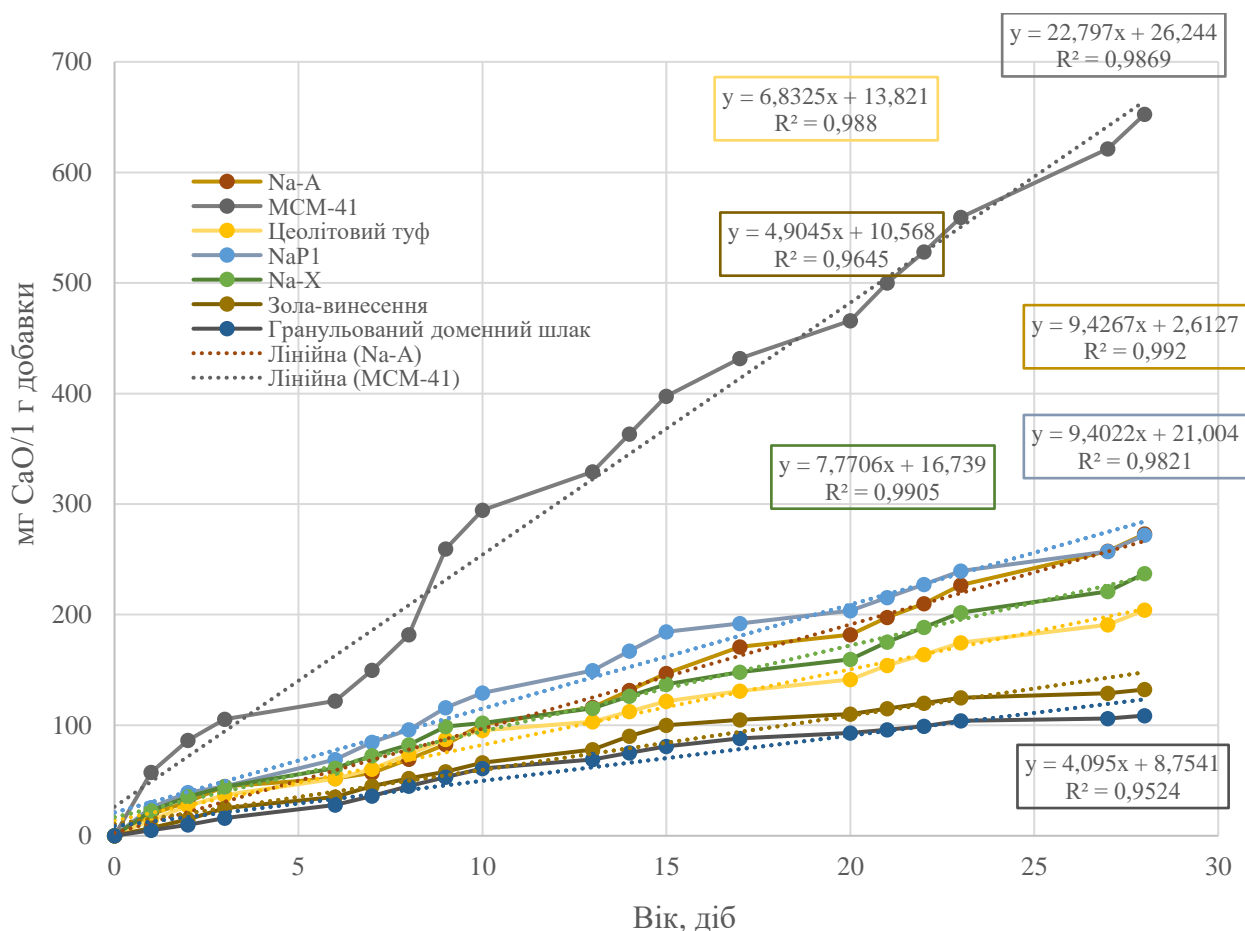


Рисунок 2.12 - Активність пуцоланових матеріалів
(за поглинанням СаО з насичених розчинів протягом 28 діб)

Результати дослідження кінетики зв'язування вапна цеолітом Na-A та цеолітовим туфом свідчать, що активність зв'язування СаО у ранній період для синтетичного цеоліту Na-A є нижчою $b=2,6127$ порівняно з цеолітовим туфом, для якого показник $b=13,821$. У той же час, швидкість зв'язування СаО добавкою Na-A є вищою порівняно з цеолітовим туфом, на що вказує більший кутовий коефіцієнт $k=9,4267$. Слід відзначити, що швидкість зв'язування вапна добавкою MCM-41 істотно зростає порівняно з природним цеолітом та цеолітом Na-A, при цьому інтенсивність зв'язування виражена кутовим коефіцієнтом становить $k=22,797$, а інтенсивність зв'язування СаО за показником b – 26,244.

Оцінку пуцоланової активності досліджуваних добавок за абсолютними показниками у мг СаО, поглинутого 1 г добавки проведено через 2, 7 та 28 діб, які є визначальними при встановленні активності портландцементів. Так, кількість

зв'язаного кальцію оксиду з вапняного розчину добавками синтетичних цеолітів Na-P1 та Na-X через 2 доби становить відповідно 39,3 та 35,3 мг/г. Найнижчим значенням кількості поглинутого CaO характеризується гранульований доменний шлак – 10,0 мг CaO. Через 2 доби кількість зв'язаного оксиду кальцію з вапняного розчину синтетичним цеолітом Na-A становить 30,8 мг/г, що перевищує показник цеолітового туфу у 1,1 рази. Добавка МСМ-41 характеризується підвищеною активністю і через 2 доби кількість зв'язаного кальцію оксиду становить 86,3 мг/г. Через 7 діб взаємодії пуцоланова активність природного та синтетичних цеолітів Na-P1 та Na-X коливається в межах 60,4–72,5 мг CaO/г. У той час, як добавка МСМ-41 характеризується найвищими показниками пуцоланової активності 149,7 мг CaO/г.

Через 28 діб активність досліджуваних матеріалів становить 204,2; 271,9 та 237,2 мг CaO/г для цеолітового туфу, цеоліту Na-P1 та Na-X відповідно. Тоді як для добавок Na-A та МСМ-41 пуцоланова активність через 28 діб становить 273,0 та 652,6 мг CaO/г відповідно.

Як видно з рис. 2.12 показники активності залежать від природи і виду матеріалів. Так, з використаних побічних продуктів зола-винесення більш активно поглинає кальцію оксид, ніж гранульований доменний шлак. Серед досліджених пуцоланових матеріалів мезопористий кремнеземистий матеріал МСМ – 41 характеризується найбільшою активністю по поглинанню CaO (652,6 мг/г), яка відповідно в 3,2 та 4,9 рази більша ніж цеолітового туфу (204,2 мг/г) та золи-винесення (132,3 мг/г).

Враховуючи, що мінеральні добавки в портландцементі проявляють пуцоланічні властивості не тільки через взаємодію з Ca(OH)₂, їх активність досліджувалась також за ДСТУ EN 450-1:2019 на зразках 40x40x160 мм (склад Ц:П = 1:3) із заміною частини портландцементу ПЦ I-500 на цеолітові матеріали. Заформовано 5 складів цементно-піщаних сумішей: контрольний, що містив портландцемент ПЦ I, склад із заміною 25 та 10 мас.% ПЦ I на Na-X, та із заміною 25 мас.% цементу на цеоліт Na-P1. Склад та властивості розчинових сумішей наведено в табл. 2.7.

Результати визначення розпливу конуса вказують, що введення цеолітових матеріалів до складу розчинових сумішей суттєво знижує їх рухливість. Так, склад з вмістом 25 мас.% Na-X показав на 48% нижчу рухливість порівняно з контрольним складом, що може бути пов'язано із значною питомою поверхнею даного синтетичного цеоліту. Оскільки це може обмежити ефективність його практичного застосування, також формували зразки із заміною 10 мас.% портландцементу на цеолітовий матеріал Na-X.

Таблиця 2.7 – Склад та властивості розчинових сумішей 1:3

Назва	Вміст компонентів в'язучого, мас.%				Розплив конуса, мм
	ПЦ І-500	Цеолітовий туф	Na-X	Na-P1	
Контрольний	100	-	-	-	210
25 мас.% ЦТ	75	25	-	-	175
25 мас.% Na-X	75	-	25	-	110
25 мас.% Na-P1	75	-	-	25	162
10 мас. % Na-X	90	-	10	-	140

Результати визначення міцності на згин показали (рис. 2.13), що через 7 діб зразки з вмістом природного та синтетичного цеоліту Na-X характеризуються на 22-40% нижчою міцністю, що пов'язано з меншою швидкістю протікання пуцоланічних реакцій у розчинах з цими добавками. Проте міцність на згин розчину з вмістом Na-P1 становить 9,67 МПа, що відповідає значенням контрольного складу.

У віці 14 діб, значення міцності на згин зразків з 25 мас.% ЦТ та 25 мас.% Na-X є суттєво нижчими, ніж контрольного складу. Водночас, міцність на згин складів з 25 мас.% Na-P1 та 10 мас.% Na-X є на 16 і 10 % вищими відповідно за показники контрольного складу.

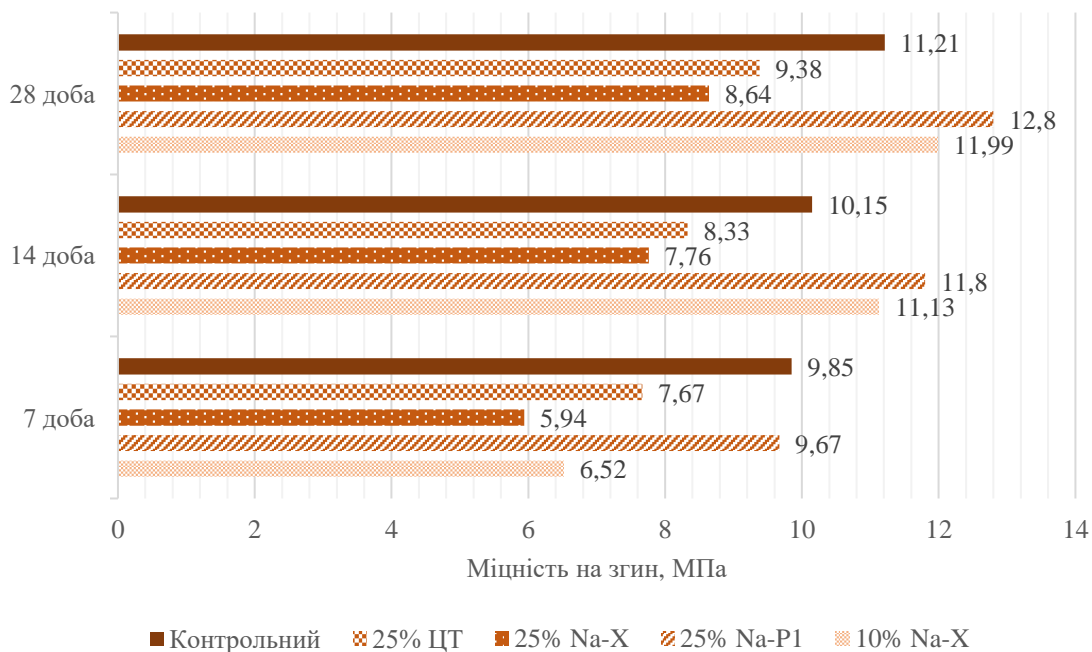


Рисунок 2.13 – Міцність цементно-піщаних розчинів на згин

Значення міцності на стиск досліджених розчинів (рис. 2.14) контрольного складу і з вмістом 25 мас.% добавок у віці 7 днів знаходяться у межах 5,9-11,7 МПа, проте склад з 10 мас.% Na-X характеризувався міцністю 32,8 МПа, що майже у 3 рази перевищує міцність контрольного складу.

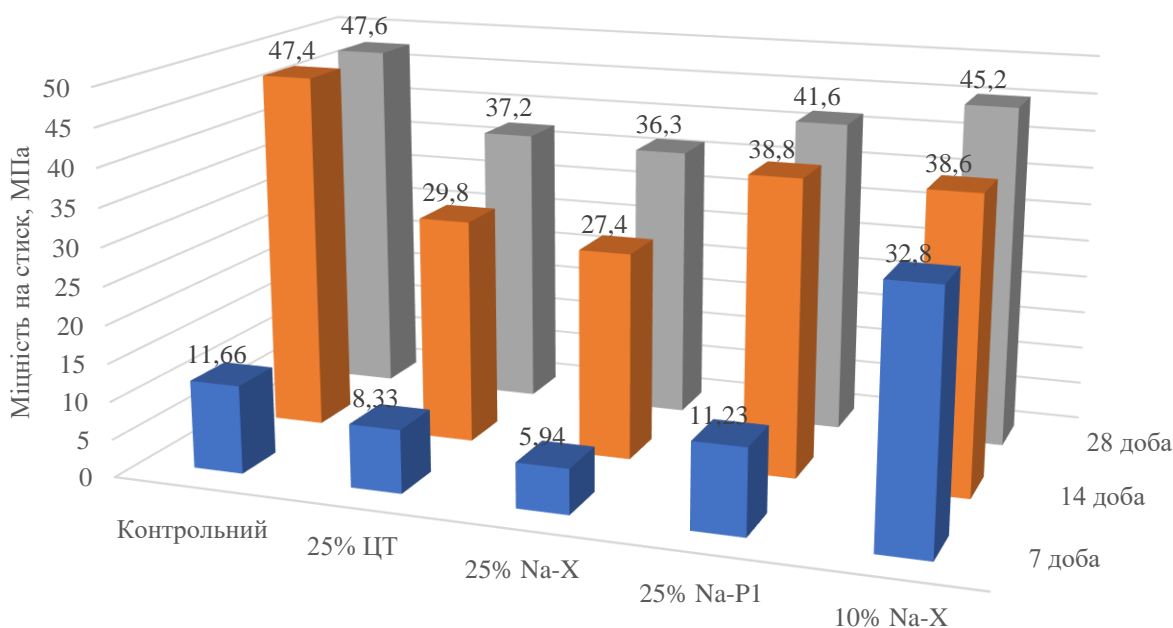


Рисунок 2.14 – Міцність цементно-піщаних зразків на стиск

Як видно з результатів розрахунку коефіцієнтів пуцоланічної активності за міцністю на стиск та згин, досліджені цеолітові матеріали відповідають вимогам, згідно з якими через 28 діб тверднення значення коефіцієнта пуцоланічної активності на стиск повинно $K_{\text{пуц}}^{28} \geq 0,75$ (рис. 2.15).

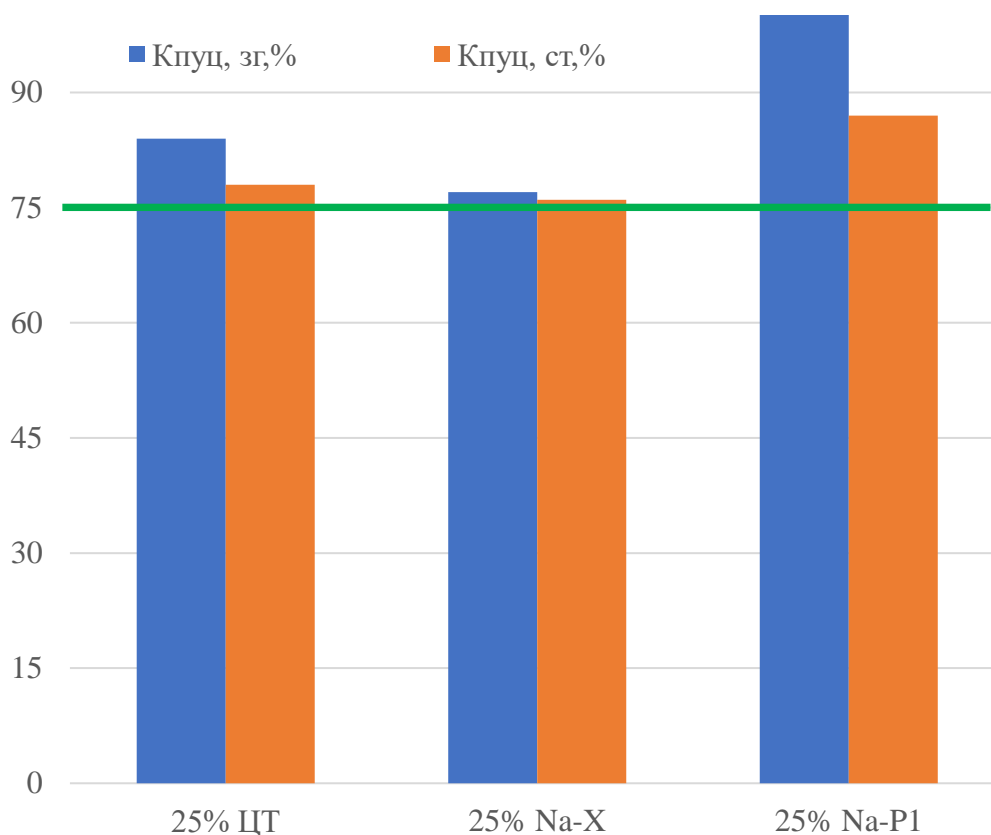


Рисунок 2.15 – Коефіцієнти пуцоланічної активності на згин і стиск

Найвищими значеннями пуцоланової активності за міцністю на стиск та згин характеризується Na-P1 ($K_{\text{ст}}=87\%$ та $K_{\text{зг}}=114\%$), що корелює з результатами пуцоланічної активності за кількістю поглинутого СаО. Слід відзначити більше зростання міцності на згин, порівняно з міцністю на стиск при введенні цеолітових матеріалів. Згідно одержаних результатів досліджень встановлено, що за здатністю поглинати СаО з його насиченого розчину мінеральні добавки можна розмістити в такому порядку за зростанням: гранульований доменний шлак → зола-винесення → природні цеоліти → штучні цеоліти.

Дисперсне армування бетонів фіброю (сталевою, поліпропіленовою,

скловолоконною та базальтовою) є одним з основних шляхів підвищення тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю, які мають більш крихкий характер руйнування внаслідок формування щільної структури.

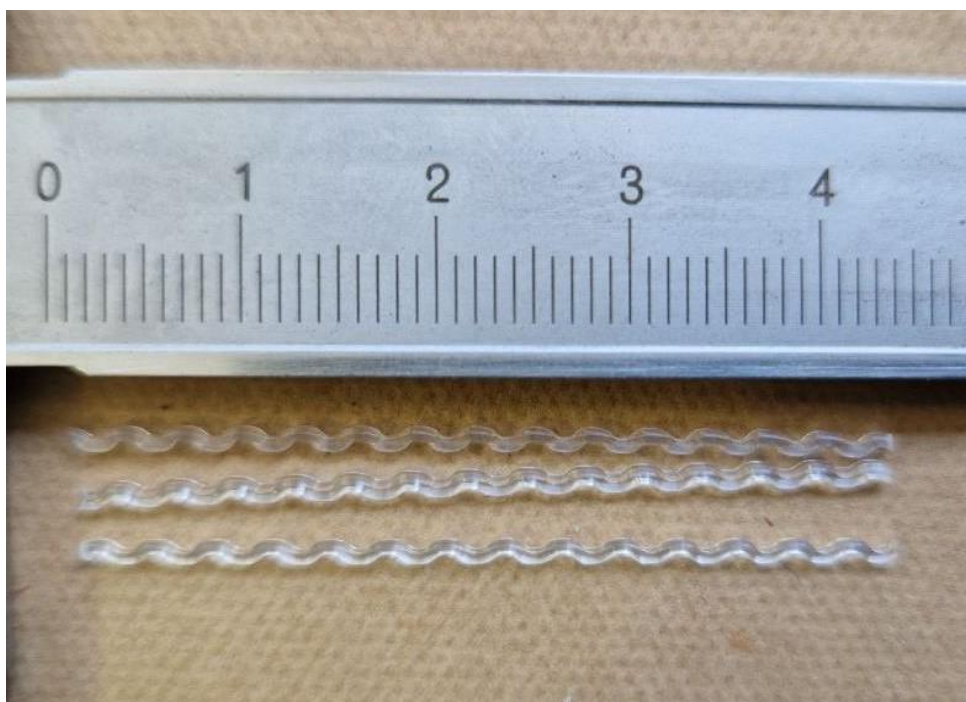
Волокна з деформованою поверхнею використовували для покращення зчеплення полімерне волокно-бетон, оскільки механічне зчеплення звичайного волокна з цементною матрицею відносно слабке. Властивості різних типів фібр наведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 - Характеристика різних типів фібр

Найменування фібри (довжина/діаметр фібри, мм)	Фізико-механічні властивості фібри					
	Назва матеріалу	Температура плавлення, °С	Густина, г/см ³	Механічна міцність, МПа	Міцність на розрив, МПа	Модуль пружності, МПа
ФПП1 (12/0,019)	поліпропілен	149	0,96	2586	2890	120
ФПП4 (19/0,4)						
ФПДП2 (45/0,8)						
ФПП3 (54/0,069)						
ФМ (52/1,0)	сталь	1500	7,74	1779	1420	200
ФБ1 (24/0,017)	базальт	1500	2,65	4100	6240	120
ФБ2 (50/0,017)						

Примітка. ФПП - фібра поліпропіленова пряма, ФПДП – фібра з деформованою поверхнею, ФМ - фібра металева, ФБ - фібра базальтова.

У роботі використано прямі поліпропіленові, базальтові мікрволокна та волокна з деформованою поверхнею для поліпшення деформаційних характеристик бетону (рис. 2.16).



а



б

Рисунок 2.16 – Поліпропіленові волокна: а) волокна з деформованою поверхнею; (б) прямі мікрволокна

Для оцінки ефективності фібри для дисперсного армування запроєктовано бетони з номінальним складом Ц:П:Щ=1:2,23:3,19 при В/Ц=0,44 та витраті

портландцементу 350 кг/м^3 , марка бетонної суміші за осадкою конуса - S1. Різні види фібри використовували для дисперсного армування [273]. Прийнято такі умовні позначення серій бетонів (витрата фібри, кг/м^3 бетонної суміші) залежно від фібри, яка використовувалася: БФ – без армування; ФПП1(0,9), ФПДП2 (5,0), ФПП3 (1,0), ФПП4 (0,9); ФБ1 (1,0), ФБ2 (1,0); ФМ (20,0).

Основною метою дисперсного армування є зміцнення бетону, головним чином, за рахунок зростання міцності на розтяг при згині [117, 273]. Результати проведених досліджень свідчать, що вищими показниками міцності при згині (рис. 2.17) на 1,4 і 11,3% порівняно з бетоном без фібри характеризуються фібробетони серії ФПП1 та ФПДП2 з фібрами відповідних розмірів, які і використовувалися в подальших дослідженнях [117].

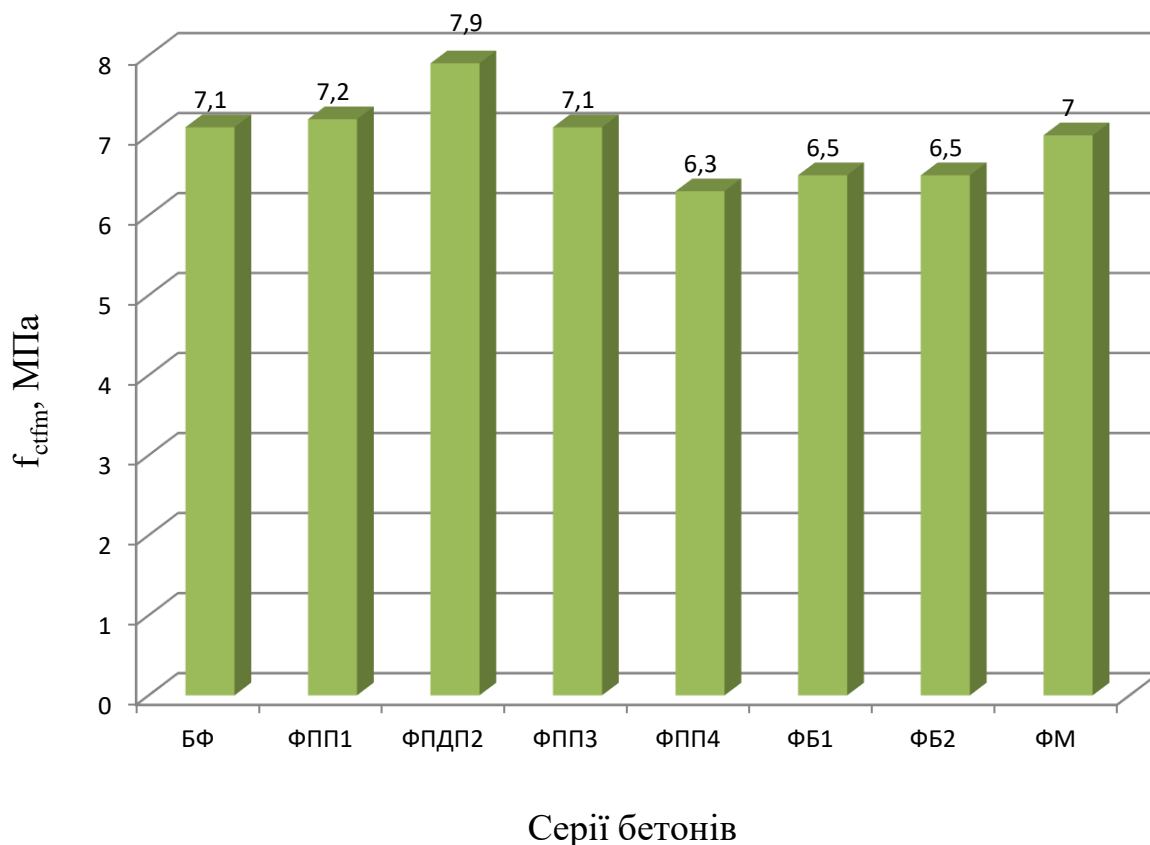


Рисунок 2.17 – Границя міцності на розтяг при згині бетонів

Міцнісні та деформаційні властивості бетону наведені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 - Фізико-механічні властивості досліджуваних бетонів

Умовне позначення	Границя міцності на стиск, МПа	Критерій крихкості, мм
БФ	69,0	124
ФПП1	65,8	107
ФПДП2	68,2	144
ФПП3	63,3	169
ФПП4	66,7	127
ФМ	64,8	95
ФБ1	60,5	166
ФБ2	58,6	120

Як видно з табл. 2.9, показники міцності на стиск дисперсноармованих бетонів поступаються бетону без фібри. Проте відхилення становить не більше 8,3 %, за винятком бетонів, армованих базальтовою фіброю (приблизно 15%). Відомо, що збільшення міцності при стиску може бути прямо пропорційне кількості фібри і може досягати приблизно 140% при 2-3 % армуванні за об'ємом. В проведених дослідженнях вміст фібри знаходився на мінімально рекомендованому рівні і тому отримано нижчі показники міцності на стиск досліджуваних фібробетонів. Проте міцність на стиск не є основною механічною характеристикою дисперсноармованих матеріалів [15].

За одержаними результатами досліджень бетонів побудовані повні діаграми стану (ПДС) неармованого та дисперсноармованих бетонів, які представлені на рис. 2.18-2.22. Аналіз повних діаграм стану таких бетонів (рис. 2.18-2.19) серій ФПП1 та ФПДП2 вказує на позитивний вплив дисперсного армування таких

бетонів. Це відбувається, як на докритичній стадії формування макротріщини, так і на закритичній, коли відбувається сприйняття бетоном критичного навантаження та його руйнування аж до поділу досліджуваних зразків на частини.

Як видно з отриманих діаграм, конфігурація висхідних гілок діаграм неармованого та армованих бетонів майже збігаються. Проте виняток становить бетон, який армований металевою фіброю. Кут нахилу його висхідної гілки менший на 10° . Спадні гілки діаграм бетонів без фібри та серій ФПП3, ФПП4 і ФБ2 майже накладаються, а серій ФПП1, ФПДП2 і ФМ паралельні з більшою повнотою в закритичній стадії. Спадна гілка серії ФБ1 проходить трохи нижче діаграми бетону неармованого фіброю в закритичній стадії.

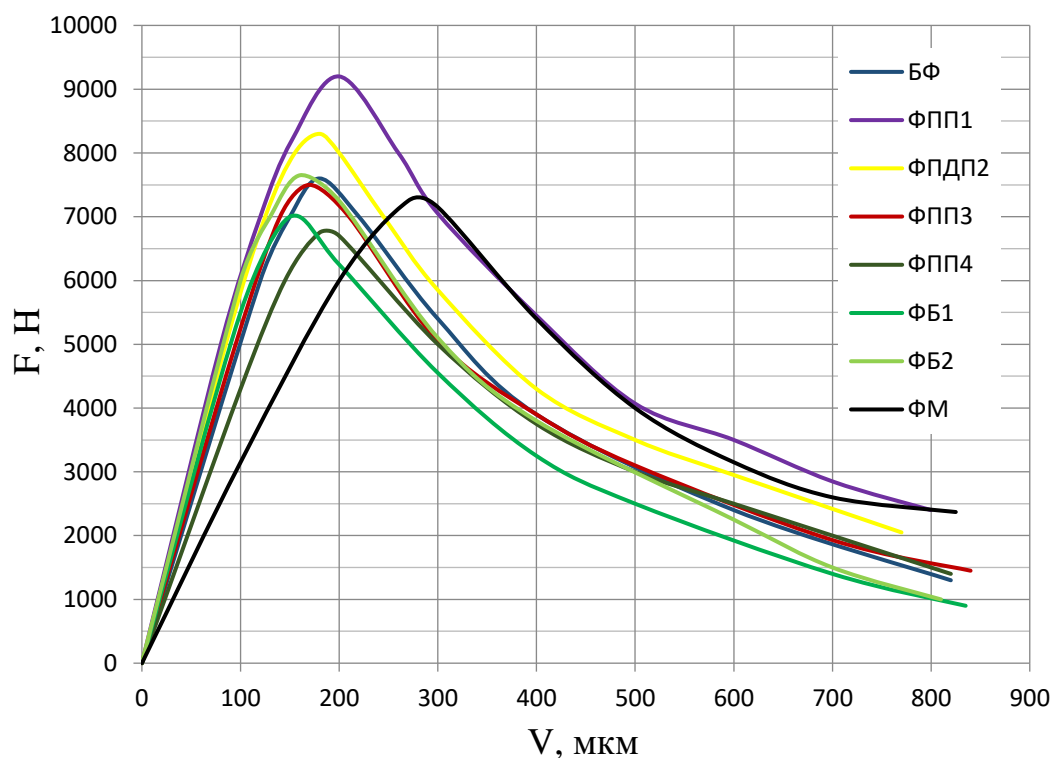


Рисунок 2.18 – ПДС неармованого та дисперсноармованих бетонів

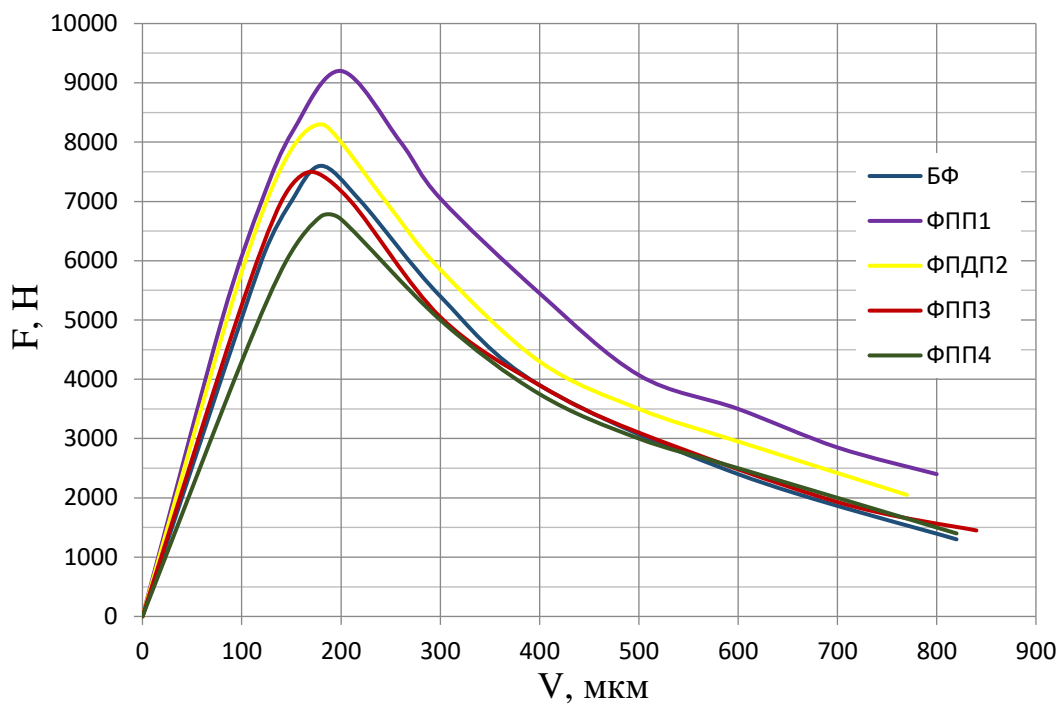


Рисунок 2.19 – ПДС неармованого та дисперсно-армованих поліпропіленовими фібрами бетонів

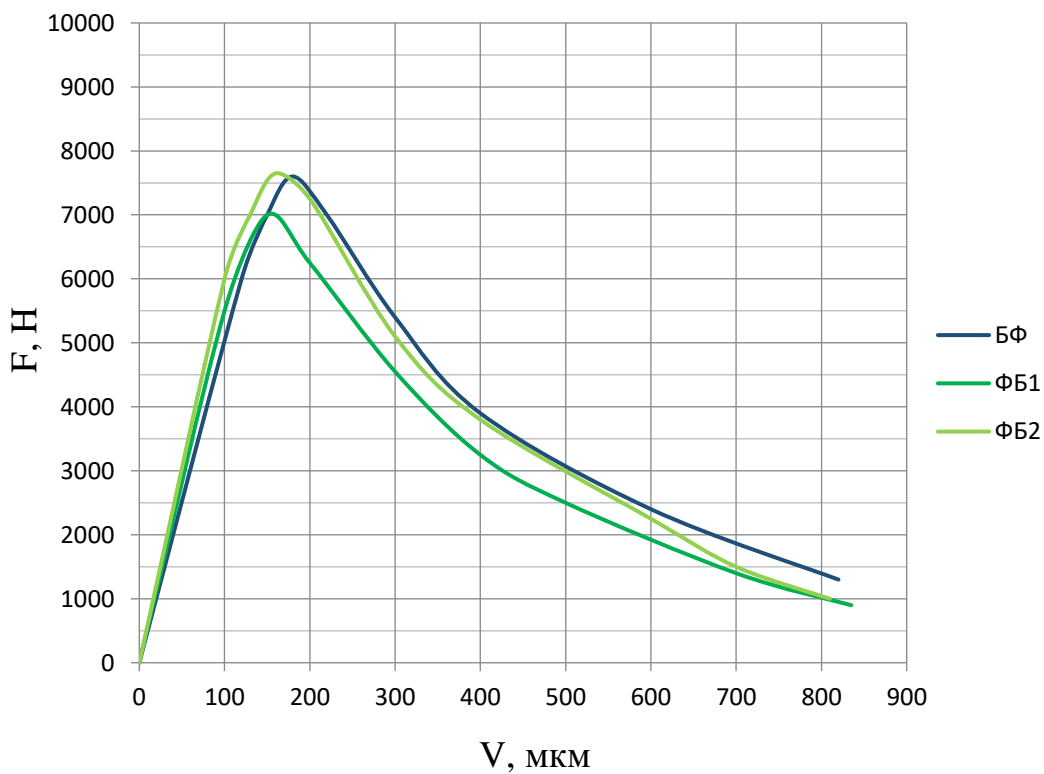


Рисунок 2.20 – ПДС неармованого та дисперсноармованих базальтовими фібрами бетонів

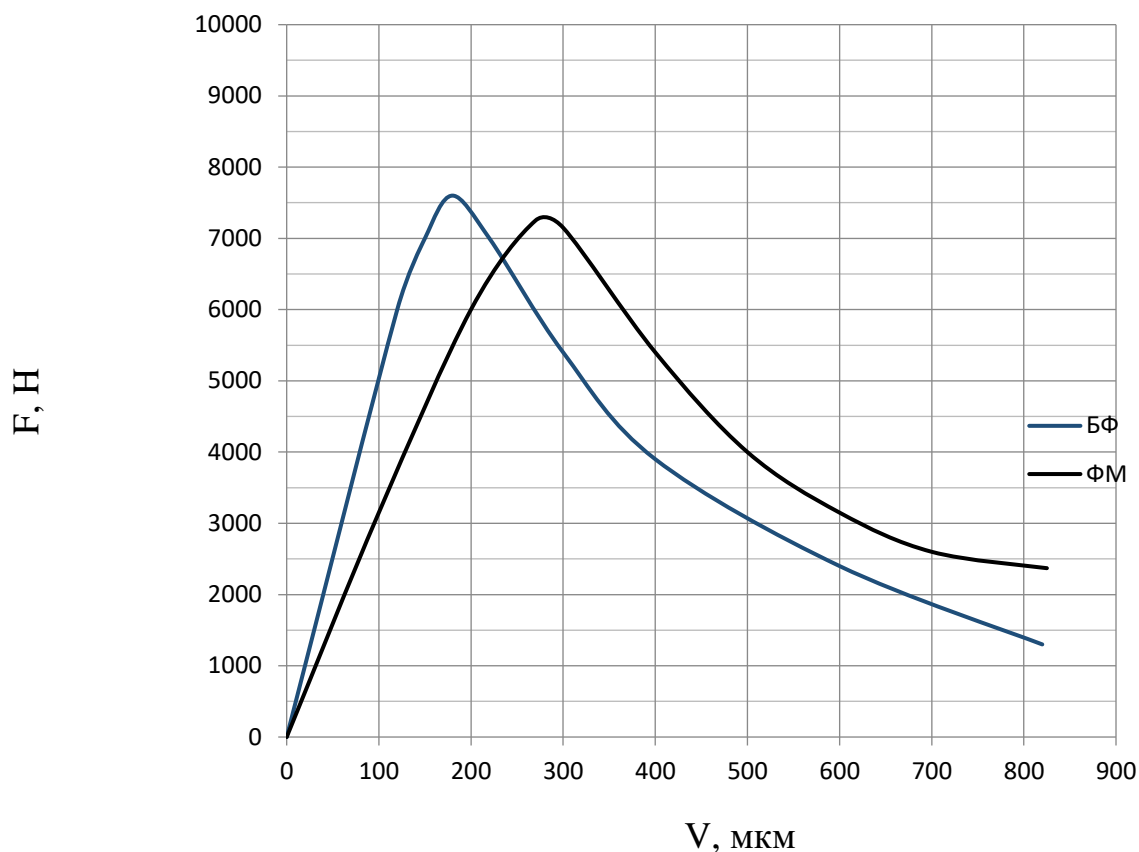


Рисунок 2.21 – ПДС неармованого та дисперсноармованого металевією фіброю бетонів

Гранична деформація, при якій відбувається дефрагментація зразків, не перевищує $840 \cdot 10^{-6}$ м і є приблизно однаковою.

Найменш крихкий характер руйнування за критерієм крихкості спостерігається в бетонах серій ФППЗ (в 1,4 рази більший, ніж у базової серії), ФБ1 (в 1,3 рази) та ФПДП2 (в 1,2 рази); для бетонів серій ФБ2 та ФПП4 характер руйнування ближчий до базової серії без армування. Результати дослідження показують, що бетони серій ФМ і ФПП1 є більш стійкими до дефрагментації зразків при наближенні до критичних значень навантажень.

Енергетичні та силові характеристики тріщиностійкості бетонів наведені в табл. 2.10.

Бетон серії ФМ має суттєву перевагу при роботі в докритичній стадії деформування. Енерговитрати на пружне деформування такого бетону (W_e) майже

в 1,5 рази перевищують показник бетону без фібри.

Таблиця 2.10 - Енергетичні та силові характеристики тріщиностійкості бетонів

Умовне позначення	$W_m, 10^{-2} \text{Н}\cdot\text{м}$	$W_e, 10^{-2} \text{Н}\cdot\text{м}$	$W_1, 10^{-2} \text{Н}\cdot\text{м}$	$G_i, \text{Дж}/\text{м}^2$	$G_F, \text{Дж}/\text{м}^2$	$J_i, \text{Дж}/\text{м}^2$	$K_c, \text{МПа}\cdot^{1/2}$
БФ	20,91	58,27	220,11	131,97	463,97	83,87	1,02
ФПП1	56,33	55,79	283,47	186,86	565,43	140,81	1,05
ФПДП2	33,71	39,25	235,07	121,6	457,19	89,21	0,86
ФПП3	24,53	50,56	209,55	125,15	433,51	83,42	0,64
ФПП4	33,89	51,87	251,54	142,94	505,68	100,12	1,02
ФМ	35,35	79,80	217,91	191,92	496,18	126,05	0,44
ФБ1	26,63	35,28	202,31	103,19	395,99	74,07	0,97
ФБ2	55,90	51,03	222,75	178,22	456,29	136,10	0,98

Аналізуючи закритичну стадію деформування, слід відзначити, що перевагу мають бетони, армовані поліпропіленовою фіброю серій ФПП1, ФПДП2 та ФПП4. Так, значення загальних енерговитрат (W_1) на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини в 1,1 - 1,3 рази перевищують показник бетону базової серії.

Як видно з рис. 2.22, в'язкість руйнування (K_i) зростає в такій послідовності: ФПП3, ФМ, БФ, ФБ1, ФПДП2, ФПП4, ФБ2, ФПП1. Найвищою в'язкістю руйнування характеризується бетон, армований фіброю ФПП1.

Критичні коефіцієнти інтенсивності напружень (K_c) не дуже відрізняються одне від одного (приблизно до 5%) в бетонах базової та серій ФПП1, ФПП4, ФБ1 та ФБ2, але в серіях ФПДП2, ФПП3 та ФМ значно менші (різниця 14-56 %). Спостерігаються підвищені на 48 (ФПП1) та 18% (ФПДП2) значення статичного критичного коефіцієнта інтенсивності напружень порівняно з бетоном без фібри (рис. 2.22).

Для проведення подальших досліджень використовували базальтову та поліпропіленову фібру ФПП1 та ФПДП2. Кожна з них має свої переваги і широко використовується в технології бетонів.

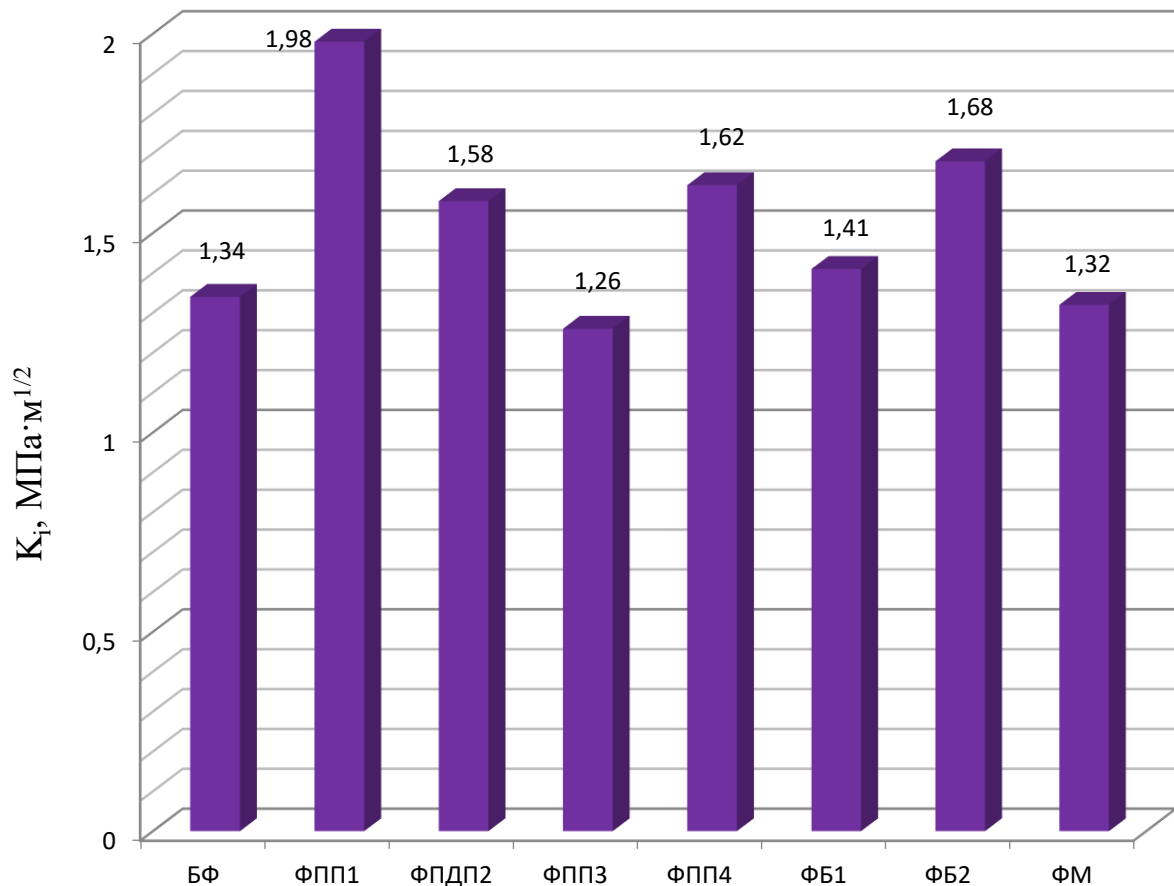
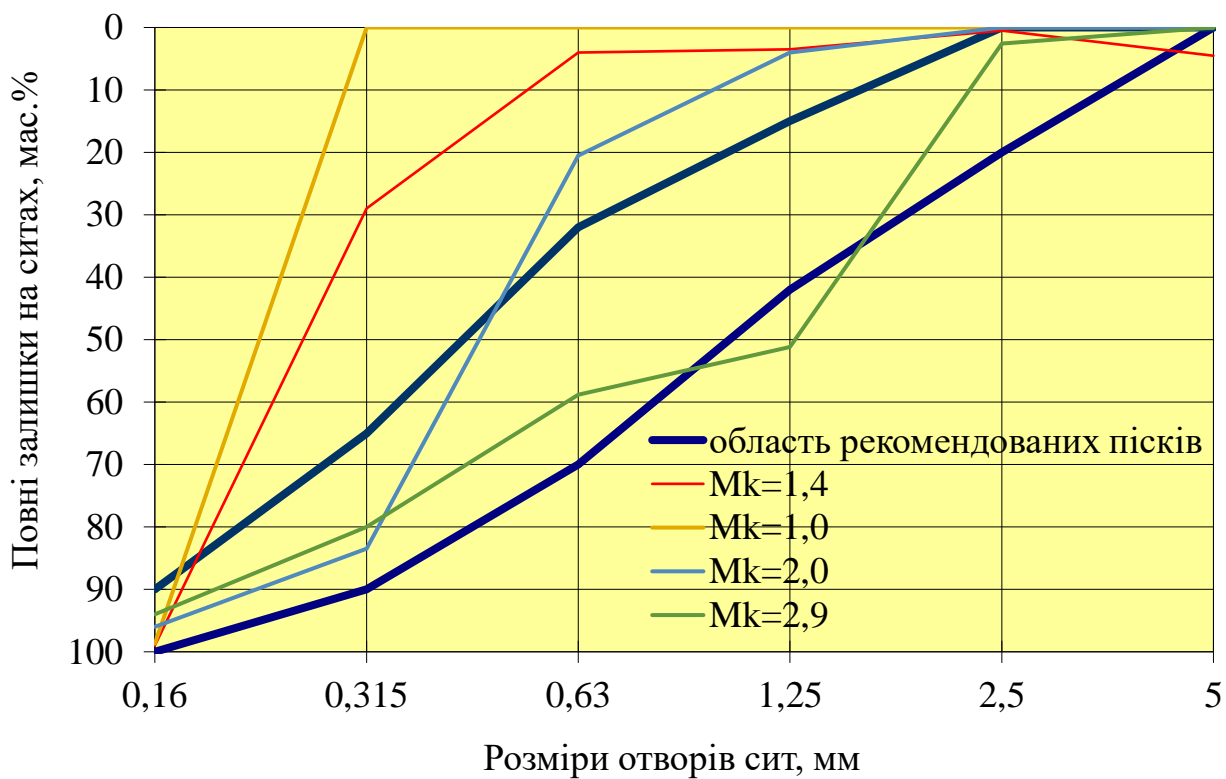
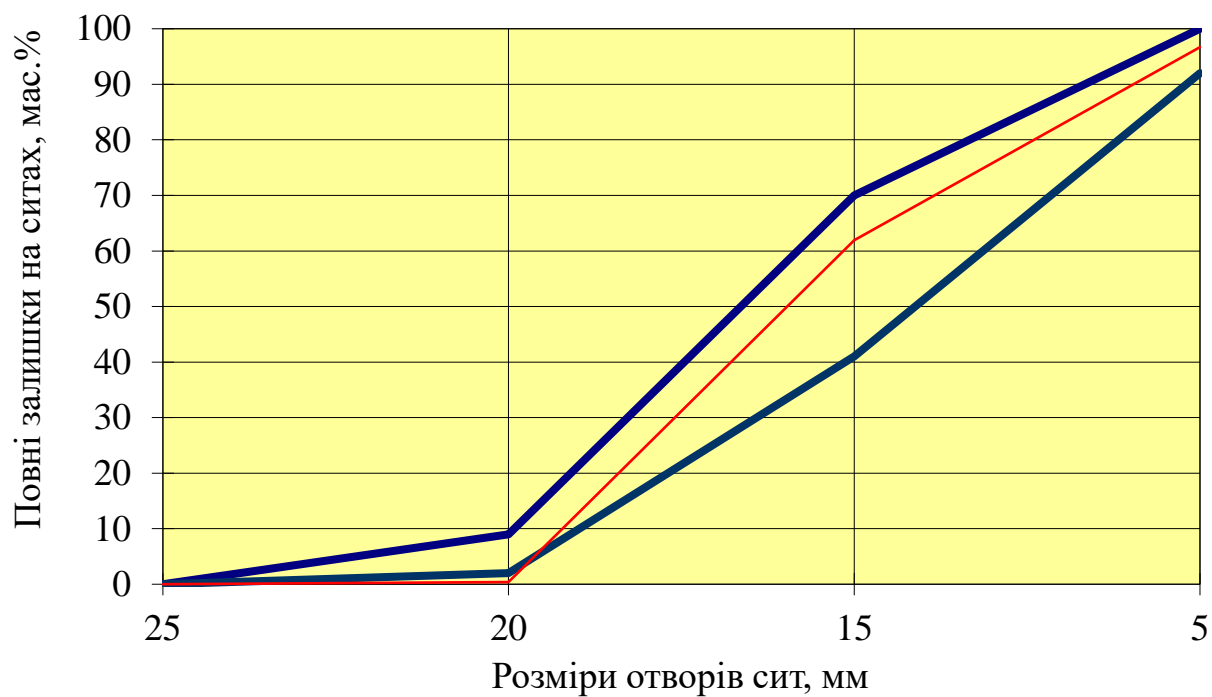


Рисунок 2.22 – Статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень

Як дрібні заповнювачі при проектуванні складів бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю використовували природні кварцові піски та пісок з відсівів дроблення гірських порід (ПВДГП). Аналіз зернового складу дрібних заповнювачів свідчить про те, що піски відносяться до групи дуже дрібних, середніх та крупних згідно ДСТУ Б В.2.7-29-95 (рис. 2.23, а) [36]. Використані піски задовольняють вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95 [37] щодо дрібних заповнювачів для важких бетонів за показниками якості (табл. 2.11), які визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 [54].



а



б

Рисунок 2.23 – Криві розсіювання дрібних (а) та крупного (б) заповнювачів

Таблиця 2.11 - Показники якості дрібних заповнювачів

Заповнювач	Модуль крупності, M_k	Насипна густина, $\rho_n, \text{кг/м}^3$	Істинна густина, $\rho, \text{г/см}^3$	Порож- нистість, $V_{мп}, \%$	Вміст пиловидних і глинистих частинок, %
Пісок з відсівів подрібнення	2,9	1465	2,66	45,0	0,6
Жовківський пісок	1,9	1500	2,63	42,9	0,2
Ясинецький пісок	1,4	1425	2,62	45,6	0,8
Глухівський пісок	1,0	1360	2,63	48,3	1,4

Як крупний заповнювач використано щебінь гранітний фракції 2-8, 5-10, 8-16, 10-20 та 5-20 мм. Показники крупних заповнювачів відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-74-98 [41] для важких бетонів (табл. 2.12). Крива розсіювання суміші щебеню фракцій 5-20 мм знаходиться в межах рекомендованого зернового складу для бетонів (рис. 2.23, б).

Таблиця 2.12 - Показники якості крупних заповнювачів

Гранітний щебінь фракцій, мм	Істинна густина, $\rho, \text{г/см}^3$	Насипна густина, $\rho_n, \text{кг/м}^3$	Пустот- ність, $V_{мп}, \%$	Вміст пиловидних і глинистих частинок, %
2-8	2,63	1400	45,1	0,5
5-10	2,66	1430	46,3	0,2
8-16	2,64	1450	45,8	0,3
10-20	2,66	1465	44,9	0,5
5-20	2,68	1370	48,9	0,3
5-20	2,58	1460	43,4	1,6
5-30	2,70	1400	48,3	0,8

Для покращення реологічних характеристик бетонних сумішей та експлуатаційних властивостей бетонів використовуються пластифікуючі та повітровтягувальні добавки на основі поверхнево-активних речовин різної природи.

Для досліджень використано добавки першої та третьої генерацій на основі лігносульфонатів технічних та полікарбоксилатів відповідно. Вид добавок залежав від зернового складу дрібного заповнювача та додаткового цементуючого матеріалу, який використовувався для покращення властивостей бетонів з підвищеною міцністю.

Добавки на лігносульфонатній основі характеризуються густиною $1,18 \text{ г/см}^3$ та вмістом сухої речовини 35 мас.%. Густина добавки на полікарбоксилатній основі становила $1,02 \text{ г/см}^3$, вміст сухої речовини 30 мас.%. Для одержання бетонів з підвищеною морозостійкістю використовували повітровтягувальну добавку. Густина добавок коливалася в межах $1,02\text{-}1,05 \text{ г/см}^3$, а вміст сухої речовини 0,34-2,5 мас.%. Застосування таких добавок дозволяє ще й покращити реологічні властивості бетонних сумішей.

Вивчення впливу рецептурно-технологічних факторів (табл. 2.13) показали, що із збільшенням витрати портландцементу міцність бетонів закономірно зростає порівняно з контрольним складом бетону (рис. 2.24) [105]. Так, збільшення витрати портландцементу на 80 кг/м^3 порівняно з контрольним складом призводить до зростання міцності через 3, 7 та 28 діб на 32, 16 і 26% відповідно. При витраті портландцементу 510 кг/м^3 (на 160 кг/м^3 більше порівняно з контрольним складом) та збільшенні коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача кінетика набору міцності бетону суттєво не змінюється порівняно з бетоном, що містить 430 кг/м^3 портландцементу, а одержана міцність через 28 діб тверднення дозволяє віднести ці бетони до класу за міцністю на стиск В40. Зменшення водоцементного відношення від 0,57 до 0,47 при зростанні витрати в'язучого супроводжується ущільненням структури бетону.

Таблиця 2.13 - Склади та властивості бетонних сумішей (марка за осадкою конуса бетонної суміші S3)

Умовне позначення бетону	Цемент (кг/м ³)	Пісок (кг/м ³)	Щебінь (кг/м ³)	Суперпластифікатор (% від цементу)	В/Ц
Ц350 (Е (контрольний), В/Ц=0,57, Щ=1230 кг/м ³)	350	600	1230	-	0,57
Ц350 СП (В/Ц=0,51, Щ=1230 кг/м ³)	350	600	1230	1	0,51
Ц430 (В/Ц=0,51, Щ=1230 кг/м ³)	430	520	1230	-	0,51
Ц510 (В/Ц=0,47, Щ=1180 кг/м ³)	510	500	1180	-	0,47

При цьому водопоглинання знижується на 26-36% (рис. 2.25).

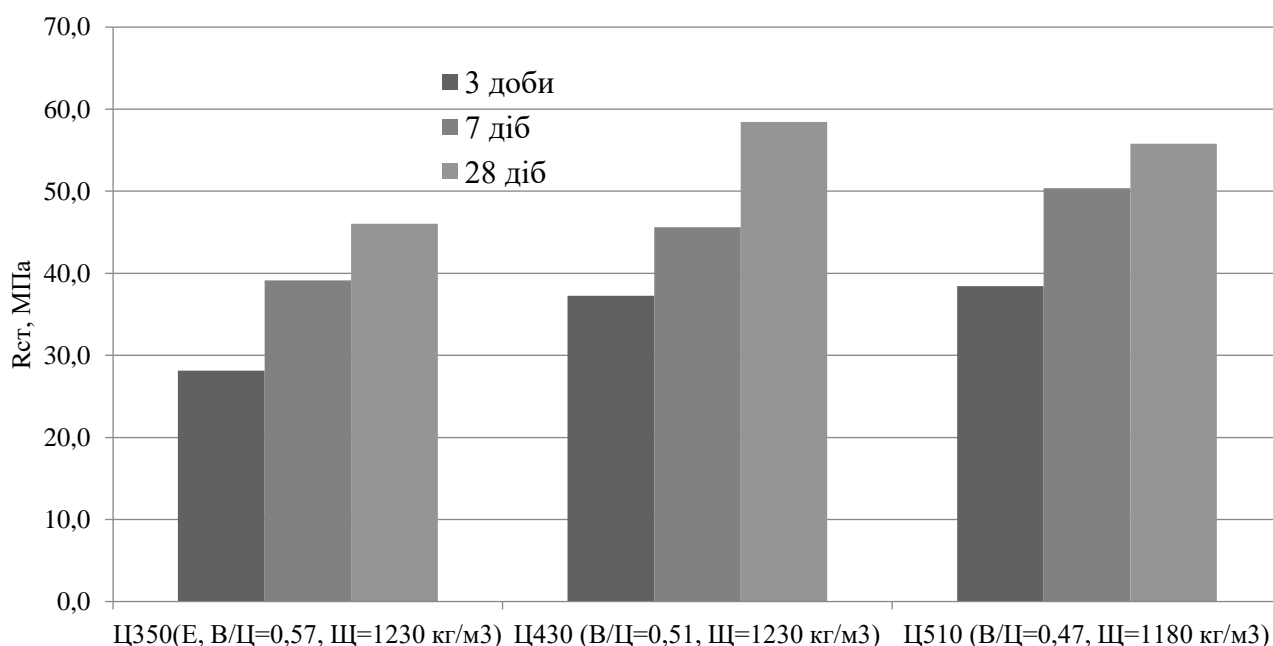


Рисунок 2.24 - Міцність бетонів

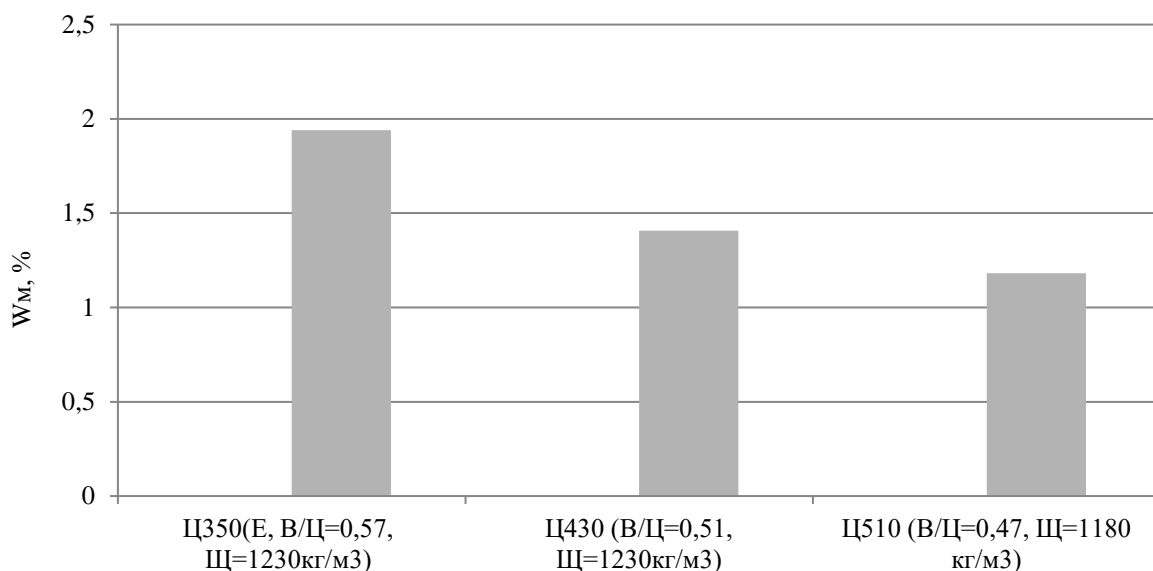


Рисунок 2.25 - Водопоглинання бетонів з підвищеною міцністю

Одержані повні діаграми стану свідчать про те, що із збільшенням витрати портландцементу на 80 кг/м^3 (до 430 кг/м^3) тріщиностійкість бетонів зростає (рис. 2.26). Водночас, при витраті портландцементу 510 кг/м^3 та із збільшенням коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача від 1,51 до 1,63 відбувається зниження тріщиностійкості бетонів. Це можна пояснити тим, що із зростанням витрати портландцементу більшою мірою проявляється вплив підвищеної усадки бетону і пов'язаного з нею раннього тріщиноутворення.

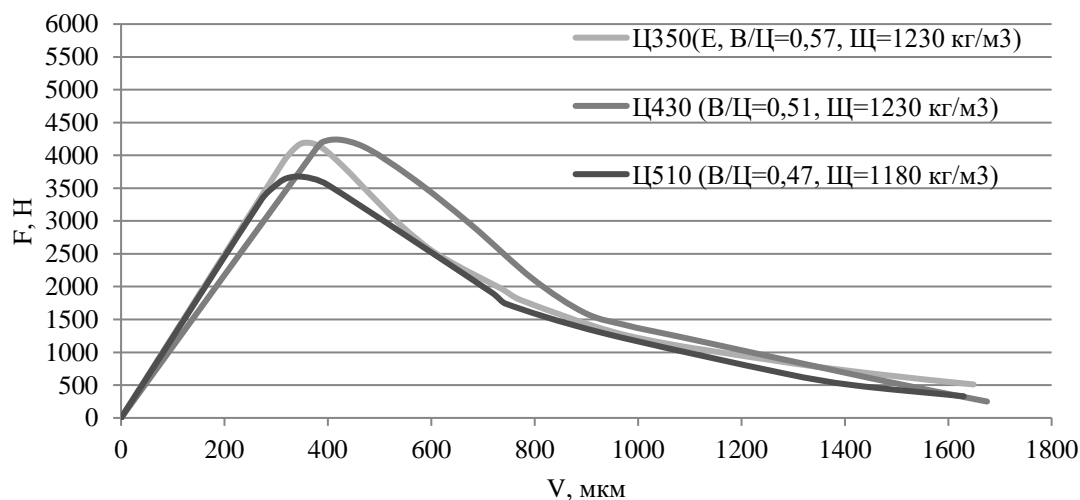


Рисунок 2.26 - Повні діаграми стану бетонів з підвищеною міцністю з різною витратою портландцементу

Введення 1 мас.% суперпластифікатора в бетонну суміш з витратою портландцементу 350 кг/м^3 дозволяє зменшити водоцементне відношення з 0,57 до 0,51. При цьому досягається технічний ефект із зростанням міцності через 28 діб тверднення від 46,1 до 55,0 МПа (рис. 2.27). Слід відзначити, що бетон з добавкою суперпластифікатора на основі бетонної суміші з маркою за осадкою конуса S3 при визначенні тріщиностійкості характеризується найбільшим навантаженням в точці зламу повної діаграми стану (рис. 2.28).

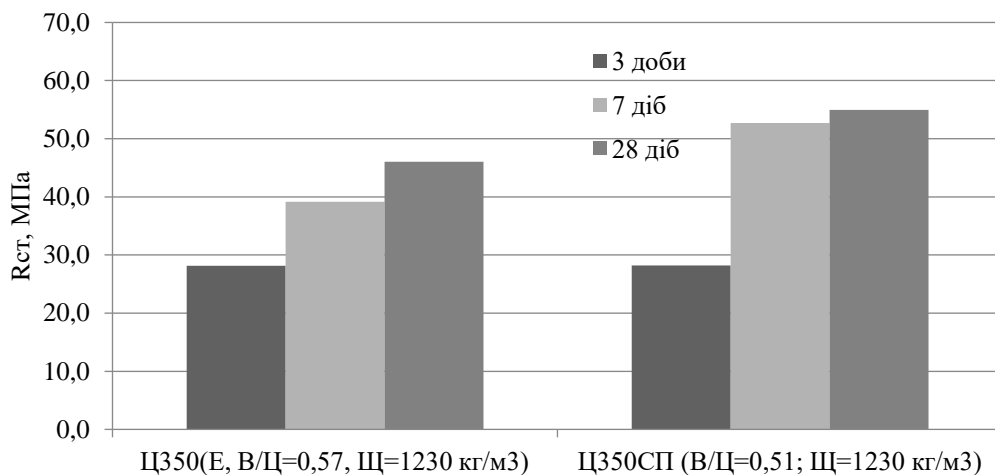


Рисунок 2.27 - Міцність бетонів

Проведені дослідження свідчать, що витрата портландцементу відіграє важливу роль як в забезпеченні міцності, так і тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю.

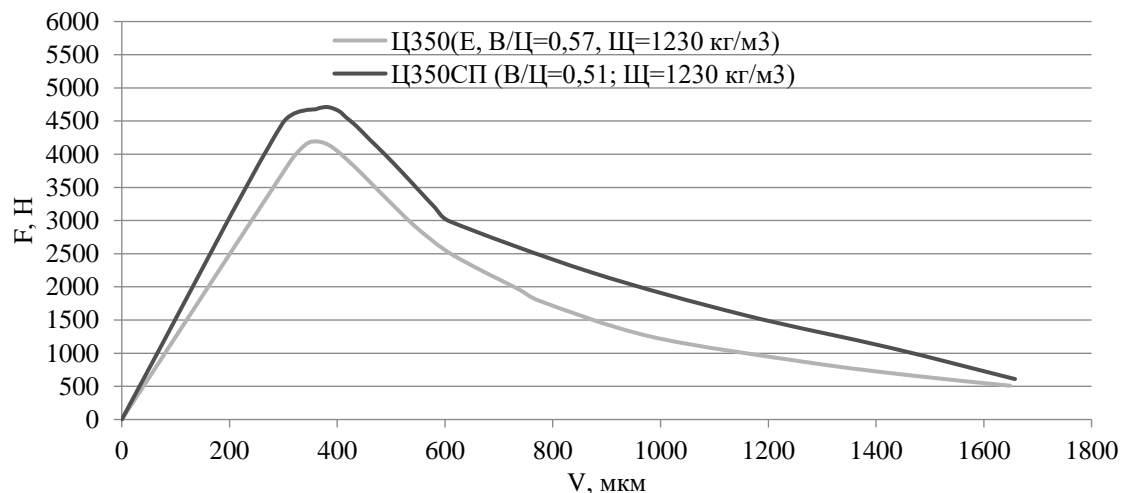


Рисунок 2.28 - Повні діаграми стану бетонів
з різним водоцементним відношенням

Встановлено, що зміна рецептурно-технологічних чинників дозволяє регулювати показники міцності та тріщиностійкості бетонів. Як свідчать результати досліджень, бетони однакової міцності на стиск можуть мати різний рівень тріщиностійкості. При цьому водоцементне відношення та витрата портландцементу відіграють ключову роль в забезпеченні підвищеної тріщиностійкості. Так, при збільшенні витрати портландцементу від 350 до 410 кг/м³ (В/Ц=0,51) забезпечується зростання тріщиностійкості. Водночас, найбільшим навантаженням в точці зламу повної діаграми стану характеризується бетон з витратою портландцементу 350 кг/м³ (В/Ц=0,51) та добавкою суперпластифікатора.

2.3. Обґрунтування вибору методології та процедура проведення досліджень

Визначення фізико-механічних властивостей портландцементів, які використовувалися в дослідженнях, проводили згідно з ДСТУ Б.В. 2.7-185:2009 [46], ДСТУ Б.В. 2.7-187:2009 [47], ДСТУ EN 196-1:2007 [56], ДСТУ Б.В. 2.7-188:2009 [48] для встановлення нормальної густоти, термінів тужавіння портландцементного тіста, границі міцності при згині, стиску та тонини помелу портландцементів. Фракційний склад і тонина помелу визначалися за залишком на ситі № 008 і питомою поверхнею методом повітропроникності на поверхнемірі ПМЦ-500.

Розподіл частинок за розміром дрібнодисперсних компонентів визначали методом лазерної гранулометрії. Використано гранулометр Malvern Panalytical Master Sizer 2000.

Пуцоланічну активність матеріалів досліджували згідно з ДСТУ EN 450-1:2019 [57], а також за здатністю цих матеріалів поглинати $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з його насиченого розчину.

Визначення активності пуцоланових матеріалів проводили за класичною методикою за поглинанням CaO з насичених розчинів. Мінеральна добавка вважається тим активнішою, чим більше вона поглинає CaO . При однаковій кількості поглинутого вапна активнішою є добавка, для якої поглинання відбувається інтенсивніше у початковий період.

Спочатку готують насичений розчин вапна та його титруванням соляною кислотою (концентрація 0,1 н) встановлюють кількість CaO в розчині. Досліджувану добавку просіюють через сито 008 та висушують до постійної маси. Наважку масою 2 г поміщають у циліндр з притертим корком та заливають 100 мл насиченого вапняного розчину та збовтують. Через 2 доби з циліндра відбирають 50 мл розчину і поміщають у колбу об'ємом 250 мл. У колбу додають 2-3 краплі індикатора метилоранжу і титрують соляною кислотою. У циліндр доливають 50 мл насиченого розчину вапна. Щодня вміст колби збовтують, титрування проводять 1 раз у 2 дні. Дослідження триває протягом 28 діб, матеріали зберігають за температури 20 ± 5 °C.

Хімічні добавки до бетонних сумішей вводили згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008 [45]. Осадку конуса визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-114-2002 [42]. Середню густину, розчиновідділення і водовідділення (розшаровуваність бетонної суміші) та дотримання властивостей бетонної суміші в часі визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002 [42].

Для оцінки впливу пуцоланових матеріалів і хімічних добавок на властивості цементних систем та бетонів на їх основі було проведено математичне планування експерименту. Застосовували один з методів статистичної обробки результатів – метод ортогонального центрально-системного планування (ОЦКП).

Проектування складів бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-215:2009 [51] та настанови ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 [58]. Зразки бетону виготовляли і випробовували на міцність згідно

ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [50]. Для кожного складу суміші формували куби з розміром ребра 100 мм. Зразки у формі залишали щонайменше на 24 год при температурі (20 ± 5) °С, захищаючи від зневоднення, ударів і вібрації. Після виймання з форми досліджувані зразки витримували до випробування при температурі (20 ± 3) °С і відносній вологості (95 ± 5) %. Представлені в роботі результати є середнім арифметичним значенням з трьох зразків.

Об'єм втягнутого повітря визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002 [42], використовуючи прилади Testing 2.0334 та FORM+TEST, принцип дії яких базується на використанні закону Бойля-Маріотта.

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

Дослідження фазового складу на рівні мікроструктури бетонів проводили рентгенофазовим аналізом з використанням методу порошків на дифрактометрі ДРОН-2М з мідною трубкою (напруга 30 кВ, сила струму 10-20 мА) та в діапазоні кутів $2\theta=9-60^\circ$.

Диференційно-термічний аналіз проведено за допомогою приладу Q-1500D системи Паулік – Паулік – Ердеї при величині наважки 200-1000 мг, швидкість піднімання температури - 10 град/хв.

Мікроструктуру бетону з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю досліджували на скануючому електронному мікроскопі SEM FEI Quanta 250 FEG, оснащеному EDS.

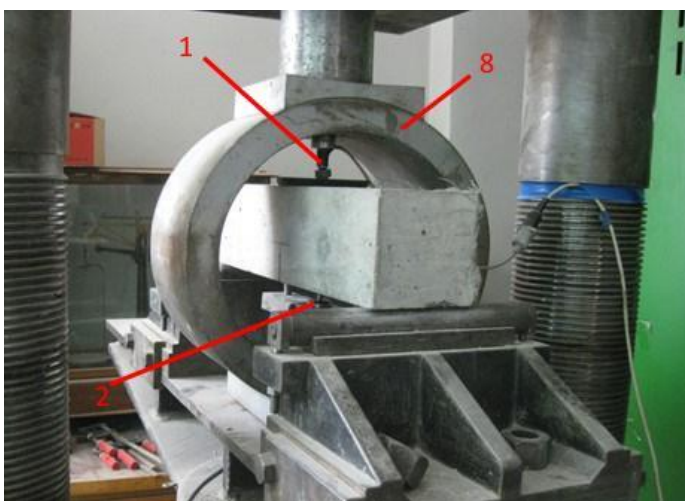
Середню густину, водопоглинання, пористість, водонепроникність бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [44].

Деформації усадки бетонів досліджували на зразках 40x40x160 мм, використовуючи компаратор з індикатором годинникового типу. В торцях зразків закладалися металеві анкери [52], а також на зразках-призмах розміром 0,1x0,1x0,51 м. Точність вимірювання 0,01 мм. Використовувався компаратор швейцарської фірми “Amsler”, який в своєму комплекті має еталон з інвару для врахування температурних деформацій. Під час формування металеві анкери

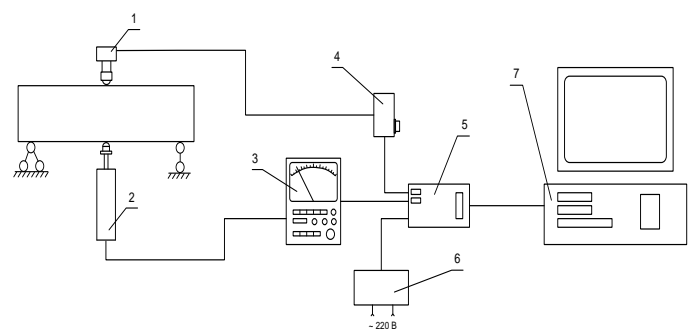
замонолічувались в зразки. Деформації вимірювалися у горизонтальному положенні, а також одночасно в процесі досліджень проводили контроль температури, відносної вологості повітря в лабораторії, а також визначали температурні деформації еталону, маси і деформації досліджуваних зразків.

З метою вивчення ефективності забезпечення повноти гідратації портландцементу в бетоні в сухих умовах тверднення досліджувалась внутрішня вологість зразків з цеолітовим туфом та перлітом за методикою, запропонованою El-Dieb [198]. Для цього після розформування зразків у бетонних кубах (з ребром 10 см) відразу просвердлювали отвір діаметром 1 см. В нього поміщали вологомір. Край вологоміра ущільнювався герметиком, щоб унеможливити втрати вологи через отвір. З періодичністю у 2 доби (до 28 діб включно) покази вологоміра реєстрували. Протягом випробування методом зважування визначали втрати маси.

Характеристики тріщиностійкості визначали згідно з ДСТУ Б В 2.7-227:2009 [53]. Випробування зразків проводили за триточковою схемою згинання на 200 т гідравлічному пресі, обладнаному силовим розподільчим кільцем, а також датчиком навантаження (тензодатчиком) і прогиноміром. Загальний вигляд пристрою для випробувань наведено на рис. 2.29, а.



(a)



(б)

Рисунок 2.29 – Загальний вигляд (а) установки та схема (б) вимірювального пристрою: 1- тензодатчик, 2 - деформаційний датчик, 3 - підсилювач сигналу, 4 - резисторний міст, 5 - інтерфейсна плата, 6 - блок живлення, 7 - ПК, 8 - кільце розподілу енергії

Для випробувань на тріщиностійкість використовували зразки ($100 \times 100 \times 400$ мм) з штучно створеною тріщиною глибиною 40 мм і шириною 2 мм. Перед випробуванням проведено два цикли навантаження (до 10% очікуваного пікового навантаження) і розвантаження. Зразки безперервно навантажували до їх руйнування. Криві навантаження-прогину записували за допомогою комп'ютерної системи збору даних (рис. 2.29, б). За отриманими результатами випробувань зразків будували криві навантаження–прогин і розраховували фізико-механічні властивості бетону та енергетичні характеристики руйнування. Оцінку енергії руйнування отримано за кривими L-d за методом RILEM (work-of-fracture).

Стираність визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-212:2009 [49]. Морозостійкість бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю досліджували за прискореною методикою згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 [40]. Марку за морозостійкістю визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96 [39].

Корозійну стійкість (клас впливу навколишнього середовища на бетон ХА – корозія бетону, спричинена впливом хімічних речовин) розроблених бетонів досліджували згідно з ДСТУ Б ГОСТ 27677:2011 [55], порівнюючи міцності на стиск та згин зразків призм $40 \times 40 \times 160$ мм, які поміщалися в відповідне агресивне середовище (сульфатна (концентрація $[\text{SO}_4^{2-}] = 10$ та 30 г/л) та магнезіальна (концентрація $[\text{Mg}^{2+}] = 10$ та 30 г/л) корозії), з аналогічними показниками зразків, які зберігались в питній воді. Агресивні розчини готували використовуючи чисті для аналізу (ЧДА) солі Na_2SO_4 та $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Для визначення температури замерзання рідкої фази та деформацій розширення свіжозамороженої дрібнозернистої бетонної суміші з підвищеною міцністю використано метод низькотемпературної дилатометрії. Приготовлену суміш заливають в циліндричну форму, що складається з окремих кілець і встановлюють в холодильну камеру “Мікротом” і закріплюють в штативі з індикатором годинникового типу (ціна поділки $0,001$ мм). Термопару використовували для зниження і фіксації температури в камері. Охолодження відбувалося із швидкістю $20^\circ\text{C}/\text{год}$.

Висновки до розділу

1. Для вирішення наукової проблеми одержання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю розроблено загальну блок-схему досліджень, яка встановлює взаємозв'язок між технологічними факторами на різних рівнях структури та властивостями бетонів і тріщиностійкістю. Розроблено алгоритм багатопараметричного проектування, який передбачає використання пуцоланових матеріалів для покращення фізико-механічних, експлуатаційних властивостей бетонів та їх тріщиностійкості на мікроструктурному рівні. Запропоновано розділити ефекти дії пуцоланових матеріалів на основні і додаткові та підбирати їх при проектуванні бетонів залежно від необхідних властивостей бетонних сумішей та бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю.

2. Для реалізації програми досліджень з розроблення бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю як компоненти бетонної суміші використовувалися: портландцементи I і II типів з підвищеною активністю (вище 50 МПа у віці 28 діб) різних виробників, мінеральні добавки (гранульований доменний шлак, зола-винесення, цеолітовий туф, спучений перліт, синтетичні цеоліти, мезопористий кремнеземистий матеріал), пластифікуючі та повітровтягувальні добавки. Як дрібні та крупні заповнювачі використовували кварцовий пісок та пісок з відсівів подрібнення гірських порід, а також гранітний щебінь різних фракцій (2-8, 5-10, 8-16, 10-20, 5-20, 5-30 мм). Для армування розроблених бетонів на мезо- та макрорівнях застосовано пряму фібру і фібру з деформованою поверхнею.

3. За результатами досліджень пуцоланової активності мінеральних добавок – гранульованого доменного шлаку, золи-винесення, природного та штучних цеолітів Na-P1, Na-X, Na-A, а також мезопористого кремнеземистого матеріалу МСМ-41 за здатністю поглинати СаО з його насиченого розчину встановлено, що показники активності штучних цеолітів перевищують активність цеолітового туфу і використаних побічних продуктів промисловості як у ранній,

так і пізній періоди. Кількість зв'язаного СаО з вапняного розчину добавками штучних цеолітів Na-P1 та Na-X через 2 доби становить у перерахунку на СаО 39,3 та 35,3 мг/г відповідно. Найнижчим значенням кількості поглинутого СаО характеризується гранульований доменний шлак – 10,0 мг СаО/г, а добавка МСМ-41 має найвищу активність з показником 86,3 мг/г. Через 28 діб активність досліджуваних матеріалів становить 108,7; 132,3; 204,2; 271,9; 237,2; 273,0 та 652,6 мг СаО/г для гранульованого доменного шлаку, золи-винесення, цеолітового туфу, цеолітів Na-P1, Na-X, Na-A та МСМ-41 відповідно.

4. Значення коефіцієнтів пуцоланічної активності цеолітових матеріалів, визначені на зразках цементно-піщаних розчинів, утворюють наступний ряд за зростанням: Na-X, цеолітовий туф, Na-P1. Найвищий коефіцієнт пуцоланічної активності за міцністю на згин характерний для цеоліту Na-P1 та становить 114%. Це свідчить про активну структуроутворюючу роль штучного цеолітового матеріалу даного типу. Встановлено, що за здатністю поглинати СаО з його насиченого розчину пуцоланові матеріали можна розмістити в такому порядку за зростанням: гранульований доменний шлак → зола-винесення → природні пуцолани → штучні пуцолани.

5. Проведено дослідження фізико-механічних властивостей та характеристик тріщиностійкості бетонів, дисперсноармованих різними видами та типами фібрових волокон. Отримані результати свідчать, що найбільш ефективними та найвищі показники міцності на стиск та на згин можна одержати при використанні поліпропіленових фібрових волокон ФПДП2 ($f_{cm.cube}=68,2$ та $f_{ctfm}=7,9$ МПа) та ФПП1 ($f_{cm.cube}=65,8$ та $f_{ctfm}=7,2$ МПа). Статичні критичні коефіцієнти інтенсивності напружень зростають на 18; 25 та 48 % при армуванні поліпропіленою фіброю ФПДП2, базальтовою довжиною 50 мм та ФПП1 відповідно. Це дозволяє чинити опір більшим (на 50-1600 Н) критичним навантаженням до моменту початку руху макротріщини. Підвищується ефективність “роботи” бетону в закритичній стадії руйнування. На етапі поширення магістральної тріщини краще працюють бетони армовані металевією фіброю.

6. Встановлено, що зміна рецептурно-технологічних чинників дозволяє регулювати показники міцності та тріщиностійкості бетонів. Показано, що бетони однакової міцності на стиск можуть мати різний рівень тріщиностійкості. При цьому водоцементне відношення та витрата портландцементу відіграють ключову роль в забезпеченні тріщиностійкості бетонів.

7. Виходячи з запропонованої структурно-логічної схеми проведення наукових досліджень, було обрано відповідні методи досліджень. В роботі використано стандартні та спеціально розроблені методики. Для оптимізації вмісту компонентів у складі бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю використано метод ортогонального центрального композиційного планування експерименту. При вивченні особливостей процесів гідратації в'язучих систем з добавками-модифікаторами, а також мікроструктури бетонів з підвищеною тріщиностійкістю застосовано сучасні фізико-хімічні методи аналізу. Використані матеріали, методи аналізу і досліджень забезпечили вирішення поставлених завдань та досягнення мети роботи.

РОЗДІЛ 3. РОЛЬ МІКРОСТРУКТУРИ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ПІДВИЩЕНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ БЕТОНІВ

3.1. Пуцоланові матеріали різного походження та їх вплив на властивості бетонів

Зростаючи з кожним роком екологічні проблеми спричиняють все більш серйозні наслідки для довкілля. Тому заміна найбільш енерго- та ресурсоемного компоненту бетону, а саме портландцементу, виробництво якого спричиняє 7% світових викидів CO₂ в атмосферу, є надзвичайно актуальною в технології сучасних бетонів. Практичний інтерес представляє використання мінеральних добавок, які не тільки дозволяють зменшити негативний вплив будівельної галузі на довкілля, але й підвищити експлуатаційні властивості, довговічність та тріщиностійкість бетонів. Досліджено бетони з добавкою штучних цеолітів Na-P1 і Na-X та цеолітового туфу (ЦТ). Ступінь заміни портландцементу становив 10 мас.%. Склади бетонів наведені в табл. 3.1. Марка бетонної суміші за осадкою конуса S4. Щоб компенсувати воду, яку поглинули пористі пуцоланові матеріали, необхідну для забезпечення проектної марки за легкоукладальністю, вводили додаткову кількість суперпластифікатора. Як видно з рис. 3.1, найвищою міцністю на стиск та на розтяг при згині через 28 діб тверднення характеризується дрібнозернистий бетон з 10 мас.% штучного цеоліту Na-P1. Так, міцність на стиск бетону Na-P1-10 становить 53,5 МПа, що перевищує міцність контрольного складу на 18%, у той час як міцність на розтяг при згині становить 7,8 МПа, що більше на 24% порівняно з контрольним складом Е.

Дослідження кінетики процесів гідратації і тверднення цементних систем з досліджуваними пуцолановими матеріалами, а також генезису їх мікроструктури має велике значення, оскільки відкриває шлях до наукового прогнозування їх

властивостей. У зв'язку з цим, методами фізико-хімічного аналізу (рентгенофазового і електронно-мікроскопічного) досліджено особливості

Таблиця 3.1 – Склади дрібнозернистих бетонів (В/Ц=0,4)

Компоненти бетону/Умовне позначення	Еталон	Na-P1-10	Na-X-10	ЦТ-10
Ц, кг	450	405	405	405
В, кг	180	180	180	180
П, кг	520	520	520	520
Щ ₅₋₁₀ , кг	1250	1250	1250	1250
Суперпластифікатор, %	0,6	1,0	1,0	1,0
Пуцоланові матеріали, кг	-	45	45	45

гідратації таких складів: контрольний; 75 мас.% ПЦ I+25 мас.% цеолітового туфу; 75 мас.% ПЦ I+25 мас.% штучного цеоліту Na-X; 75 мас.% ПЦ I +25 мас.% штучного цеоліту Na-P1.

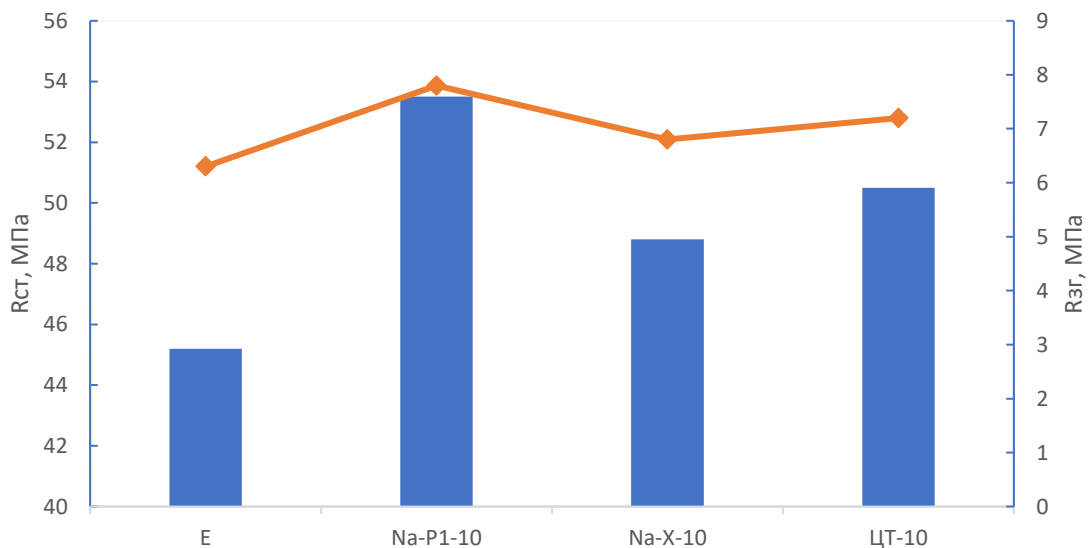
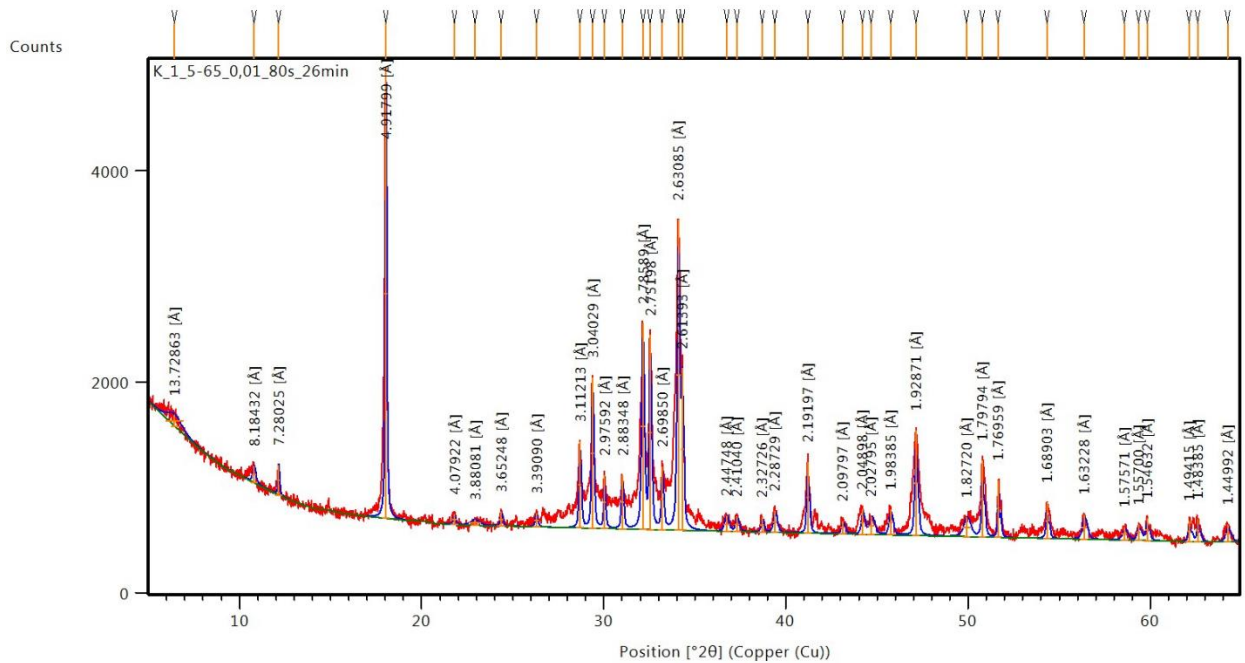


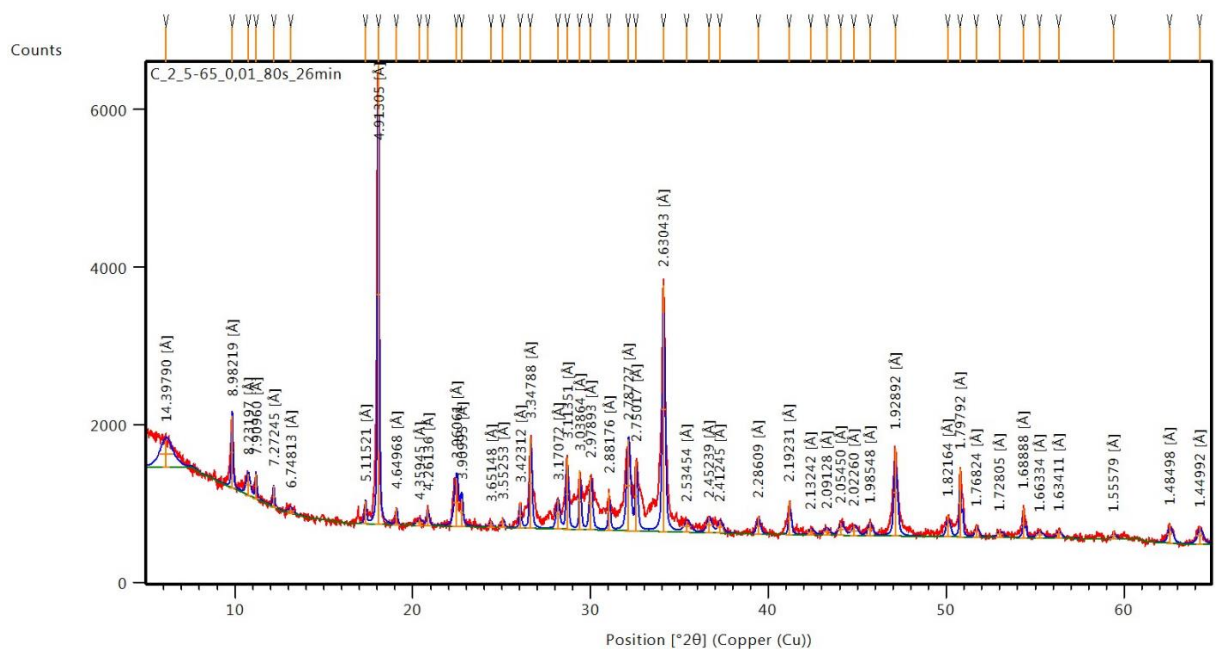
Рисунок 3.1 – Границя міцності при стиску і на розтяг при згині бетонів через 28 діб тверднення

Аналіз дифрактограм досліджуваних цементних систем, гідратованих 7 діб в нормальних умовах (рис. 3.2), свідчить, що процеси гідратації проходять активно з

утворенням основних гідратних фаз, які характерні для цементів з активними мінеральними добавками. Так, для контрольного зразка (рис. 3.2, а) на дифрактограмах фіксуються лінії кальцію гідроксиду ($d/n=2,63; 4,91\text{\AA}$), а також лінії алітової і белітової фаз ($d/n=2,77; 2,60; 2,10\text{\AA}$).

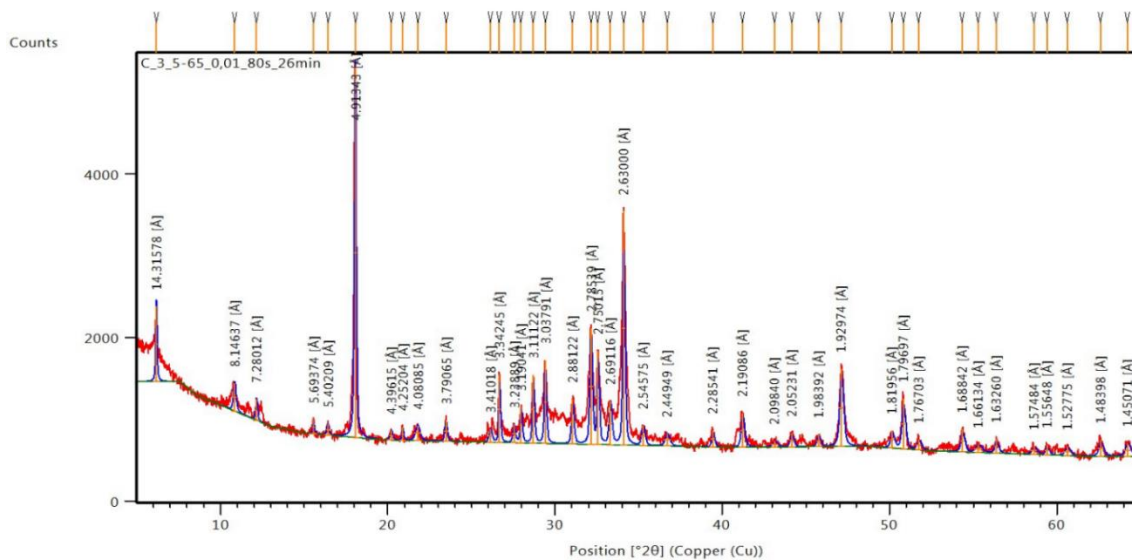


а

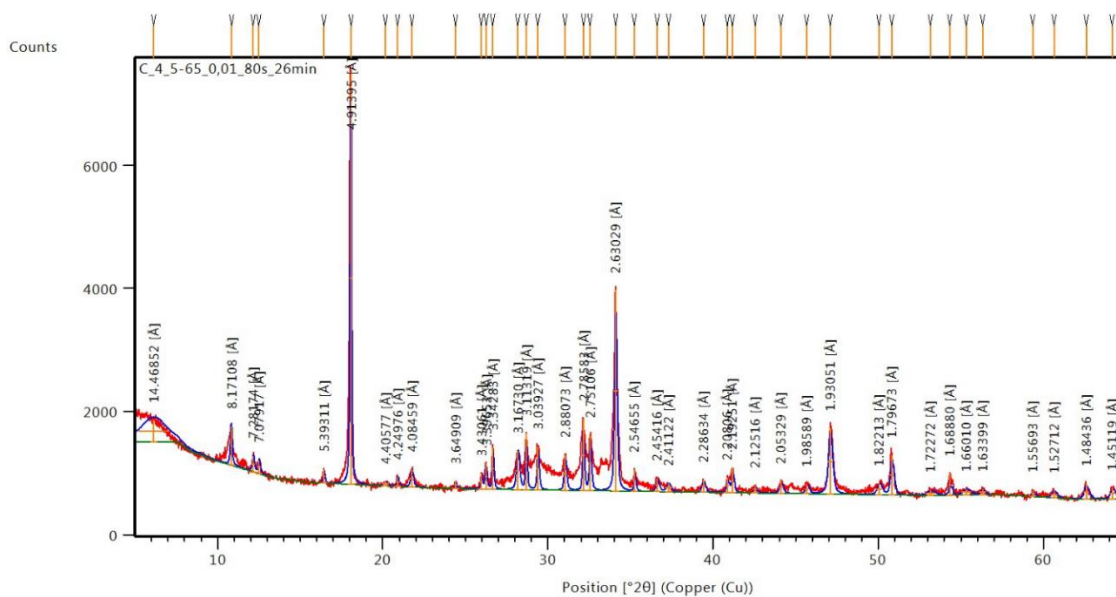


б

Рисунок 3.2 – Дифрактограми цементного каменю, гідратованого 7 діб в нормальних умовах на основі: а) ПЦ I; б) 75 мас.% ПЦ I+ 25 мас.% ЦТ; в) 75 мас.% ПЦ I+ 25 мас.% Na-X; г) 75 мас.% ПЦ I+ 25 мас.% Na-P1



B



Г

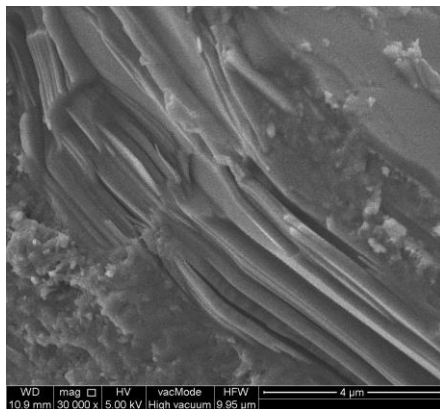
Рисунок 3.2, аркуш 2

При введенні в цементну систему пуцоланових матеріалів, як природного так і штучних цеолітів, за рахунок їх активної взаємодії з кальцієм гідроксидом на всіх досліджуваних дифрактограмах спостерігається зменшення інтенсивності ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рис. 3.2, б, в, г). Слід зазначити, що на дифрактограмі зразка, який містить природній цеолітовий туф спостерігаються незначної інтенсивності лінії клиноптилоліту $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ($d/n=14,3; 5,7; 3,8 \text{ \AA}$) (рис. 3.2, в), а також лінії Na-P1 ($d/n=7,1; 4,1; 3,17 \text{ \AA}$) (рис. 3.2, г). Важливим є також той факт, що через

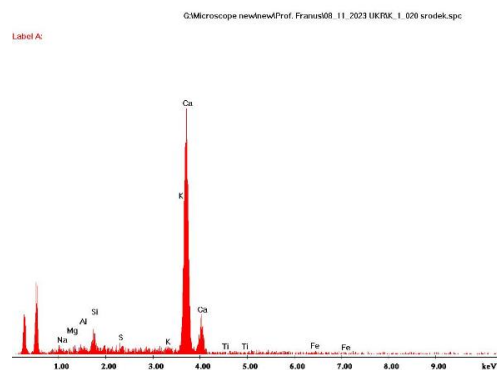
7 діб тверднення найбільш інтенсивно взаємодіє з кальцієм гідроксидом зразок, що містить Na-P1. Це добре корелює з результатами попередніх досліджень пуцоланових властивостей отриманих синтетичних матеріалів за поглинанням СаО з насичених розчинів.

Отже, результати рентгенофазового аналізу свідчать про високу пуцоланічну активність, як природного, так і штучних цеолітів.

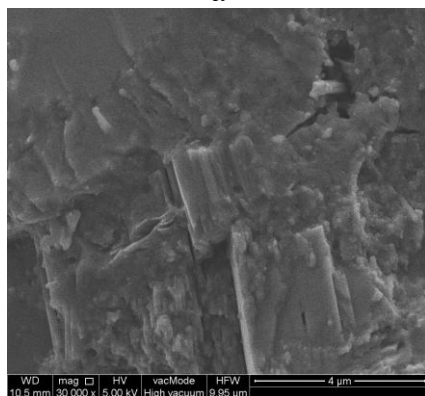
З метою поглибленого вивчення процесів тверднення і формування структури цементного каменю з пуцолановими матеріалами проведено електронно-мікроскопічні дослідження. Для мікроструктури цементного каменю контрольного складу на основі ПЦ І, гідратованого 7 діб в нормальних умовах характерним є різноманітність форм (рис. 3.3-4). На початковому етапі гідратації деякі кристали знаходяться на стадії формування, інші вже мають чітке огранення.



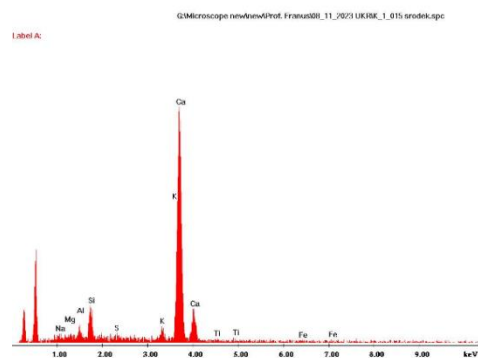
а



б



в

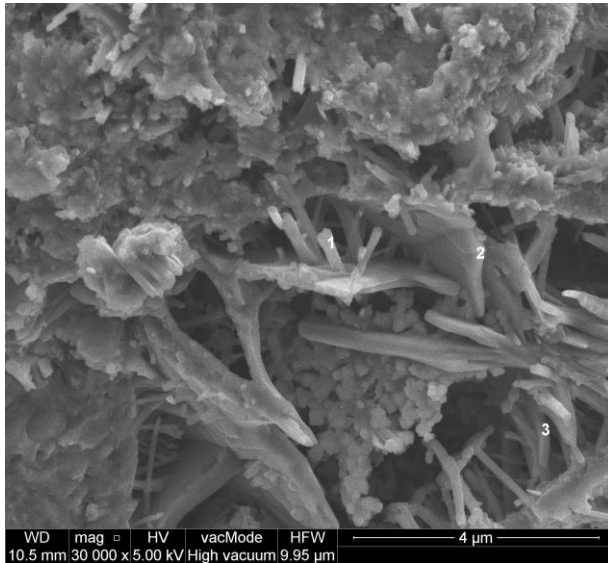


г

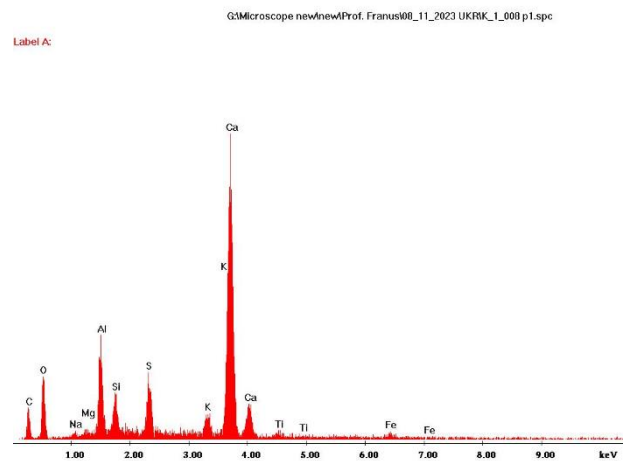
Рисунок 3.3 – Мікрофотографії (а, в) та спектри рентгенівського випромінювання (б, г) цементного каменю на основі ПЦ І, що тверднув 7 діб в нормальних умовах

В деяких місцях спостерігається наявність блоків з чітко вираженою паралельною шаруватою структурою (рис. 3.3, а), які за даними мікрозондового аналізу можна віднести до портландиту (рис. 3.3, б).

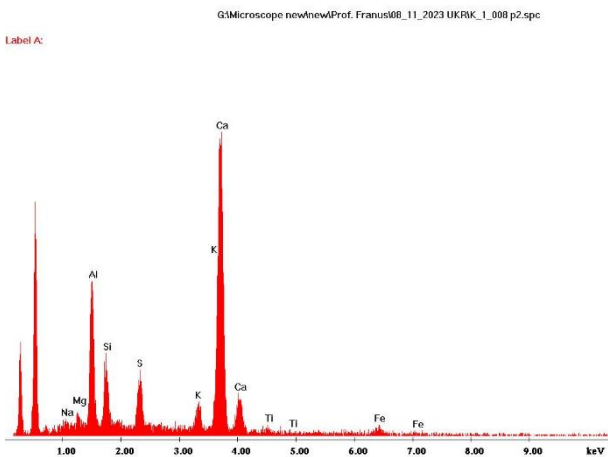
Одночасно в досліджуваних зразках вже через 7 діб тверднення спостерігається наявність дрібнокристалічних голчато-волокнистих кристалів низькоосновних гідросилікатів кальцію та видовжених кристалів еtringіту (рис. 3.4).



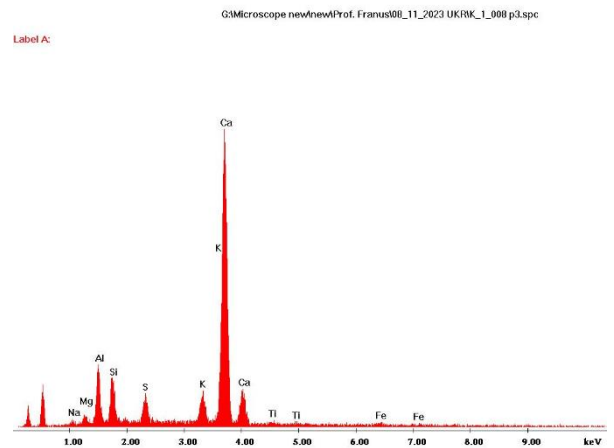
а



б



в



г

Рисунок 3.4 – Мікрофотографія (а) та спектри рентгенівського випромінювання (б, в, г) цементного каменю на основі ПЦ І, що тверднув 7 діб в нормальних умовах

Введення в систему цеолітового туфу призводить до зміни габітусу і морфології гідратних новоутворень. Так, в структурі не спостерігаються блоки

портландиту, натомість відзначається більша кількість субмікрочисталичних кристалів гідросилікатів і гідроалюмінатів кальцію (рис. 3.5) та еtringіту (рис. 3.6).

Наявність дрібнокристалічних фаз в структурі цементного каменю сприяє армуванню зони контактної взаємодії та призводить до кольматування порового простору, зменшуючи кількість дефектів та дислокацій.

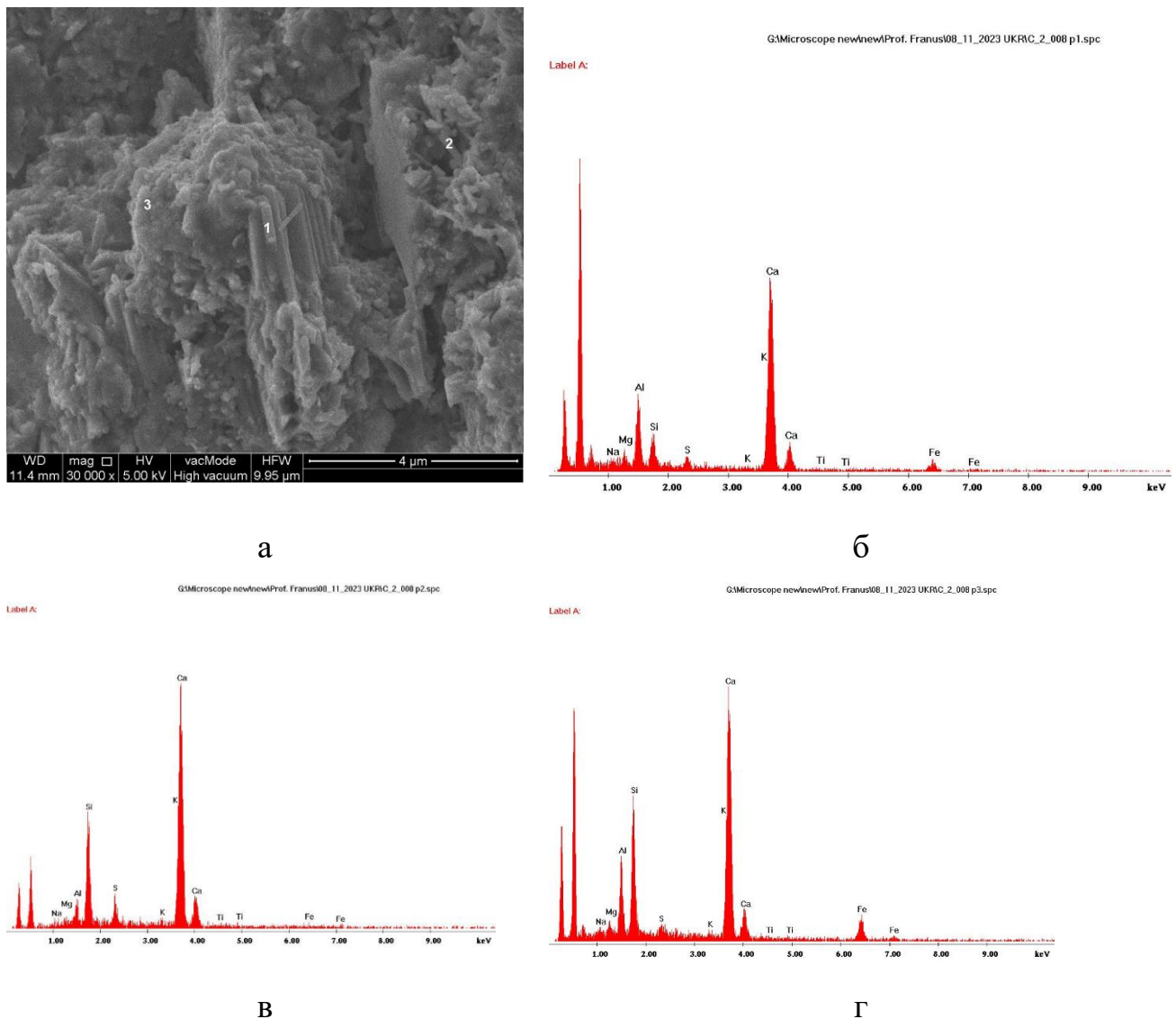


Рисунок 3.5 – Мікрофотографія (а) та спектри рентгенівського випромінювання (б, в, г) цементного каменю на основі 75 мас.% ПЦ I+25 мас.% ЦТ, що тверднув 7 діб в нормальних умовах

Активна структуроутворююча роль цеолітових матеріалів в процесі гідратації спостерігається і при введенні в систему штучного цеоліту Na-X (рис.

3.7, а). На мікрофотографіях чітко видно дрібні голчасті кристали С-S-H фаз, видовжені кристали еtringіту та пластинки гідроалюмінатів кальцію (рис. 3.7, б, в, г).

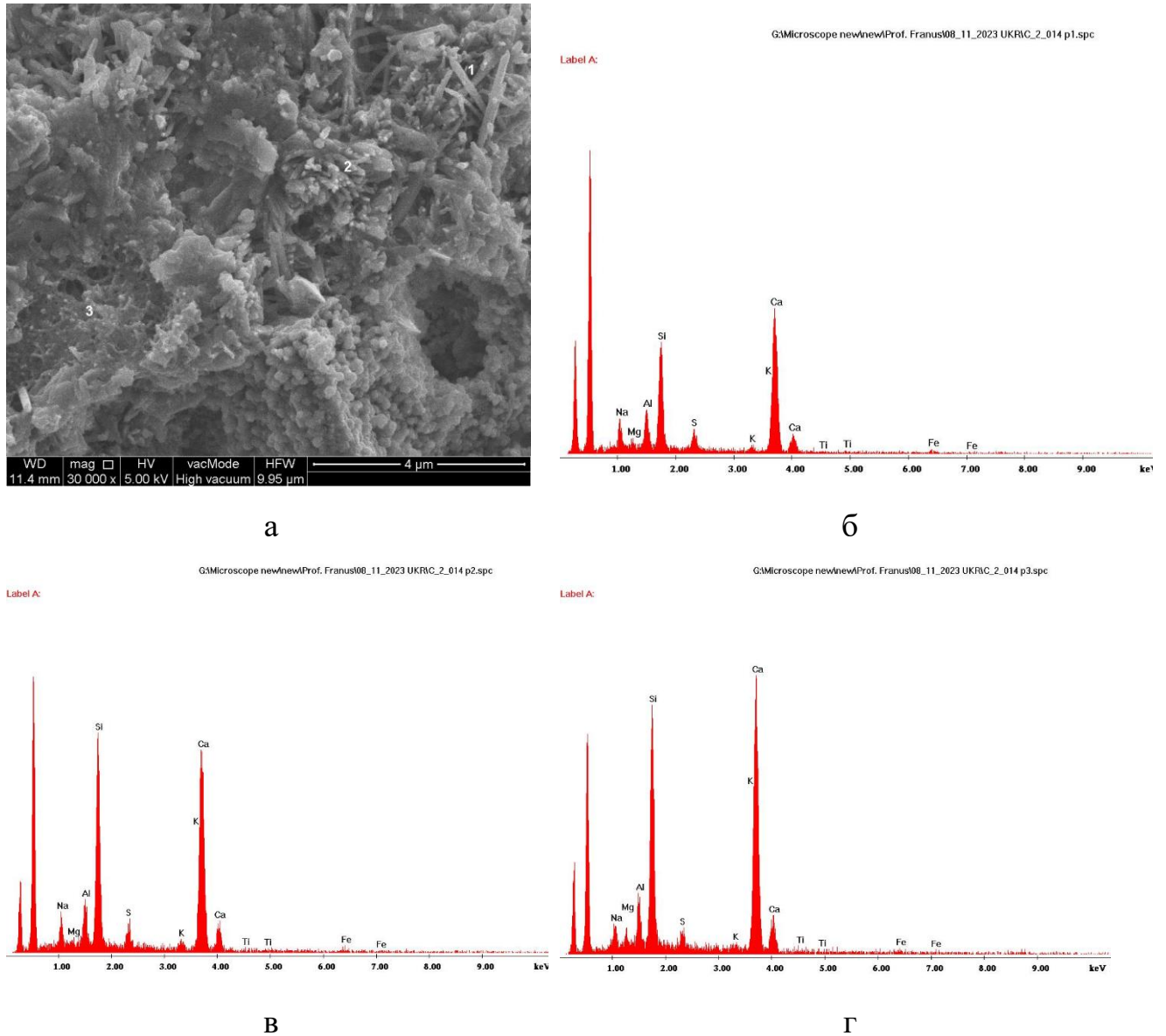


Рисунок 3.6 – Мікрофотографія (а) та спектри рентгенівського випромінювання (б, в, г) цементного каменю на основі 75 мас.% ПЦ I+25 мас.% ЦТ, що тверднув 7 діб в нормальних умовах

Слід відзначити, що внаслідок взаємодії кальцію гідроксиду з штучним цеолітом, утворюється велика кількість дрібнодисперсних гідросилікатів кальцію низької основності, які сприяють формуванню щільного штучного каменю

(рис. 3.8).

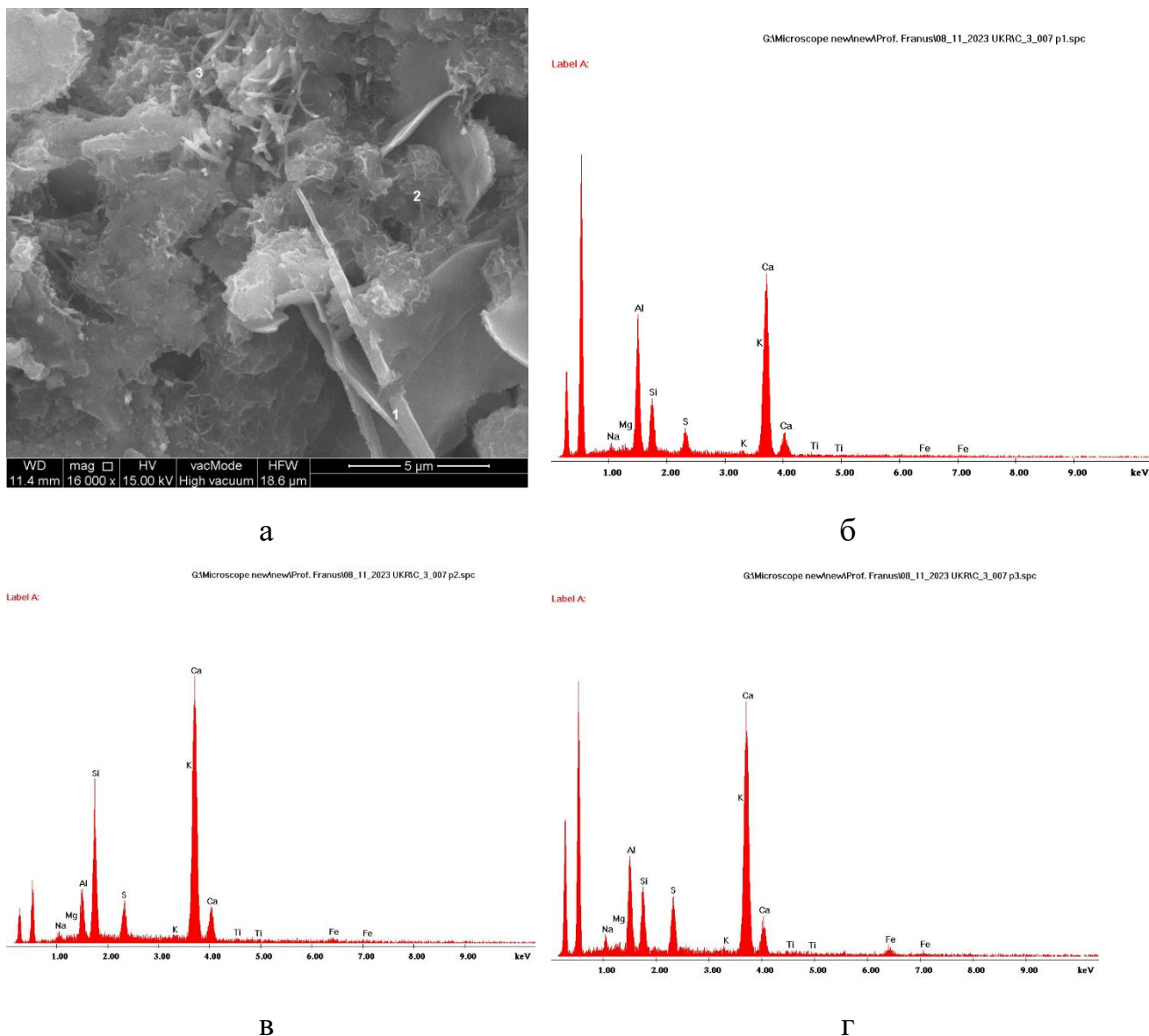


Рисунок 3.7 – Мікрофотографія (а) та спектри рентгенівського випромінювання (б, в, г) цементного каменю на основі 75 мас.% ПЦ І+25 мас.% Na-X, що тверднув 7 діб в нормальних умовах

Характерним при введенні цеоліту такого типу є наявність деякої кількості гідроалюмінатів кальцію та еtringіту (рис. 3.9, б, в). Цеоліт у системі є джерелом активного Al_2O_3 , який, взаємодіючи з гіпсом, утворює додаткову кількість еtringіту.

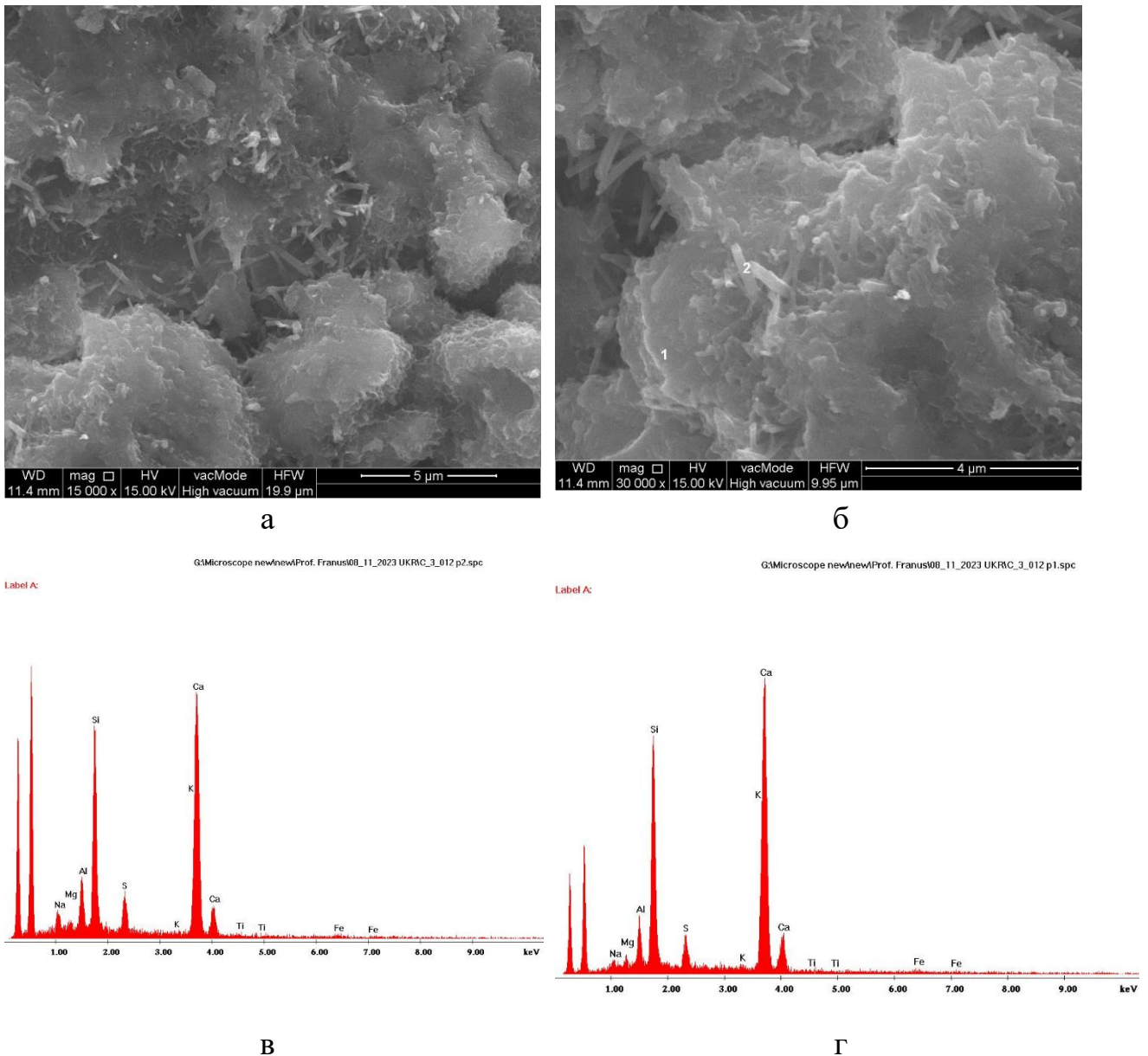
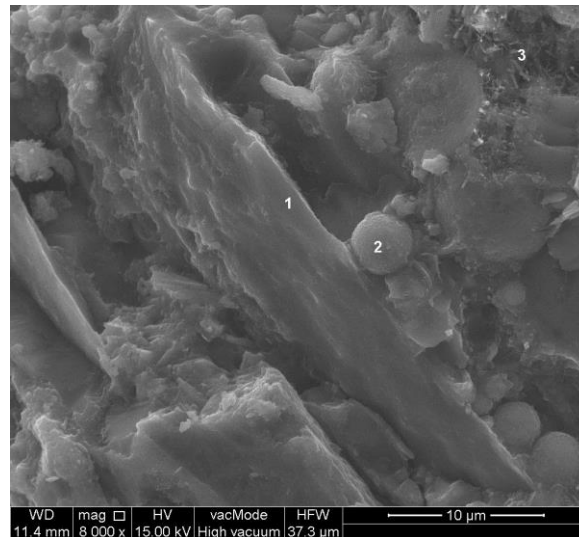
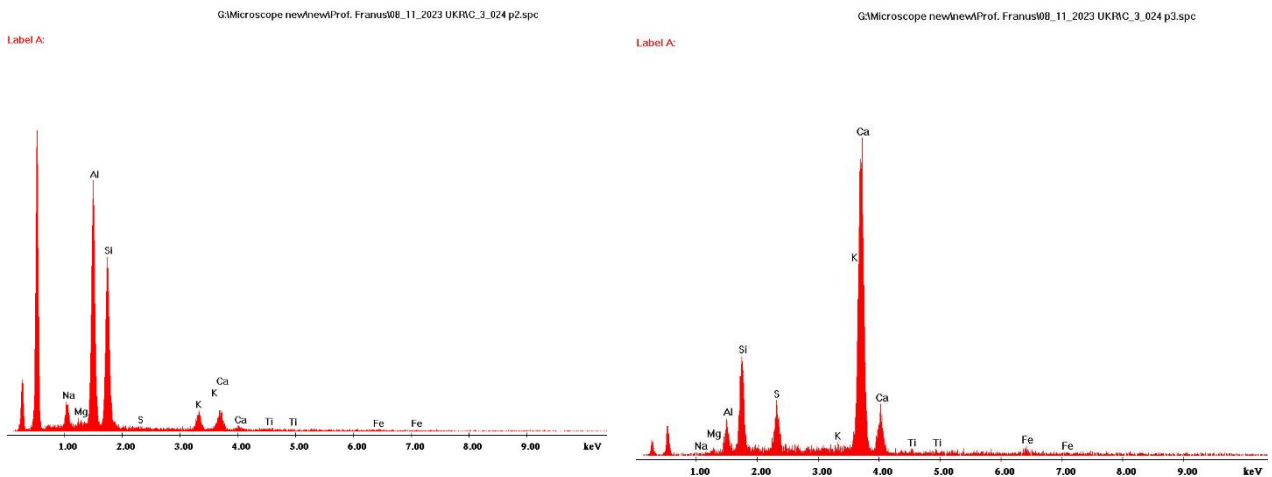


Рисунок 3.8 – Мікрофотографії (а, б) та спектри рентгенівського випромінювання (в, г) цементного каменю на основі 75 мас.% ПЦ І+25 мас.% Na-X, що тверднув 7 діб в нормальних умовах

Дослідження мікроструктури цементного каменю з добавкою штучного цеоліту Na-P1 свідчить про особливості його гідратації порівняно з іншими складами. При синтезі такого мінерального компонента в його складі присутня деяка кількість золи, з якої його одержують. На мікрофотографії (рис. 3.10, а) можна спостерігати різні кристалічні гідратні утворення: пластинки портландиту (рис. 3.10, б), непрореаговану золу (рис. 3.10, в), а також гідросилікати кальцію (рис. 3.10, г).



a



б

в

Рисунок 3.9 – Мікрофотографія (а) та спектри рентгенівського випромінювання (б, в) цементного каменю на основі 75 мас.% ПЦ І+25 мас.% Na-X, що тверднув 7 діб в нормальних умовах

Цікаво простежити процес взаємодії частинки золи в цементі (рис. 3.11, а, б). На мікрофотографії спостерігається частинка золи, пізніше видно перехідний шар, коли за рахунок оголення скловидної фази утворюються гідросилікати та гідроалюмінати кальцію (рис. 3.11, в, г). Це забезпечує підвищення ступеня закріплення частинок золи в масі гідратів цементного каменю.

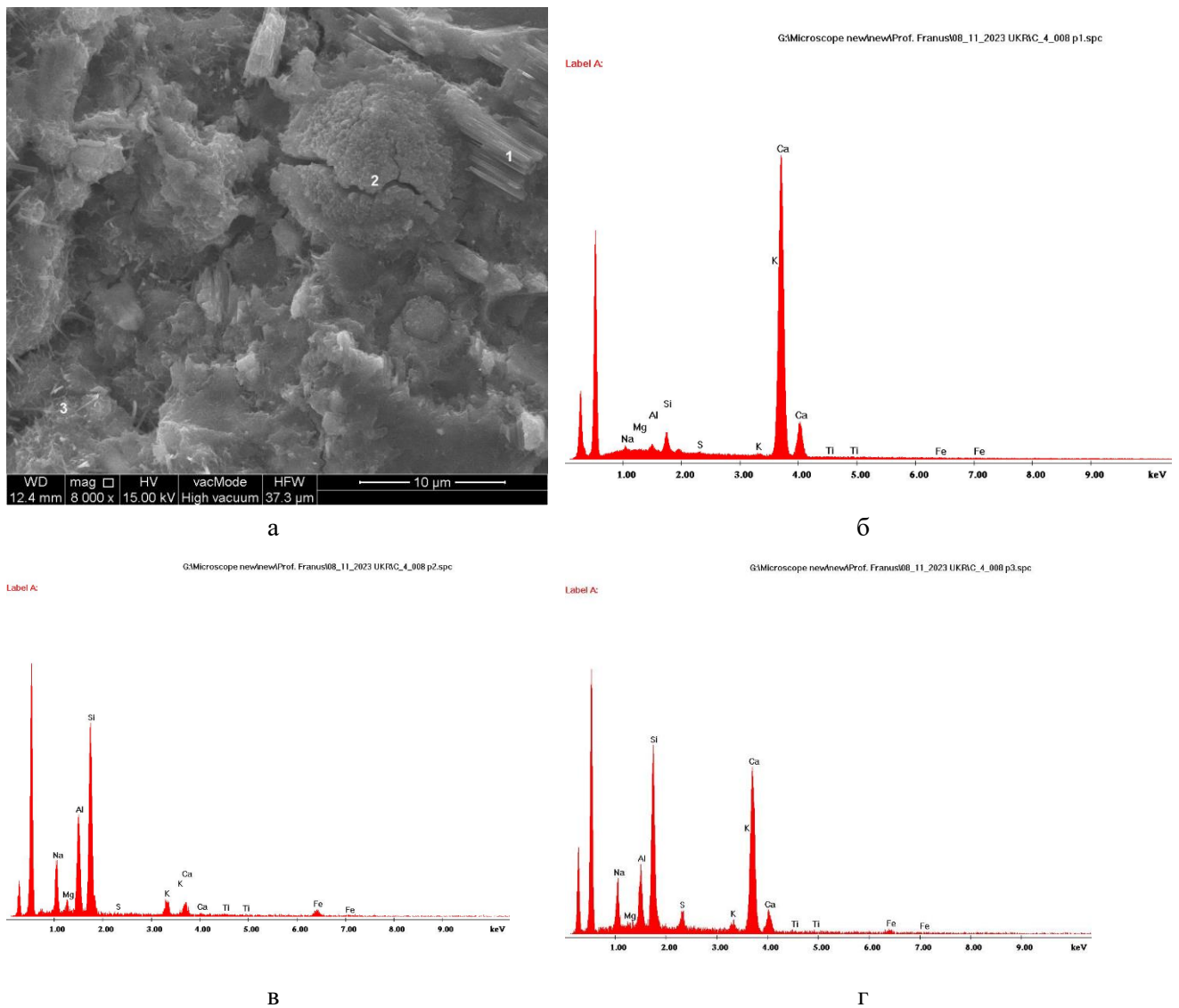


Рисунок 3.10 – Мікрофотографія (а) та спектри рентгенівського випромінювання (б, в, г) цементного каменю на основі 75 мас.% ПЦ І+25 мас.% Na-P1, що тверднув 7 діб в нормальних умовах

Таким чином, досліджені цеолітові матеріали будучи активним елементами цементної матриці і маючи наскрізно-каналну внутрішньокристалічну пористість забезпечують інтенсивне зародкоутворення. Тобто, при введенні до цементу пуцоланових матеріалів цеолітового типу пуцоланічна взаємодія відбувається в об'ємі кожної частинки. При цьому кристалічні новоутворення виділяються в об'єм тверднучої системи внаслідок чого формується щільна дрібнокристалічна структура цементного каменю з волокнами гідросилікатів, які забезпечують самоармування бетонів на мікроструктурному рівні.

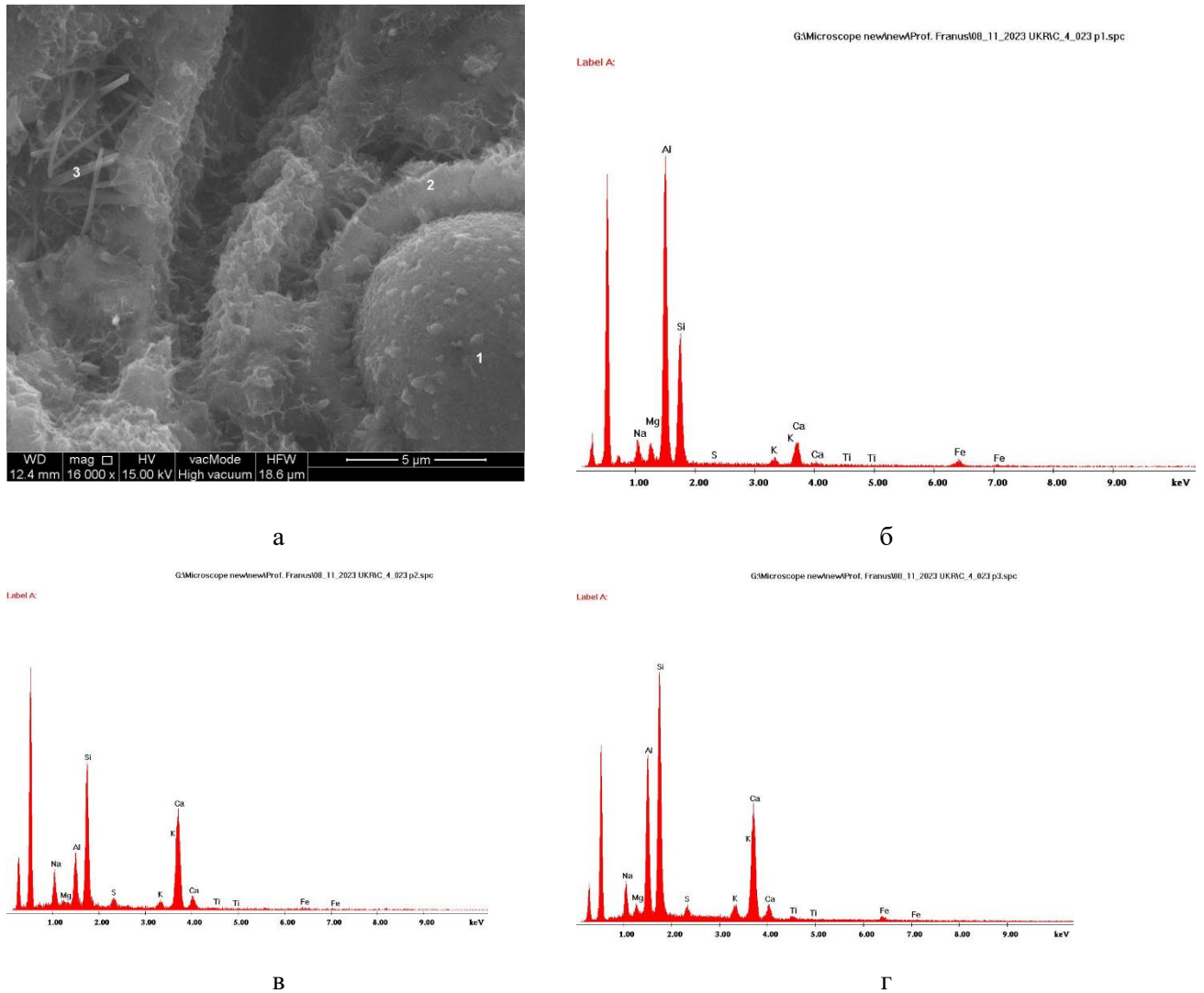


Рисунок 3.11 – Мікрофотографія цементного каменю 75 мас.% ПЦ I+25 мас.% Na-P1 (а) та спектри рентгенівського випромінювання (б, в, г), що тверднув 7 діб в нормальних умовах

Крім досліджених штучних пуцолан, проведені також випробування портландцементів та бетонів з добавками традиційних побічних продуктів промисловості. Незважаючи на значний розвиток науково-технічного прогресу, деякі промислові процеси все ще призводять до значного утворення відходів, які неможливо повністю захоронити і вони становлять значну проблему як для виробників, так і для довкілля [77, 85, 327]. Значне їх накопичення спостерігається щороку в усьому світі. Більшість цих промислових відходів є побічними продуктами, найпоширеніші серед яких є гранульований доменний шлак і зола-

винесення (ЗВ). Промисловість будівельних матеріалів є однією із сфер, де такі побічні продукти можуть утилізуватися у великих кількостях. Тому, крім досліджених штучних пуцолан, проведені випробування портландцементів та бетонів з цими добавками. Слід відзначити, що зола-винесення може використовуватися в технології бетону як мінеральна добавка, так і може бути сировиною для одержання штучних цеолітів.

Ступінь заміни портландцементу на мінеральні добавки визначається насамперед активністю останніх і регламентується допустимим зниженням міцності. Для підвищення ефективності мінеральних добавок проведено дослідження впливу тонини помелу гранульованого доменного шлаку та золи-винесення на міцність портландцементів і властивості бетонів, а також рівень заміни портландцементу без зниження міцності на стиск порівняно з контрольним складом бетону [4, 102, 312].

Гранульований доменний шлак можна вводити до портландцементу за двома схемами: шляхом спільного розмелення з компонентами цементу або після попереднього окремого розмелення до відповідної питомої поверхні. Другий спосіб є ефективнішим, оскільки дозволяє досягти більш повної реалізації потенційних гідравлічних властивостей гранульованого доменного шлаку. За першою схемою після спільного помелу розмір частинок шлаку залишається досить крупним, що зумовлено низькою розмелоздатністю останнього. Тому портландцемент і попередньо розмелений гранульований доменний шлак змішували в співвідношеннях, наведених у табл. 3.2.

Як видно з рис. 3.12, тонина помелу ГДШ суттєво впливає на міцність при стиску дрібнозернистого бетону (Ц:П=1:3, В/Ц=0,39). Так, міцність при стиску дрібнозернистого бетону (CS310) з 20 мас.% ГДШ з питомою поверхнею 310 м²/кг нижча на 34, 21 та 16%, ніж у контрольного дрібнозернистого бетону (С) через 2; 7 і 28 діб тверднення відповідно. Збільшення тонини помелу ГДШ викликає поступове зростання міцності як у ранньому, так і в пізньому віці порівняно з CS310. Міцність на стиск дрібнозернистого бетону CS380 знижується тільки на 6% через 28 діб тверднення, тоді як CS500 майже досягає міцності на стиск

контрольного складу. Проте для подальших досліджень використовували ГДШ з питомою поверхнею 380 м²/кг, оскільки процес розмелення шлаку до 500 м²/кг є енергомістким процесом і підвищує собівартість продукту. Крім того, ГДШ з кожним роком стає все дорожчим на ринку і виробники змушені шукати інші мінеральні добавки на заміну шлаку.

Таблиця 3.2 – Склади портландцементів і тонины помелу пуцоланових матеріалів

Ідентифікація сумішей	Вміст компонентів, мас.%			Питома поверхня, м ² /кг		A ₀₀₈ , %	
	Портланд-цемент	ГДШ	ЗВ	ГДШ	ЗВ	ГДШ	ЗВ
С0	100	0	0	-	-	-	-
СS310	80	20	0	310	-	6,0	-
СS380	80	20	0	380	-	5,4	-
СS500	80	20	0	500	-	4,8	-
CF5(310)	95	0	5	-	310	-	14,4
CF5(510)	95	0	5	-	510	-	1,3
CF10(310)	90	0	10	-	310	-	14,4
CF10(510)	90	0	10	-	510	-	1,3
CF15(310)	85	0	15	-	310	-	14,4
CF15(510)	85	0	15	-	510	-	1,3
СS15(380)F5(310)	80	15	5	380	310	5,4	14,4
СS10(380)F10(510)	80	10	10	380	510	5,4	1,3

Для покращення властивостей в'язучих систем використовували також широкоживаний побічний продукт, такий як зола-винесення, яку необхідно утилізувати. Питома поверхня золи-винесення може бути різною і коливатись в широких межах на ТЕС. У дослідженнях використовували неактивовану золу-винесення з питомою поверхнею 310 м²/кг та 510 м²/кг. Портландцемент ПЦ І-500

замінено на 5 (CF5(310), CF5(510)), 10 (CF10(310), CF10(510)) і 15 мас.% (CF15(310), CF15(510)) золи-винесення. Отримані результати представлені на рис. 3.13.

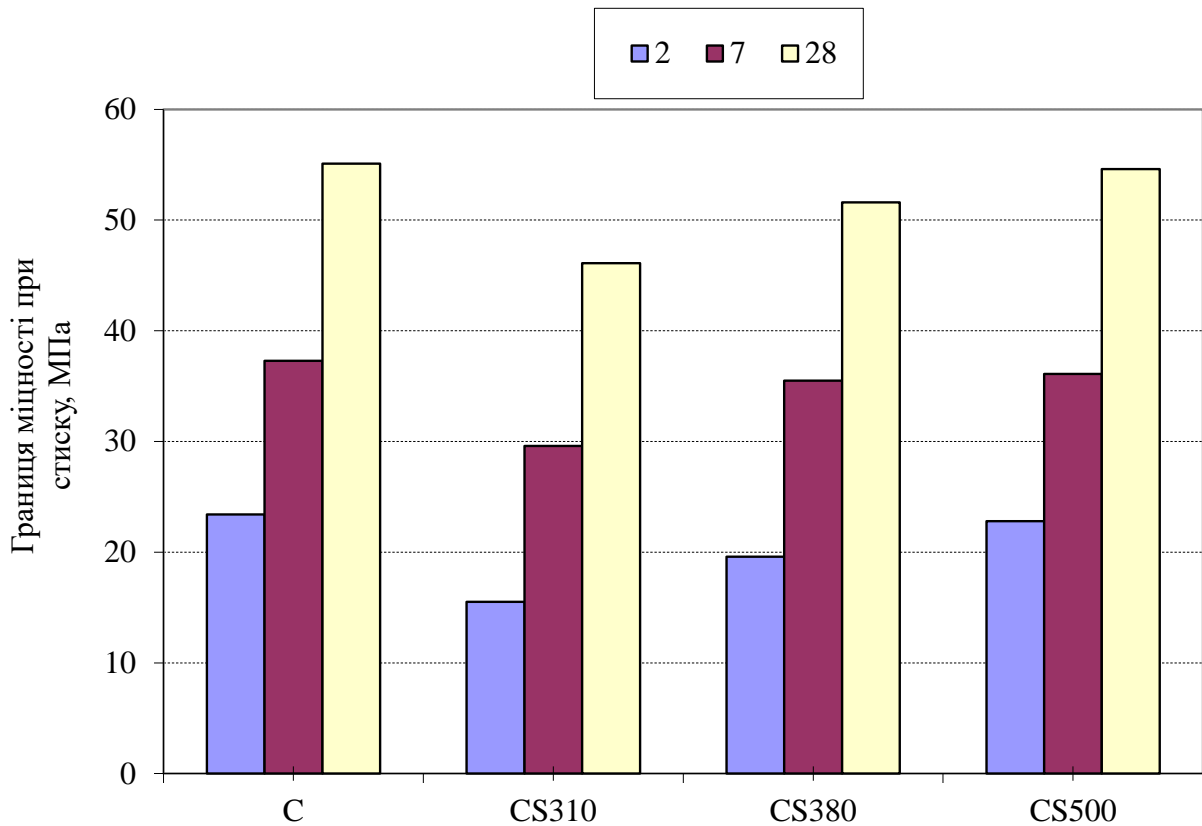
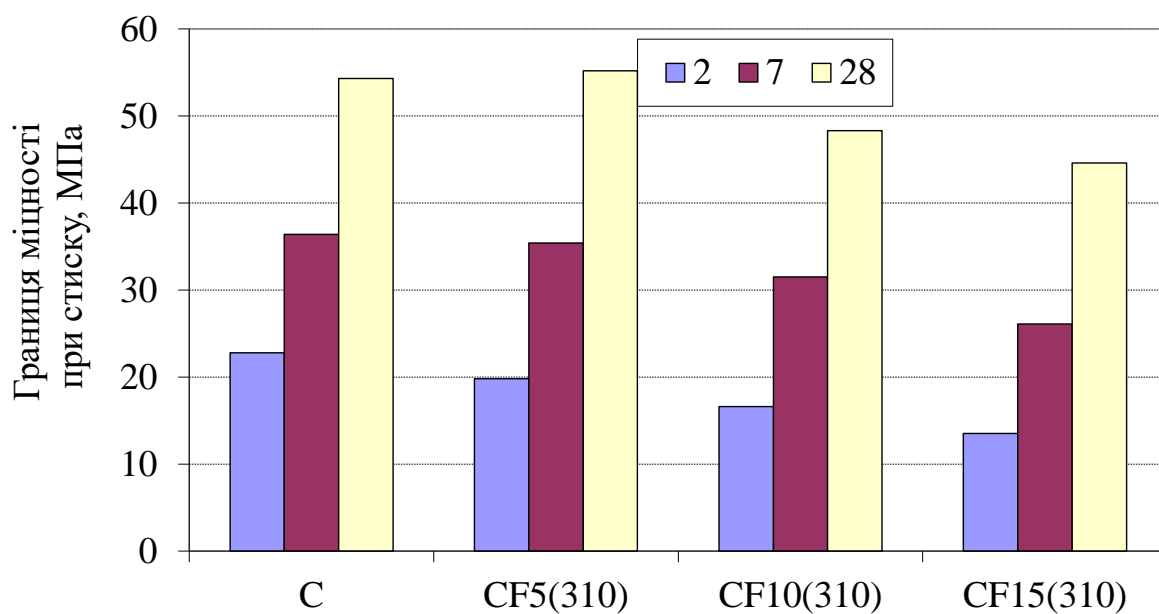
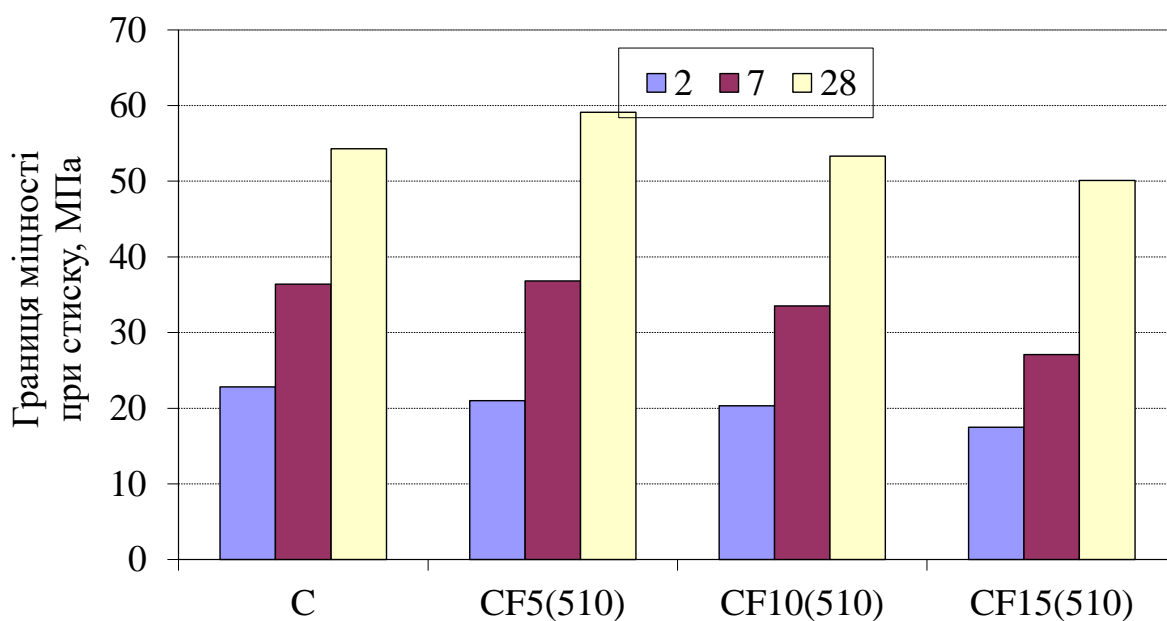


Рисунок 3.12 - Міцність на стиск портландцементів з добавкою шлаку

Як видно з результатів досліджень, у дрібнозернистих бетонах CF10(310) і CF15(310) спостерігається зниження міцності на стиск. Nisoara та ін. [199] спостерігали таку ж тенденцію. Саницьким та ін. [103] також встановлено, що рівень заміни портландцементу золою-винесення підвищується до 40 мас.% за рахунок її механічної активації, але незначне зниження міцності відбулося у всі терміни тверднення порівняно з активованим портландцементом. Ефективність механоактивації довели також Барабаш та ін. [144]. Слід відзначити, що міцність на стиск дрібнозернистого бетону CF5(310) знижується в ранньому віці (2 та 7 діб), але пізніше спостерігається зростання міцності, яка перевищує міцність на стиск контрольного дрібнозернистого бетону С через 28 діб.



a



б

Рисунок 3.13 - Міцність на стиск портландцементів, що містять золу-винесення, з питомою поверхнею 310 м²/кг (а) та 510 м²/кг (б)

Ступінь заміни портландцементу золю-винесення залежить від питомої поверхні [62, 87]. Пуцоланова реакція відбувається на поверхні розділу фаз, в результаті чого дрібнодисперсні матеріали реагують швидше [260, 318]. Зола-винесення з питомою поверхнею $310 \text{ м}^2/\text{кг}$ може замінити лише 5 мас.% портландцементу без зниження міцності на стиск. Водночас використання золи-винесення з більшою питомою поверхнею ($510 \text{ м}^2/\text{кг}$) дає змогу підвищити ступінь заміни портландцементу до 10 мас.% без зниження міцності через 28 діб (рис. 3.13).

Доведено ефективність поєднання мінеральних добавок різної природи активності – гідравлічної дії (ГДШ) і пуцоланічної (ЗВ). При цьому досліджено міцність на стиск дрібнозернистих бетонів, що містять 10 і 15 мас.% ГДШ, а також 5 і 10 мас.% золи-винесення з питомою поверхнею $310 \text{ (CS15(380)F5(310))}$ і $510 \text{ м}^2/\text{кг} \text{ (CS10(380)F10(510))}$. Для порівняння використано дрібнозернистий бетон, що містить 20 мас.% ГДШ (CS20(380)). Вищезазначені дрібнозернисті бетони, що містять таку саму кількість пуцоланових матеріалів (20 мас.%), досліджували та порівнювали з контрольним С.

Результати досліджень свідчать, що механічна міцність дрібнозернистого бетону, який містить 20 мас.% ДГШ, нижча порівняно з контрольним складом бетону (рис. 3.14). Однак кінетика приросту міцності дрібнозернистих бетонів, у яких портландцемент замінено на комплекс ГДШ +ЗВ, нижча протягом 2 діб. Разом з тим, завдяки синергічному ефекту поєднання цих двох добавок набір міцності прискорюється. Так, міцність на стиск дрібнозернистих бетонів CS10 (380)F10(510) та CS15(380)F5(310) перевищує міцність контрольного дрібнозернистого бетону через 28 діб. Наявність цього ефекту також підтверджено багатьма дослідниками [103, 208, 318, 339].

Методом скануючої електронної мікроскопії досліджено особливості формування мікроструктури цементного каменю без мінеральних добавок та з вмістом 15 мас.% ГДШ і 5 мас.% золи-винесення. Як показано на рис. 3.15, а, при взаємодії портландцементу з водою утворюється значна кількість продуктів гідратації, зокрема портландит, який традиційно спостерігається в цементному

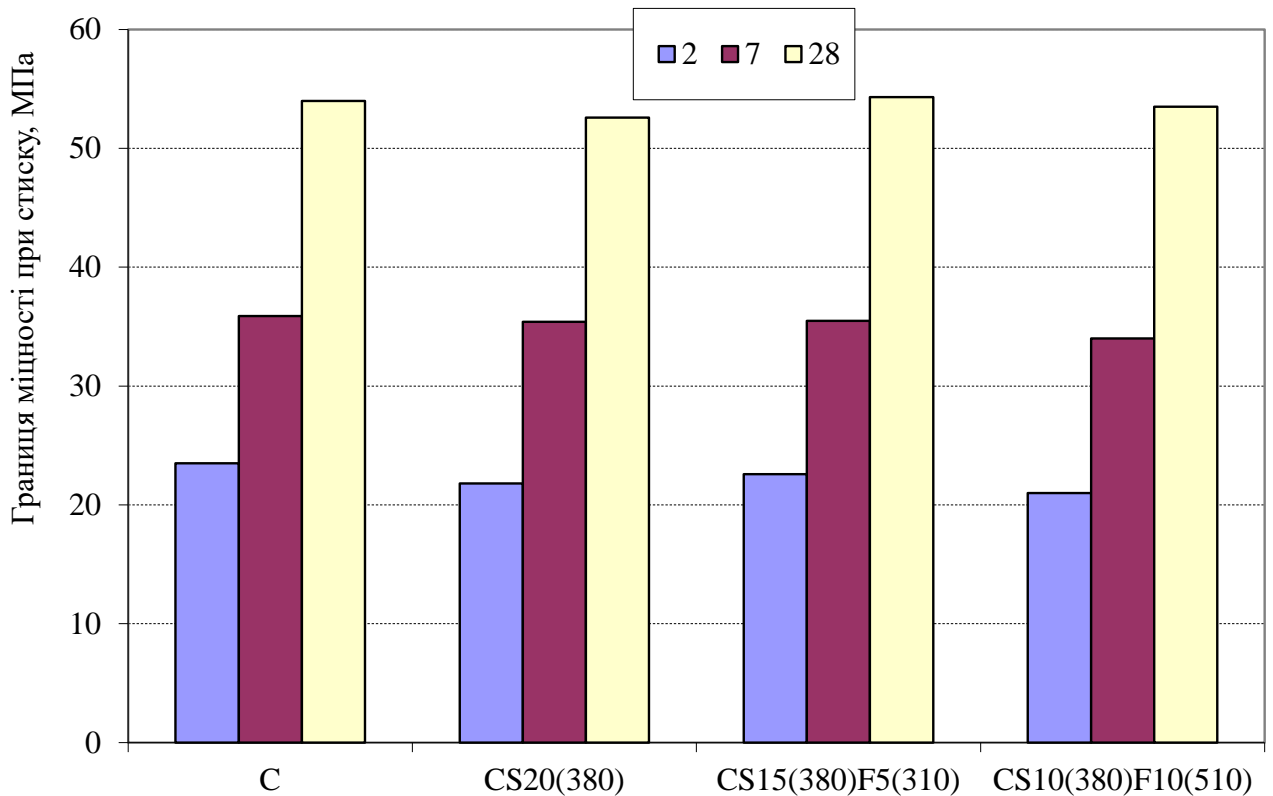
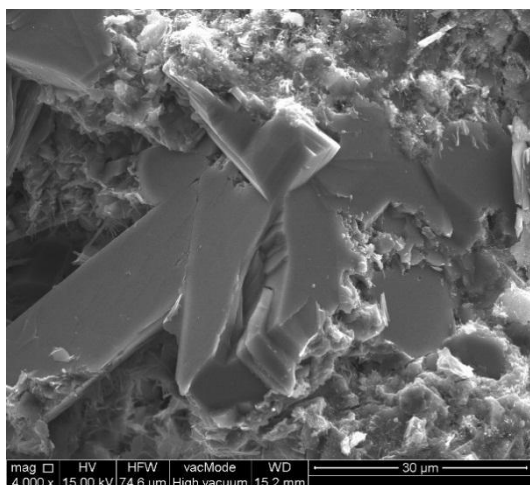
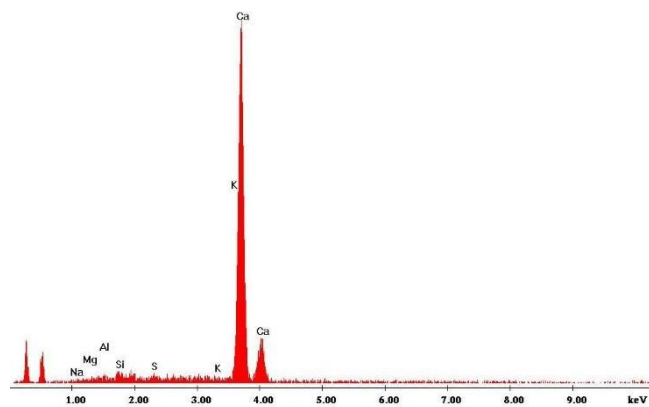


Рисунок 3.14 - Міцність портландцементів на стиск

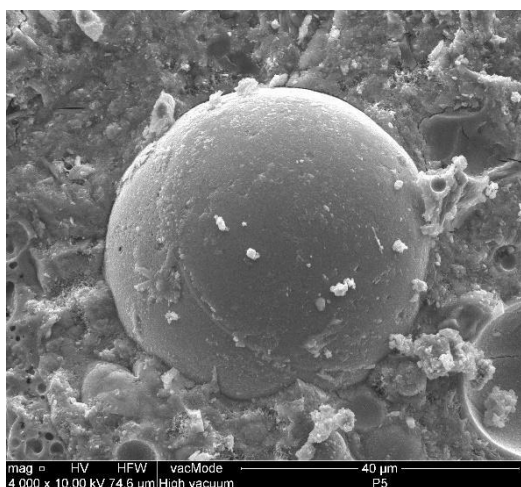
камені без мінеральних добавок, що підтверджено спектрами EDS (рис. 3.15, б). Камінь на основі портландцементу з ГДШ та золю-винесення характеризується щільною мікроструктурою за рахунок утворення додаткової кількості волокнистих кристалів гідросилікатів, голчастого еtringіту та гідроалюмосилікатів у неклінкерній частині, про що свідчать результати мікрозондового аналізу (рис. 3.15, д), при цьому добавки ГДШ і зола-винесення є джерелами активних SiO_2 і Al_2O_3 . Продукти гідратації заповнюють вільний простір цементної матриці, а також утворюються на поверхні золи-винесення (рис. 3.15, в). Неактивована зола-винесення також оптимізує розподіл частинок за розмірами у в'язучій системі та забезпечує подовжений час гідратації цементу, що з часом призводить до отримання більш однорідної та компактної структури. В результаті відбувається кольматація пор (рис. 3.15, г) і зростання міцності цементної матриці.



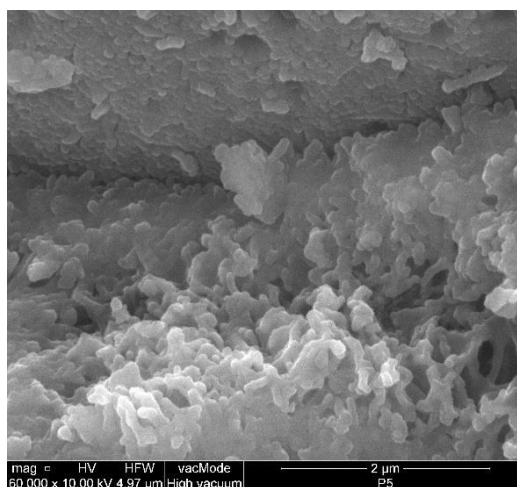
а



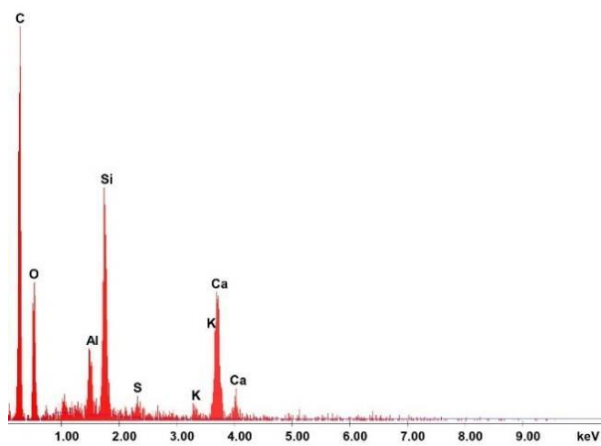
б



в



г



д

Рисунок 3.15 - Мікроструктура та спектри рентгенівського випромінювання цементної матриці бетону без пуцоланових матеріалів (а, б) та з 15 мас.% ГДШ і 5 мас.% золи-винесення (в, г, д)

Отже, ГДШ і зола-винесення можуть успішно застосовуватися в оптимальних кількостях в технології виробництва бетону з підвищеною міцністю як замітники портландцементу при врахуванні вищенаведених факторів. Запроектовані склади модифікованих бетонних сумішей наведено в табл. 3.3. Осадка конуса змінювалася в межах 190 - 200 мм.

Таблиця 3.3 – Склади бетонних сумішей

Ідентифікація сумішей	Портланд-цемент, кг/м ³	ГДШ, кг/м ³	ГДШ, %	ЗВ, кг/м ³	ЗВ, %	Пластфікатор, мас.%	В/Ц
С	350	-	-	-	-	0,9	0,59
CS20(380)	280	70,0	20	-	-	0,9	0,59
CS15(380)F5(310)	280	52,5	15	17,5	5	0,9	0,55
CS10(380)F10(510)	280	35,0	10	35,0	10	0,9	0,53

Примітка: П = 690 кг/м³ і Щ_(5-20 мм) = 1150 кг/м³.

Як видно з рис. 3.16, заміна 20 мас.% портландцементу на ГДШ (310) призводить до зниження міцності на стиск на 34,9% порівняно з контрольним. Проектна марка за легкоукладальністю такої бетонної суміші досягається при однаковому В/Ц відношенні. Бетонна суміш, що містить 15 мас.% ГДШ і 5 мас.% золи-винесення (310), характеризується кращою легкоукладальністю, оскільки сферичні частинки ЗВ створюють ефект роликотітшипника і покращують пластичність. Це дозволяє отримати проектну осадку конуса при меншому В/Ц відношенні, яке дорівнює 0,55. При збільшенні вмісту ЗВ з 5 (F5(310)) до 10 мас.% (F10(510)) і зменшенні кількості ГДШ (380) з 15 до 10 мас.% водоцементне відношення зменшується з 0,59 до 0,55, викликаючи незначне збільшення міцності на стиск через 2 доби тверднення порівняно з бетоном, що містить 20 мас.% ГДШ (380). Слід відзначити, що зниження міцності на стиск бетонів, що містять ГДШ і ЗВ, через 14 діб зменшується, потім вирівнюється і навіть перевищує міцність бетонів С і CS20(380) через 56 діб тверднення. Ghais та ін. [299] також підтвердили, що додавання 10 мас.% золи-винесення підвищує міцність бетону. Tan та ін. [346]

прийшли до висновку, що міцність на стиск бетону, що містить 10 мас.% тонкомеленої золи-винесення та 10 мас.% тонкомеленого доменного гранульованого шлаку, підвищується у всі терміни тверднення. Відбувається краще ущільнення частинок і утворюється більш щільна структура [82, 83]. Це призводить до покращення міцності на стиск в більш пізні терміни тверднення і одержання найвищої міцності (50,6 МПа) бетону CS10(380)F10(510) у віці 56 діб (рис. 3.16).

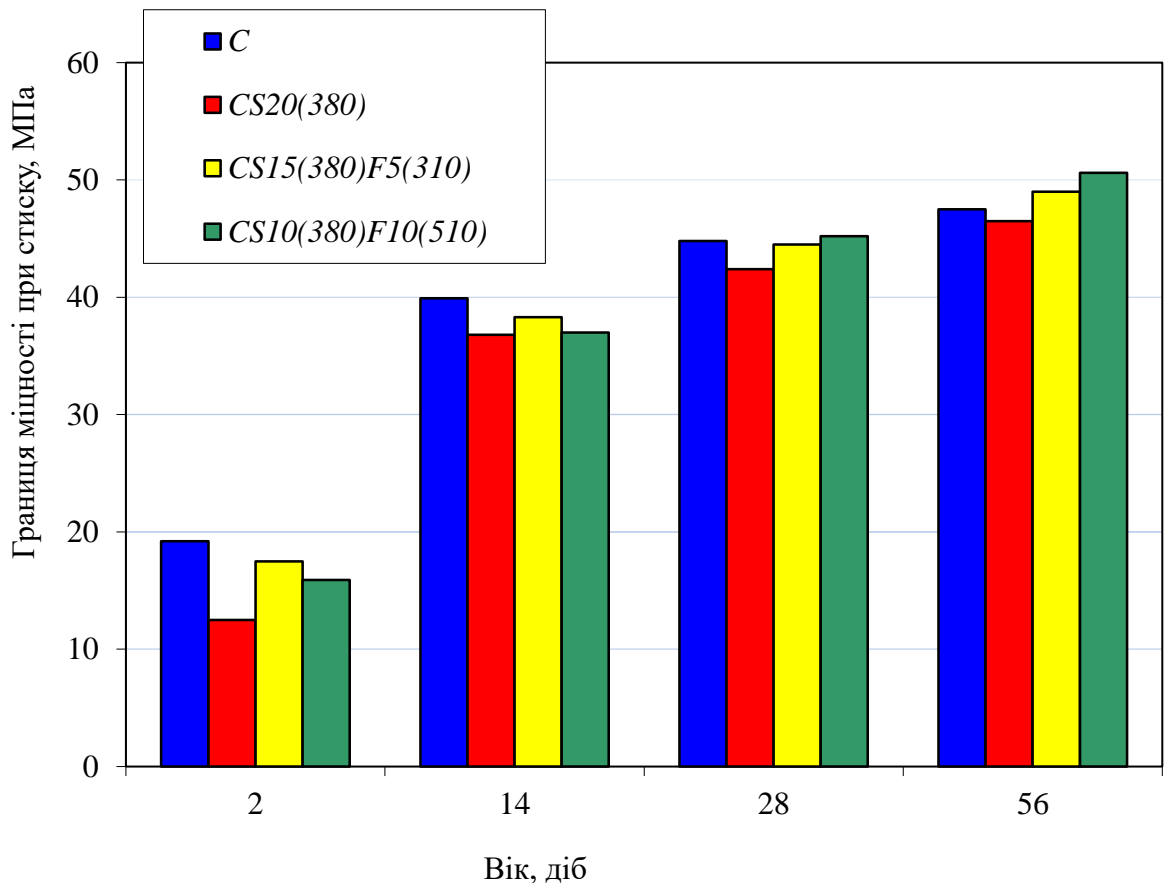


Рисунок 3.16 - Міцність бетонів на стиск

Результати визначення водопоглинання підтвердили позитивний ефект раціонального підбору пуцоланових матеріалів та їх поєднання з урахуванням індивідуальних властивостей усіх складових для отримання синергетичного ефекту. На рис. 3.17 показано, що бетони, що містять ГДШ і ЗВ характеризуються меншим водопоглинанням внаслідок більш щільної мікроструктури.

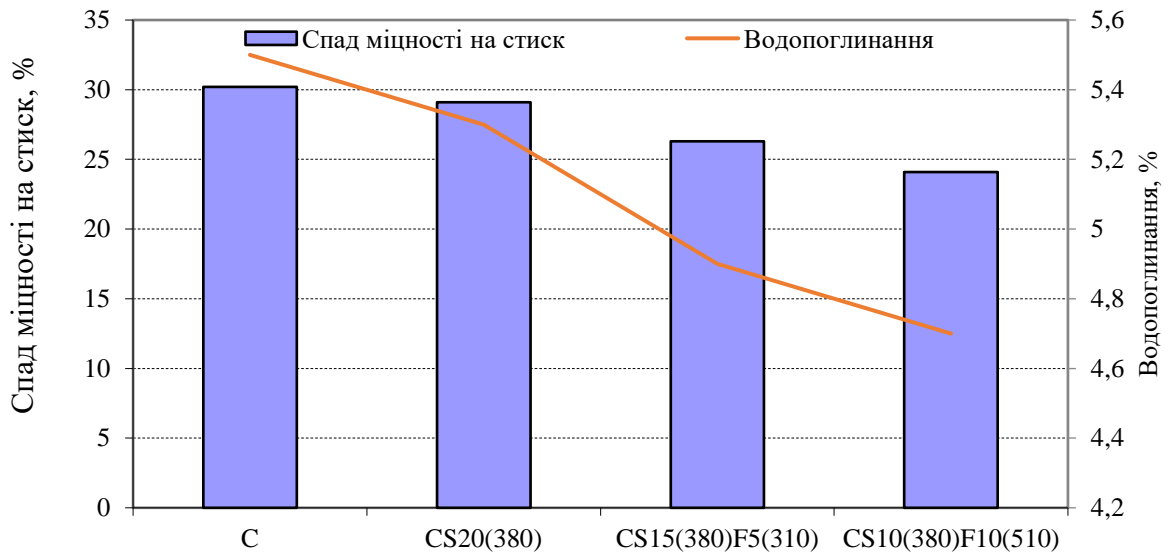


Рисунок 3.17 - Водопоглинання та спад міцності на стиск бетонів після 100 циклів заморожування/відтавання

Досліджено також міцність бетону через 100 циклів поперемінного заморожування/відтавання, оскільки це один з показників, який визначає довговічність бетону. Якщо бетон у водонасиченому стані піддається поперемінному заморожуванню і відтаванню, вода замерзає і розширюється приблизно на 9%. Відсутність достатнього простору для розміщення цього додаткового об'єму призводить до створення руйнівних напружень, якщо вони перевищують міцність бетону на розрив, це може з часом спричинити його розтріскування, утворення сколів та розкришування [173, 342]. Гідравлічний і осмотичний тиск викликають подальше збільшення руйнування. Якщо вода замерзає в повністю заповнених водою порах, незамерзлу воду потрібно транспортувати в порожні пустоти через капілярні та гелеві пори цементного каменю, створюючи гідравлічний тиск, який залежить від відстані між порами та розмірів капілярних пор. Більша відстань і дрібніші пори призводять до збільшення тиску, який буде додатково посилюватися осмотичним тиском, що викликає зовнішнє і внутрішнє пошкодження бетону [314].

Спад міцності на стиск досліджених бетонів показано на рис. 3.17. Як видно з отриманих результатів, спад відбувається поступово з 30,2% для контрольного

бетону до 24,1% для бетону, що містить 10 мас.% ГДШ (380) і 10 мас.% ЗВ (510) через 100 циклів заморожування/відтаювання. Łukowski та ін. [261] спостерігали деяке погіршення морозостійкості бетону, що містить шлак, але з цих досліджень не зрозуміло, якою була питома поверхня ГДШ. Lindvall та ін. [257] стверджують, що бетон із золою-винесення має морозостійкість, подібну до бетону на основі ПЦ І, якщо максимальний її вміст становить 25 мас.% при $V/C \leq 0,45$. Більш висока стійкість бетону CS10(380)F10(510) до пошкоджень при замерзанні та відтаюванні досягається за рахунок поліпшення структури пор. Більша кількість волокнистоподібних гідросилікатів кальцію, отриманих внаслідок пуцоланової реакції, призводить до зменшення капілярної пористості та самоармування бетону на рівні мікроструктури, що містить ГДШ та ЗВ. Це підтверджує ефективність одночасного поєднання цих активних мінеральних добавок різної природи активності.

Заміна портландцементу на пуцоланові матеріали в бетонах також призводить до зменшення вмісту клінкеру та, як наслідок, кальцію гідроксиду, який утворюється під час гідратації портландцементу та відповідає за створення захисного пасивного шару на арматурі, забезпечуючи високу лужність середовища. Тому проводили дослідження корозійної стійкості арматурних стрижнів у таких бетонах [270, 312]. Як видно з рис. 3.18, різниця між густиною струму поверхні робочого електрода була дуже малою до напруги 0,5 В. Якщо вихідний сигнал потенціостата підняти до значень, що перевищують 0,5 В, густина струму зростає більше для бетону з вмістом 10 мас.% ДГШ (380) і 10 мас.% ЗВ (510) через 28 діб тверднення порівняно з контрольним дрібнозернистим бетоном. Густина струму становить 40,9 і 63,5 мкА/см² при 1 В для RCC і RTC відповідно. Оскільки 20 мас.% портландцементу було замінено на пуцоланові матеріали, вміст кальцію гідроксиду в затверділому бетоні RTC зменшився внаслідок проходження пуцоланової реакції. Тому, ймовірно, менш ефективний пасивний шар сформувався на арматурі. Відхилення густини струму порівнюваних бетонів з часом зменшилося до 7,1 мкА/см² через 90 днів і навіть майже вирівнялося через 180 днів при потенціалі 1 В завдяки утворенню більш щільної структури бетонів, які містять ГДШ і ЗВ. Polder

[304] також спостерігав зниження ризику корозії сталевій арматури в такій в'язучій системі, навіть у середовищах, забруднених хлоридами.

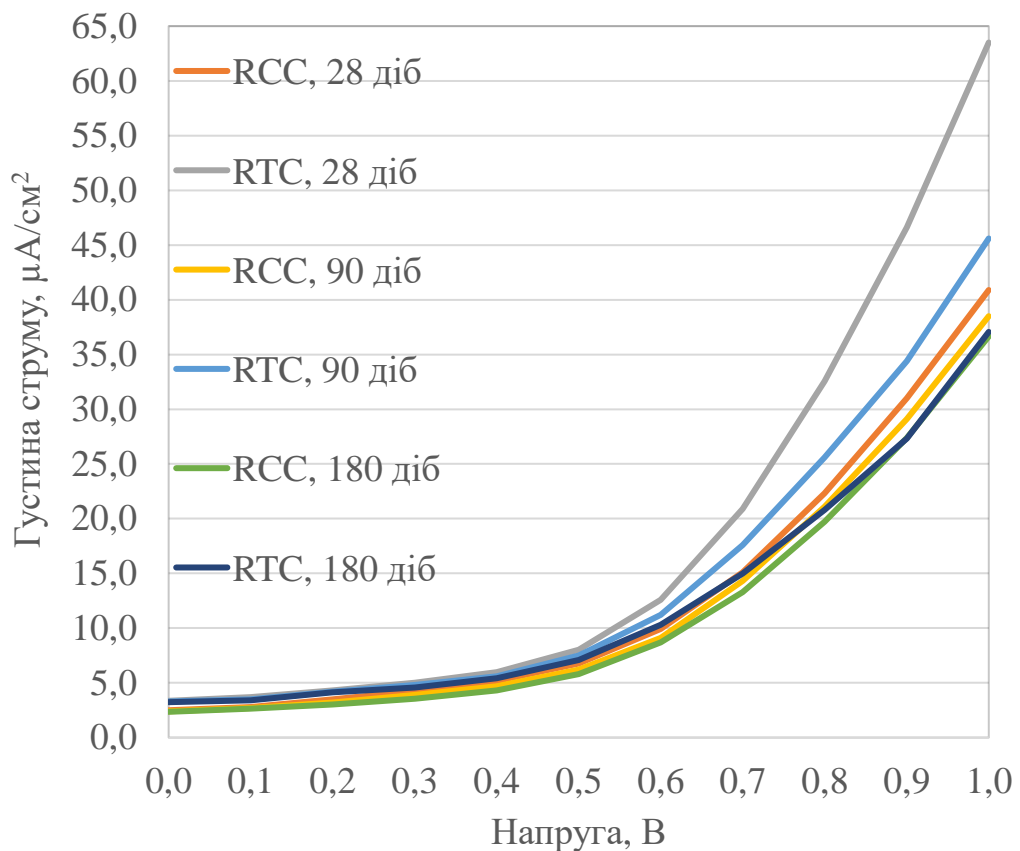


Рисунок 3.18 - Густина струму поверхні робочого електрода в контрольному бетоні (RCC) і в бетоні з 10 мас.% ГДШ та 10 мас.% золи-винесення (RTC) через 28, 90 і 180 діб тверднення

Бетони, що містять 20 мас.% пуцоланових матеріалів, мають кращу корозійну стійкість порівняно з бетоном на основі портландцементу ПЦ І. Захист сталевій арматури не погіршується в бетонах, що містять 10 мас.% ГДШ та 10 мас.% ЗВ завдяки низькому ступеню заміни портландцементу та більш щільній мікроструктурі з ефектом самоармування, що важливо для бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.

3.2. Вплив пуцоланових матеріалів на властивості в'язучих систем та бетонів

Слід відзначити, що скорочення виробництв і відповідне зменшення кількості побічних продуктів на теплових енергогенеруючих та металургійних підприємствах передбачає перехід на більш доступні пуцоланові матеріали. До таких матеріалів можна віднести природний цеолітовий туф. Цеолітові туфи як мінеральна добавка до цементів та бетонів, незважаючи на яскраво виражену кристалічну структуру, представляють значний інтерес, оскільки характеризуються необхідною пуцоланічною активністю та доступні у великій кількості [33, 137]. Пориста структура цеолітів забезпечує реалізацію додаткового позитивного ефекту – поглибленої гідратації портландцементів, що дає змогу знизити можливість тріщиноутворення внаслідок самообезводнення цементного каменю в умовах понижених водоцементних відношень.

З цією метою проведені дослідження впливу пористих мінеральних добавок цеолітового туфу і перліту, які відносяться до лугомістких кремнеземистих середньоалюмінатних матеріалів пуцоланічної природи активності. Хімічно і термодинамічно нестійкі фази зумовлюють їх значну активність.

Активність пуцоланових матеріалів залежить також від їх дисперсності. При збільшенні питомої поверхні спостерігається зростання активності, тому що саме у поверхневих шарах частинок мінеральних добавок починаються процеси взаємодії і лише з часом просуваються вглиб. В той же час, спостерігається збільшення водопотреби [8]. Це негативно впливає на фізико-механічні та експлуатаційні властивості бетонів з пуцолановими матеріалами.

Активність цеолітового туфу та перліту з різним розподілом частинок за розмірами визначали в модельних в'язучих системах за поглинанням СаО з насичених розчинів протягом 28 діб.

Результати рентгенофазового аналізу (рис. 3.19) підтверджують закономірне зростання активності обох матеріалів за кількістю зв'язаного вапна (табл. 3.4) при

збільшенні дисперсності. Як видно з рис. 3.19, інтенсивність ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (0,49; 0,263 нм) на дифрактограмах модельних систем « $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -цеолітовий туф» суттєво зменшується в складах з тонкодисперсним цеолітовим туфом порівняно з полідисперсним через 28 діб гідратації [1].

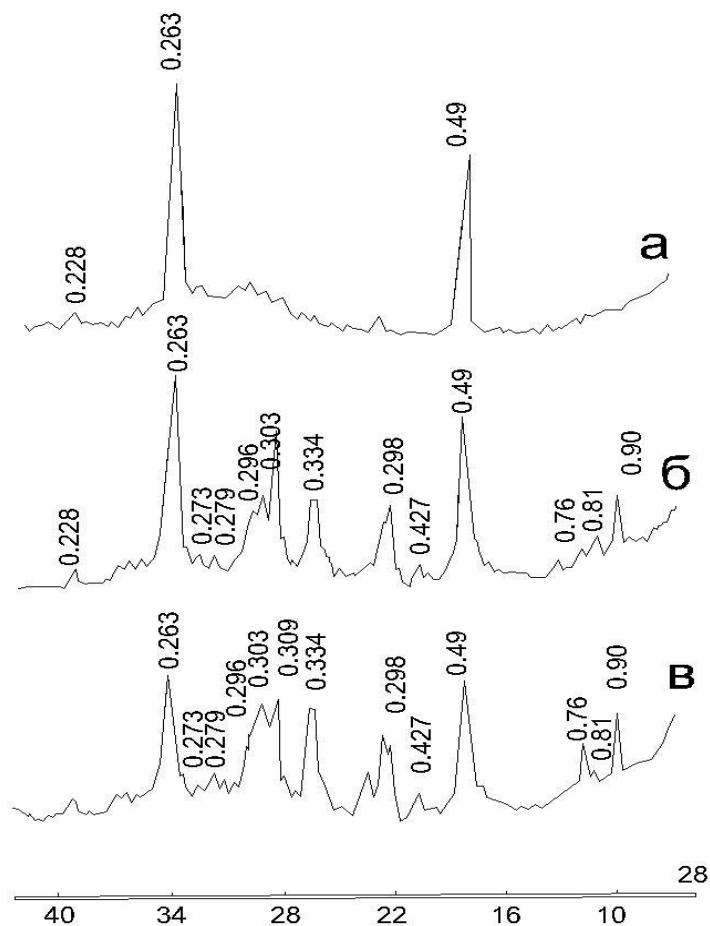


Рисунок 3.19 - Дифрактограми модельних систем, гідратованих 28 діб:
а - $\text{Ca}(\text{OH})_2$; б – CaO + ПЦТ (1:1); в – CaO + ТЦТ (1:1)

Підтверджена висока активність модельної системи « CaO – мінеральний компонент» (склад 1:1) при визначенні її в'язучих властивостей. В той же час, показано, що за міцністю перлітмісткі склади поступаються цеолітмістким. Як видно з результатів випробувань на міцність модельних систем, зростання дисперсності матеріалу призводить до зростання водопотреби на 10%, що спричиняє зниження міцності модельних систем порівняно системами з полідисперсними матеріалами ПЦТ та ПП. Слід зазначити, що при зростанні

водопотреби спостерігається суттєве зниження міцності на згин в 1,5-1,8 рази (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 - Властивості модельних в'язучих систем «СаО - дисперсний мінеральний компонент»

Мінеральний компонент	Активність за поглинанням СаО, мг/г	В/Т	Границя міцності у віці 28 діб, МПа	
			Rзг	Rст
ТЦТ	307	0,45	1,4	10,2
ПЦТ	270	0,41	2,5	14,8
ПТ	192	0,53	0,6	6,7
ПП	165	0,48	0,9	7,9

Отже, чіткої кореляції не спостерігається між міцністю та активністю мінеральних компонентів з різною дисперсністю за поглинанням СаО.

Активність пуцоланових матеріалів також досліджено згідно з європейськими нормами ДСТУ EN 450-1:2019 враховуючи, що пуцоланові реакції мінеральних добавок в портландцементних системах проходять за складнішою схемою, ніж просто взаємодія кальцію гідроксиду та аморфного кремнезему. Згідно з вимогами, коефіцієнт пуцоланічної активності через 28 діб тверднення повинен становити $K_{па}^{28} \geq 0,75$, а через 90 діб - $K_{па}^{90} \geq 0,85$.

За отриманими результатами випробувань (табл. 3.5), пуцоланова реакційна здатність за коефіцієнтом пуцоланічної активності визначена для мінеральних добавок (3.1).

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

Одержані коефіцієнти пуцоланічної активності свідчать про високий рівень пуцоланової реакційної здатності цеолітового туфу і дещо нижчий перліту. З часом тверднення спостерігається зростання коефіцієнтів пуцоланічної активності. Слід відзначити характерне збільшення коефіцієнта пуцоланічної активності при

випробуванні зразків полідисперсного цеолітового туфу на розтяг при згині порівняно з тонкодисперсним цеолітовим туфом.

Таблиця 3.5 - Пуцоланічна активність полідисперсних активних мінеральних добавок

В'язуче	Вміст, мас.%	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 ТЦТ	90 10	185	7,4/49,8	8,0/56,9	1,07/0,94	1,10/1,01
ПЦ I – 500 ПЦТ	90 10	175	7,6/48,7	8,3/53,4	1,1/0,92	1,14/0,95
ПЦ I – 500 ПТ	90 10*	180	7,2/46,7	7,4/50,6	1,04/0,88	1,01/0,90
ПЦ I – 500 ПП	90 10*	165	6,5/45,6	7,0/49,7	0,94/0,86	0,96/0,88

*об.%

Аналіз отриманих показників свідчить, що міцність портландцементів з добавкою цеолітового туфу є вищою порівняно з складом з добавкою перліту незалежно від їх дисперсності. Слід відзначити, що міцність на розтяг при згині портландцементу з добавкою цеолітового туфу перевищує міцність портландцементу ПЦ I-500 на 7,2-10,1 % (табл. 3.5). Вплив цеолітового туфу і перліту з різною дисперсністю на характеристики портландцементу досліджувався на складах, що містили 10 мас.% пуцоланових матеріалів і 90 мас.% портландцементу ПЦ I-500 з відповідним маркуванням ПЦ I+ПЦТ, ПЦ I+ПП, ПЦ I+ТЦТ, ПЦ I+ПТ (рис. 3.9-3.12).

Дослідженнями водопотреби портландцементів встановлено (рис. 3.20), що при введенні в їх склад таких пуцоланових матеріалів, незалежно від їх дисперсності і виду, спостерігається зростання водопотреби. При порівнянні впливу цеолітового туфу і перліту видно, що перліт призводить до суттєвішого збільшення водопотреби такого портландцементу, яке становить 3-6%, тоді як з

добавкою цеолітового туфу зростання становить всього 2-3%.

Полідисперсні пуцоланові матеріали, як ПЦТ так і ПП збільшують водопотребу портландцементу (рис. 3.20). Це пояснюється більш розвинутою поровою структурою полідисперсних пуцоланових матеріалів порівняно з тонкодисперсними.

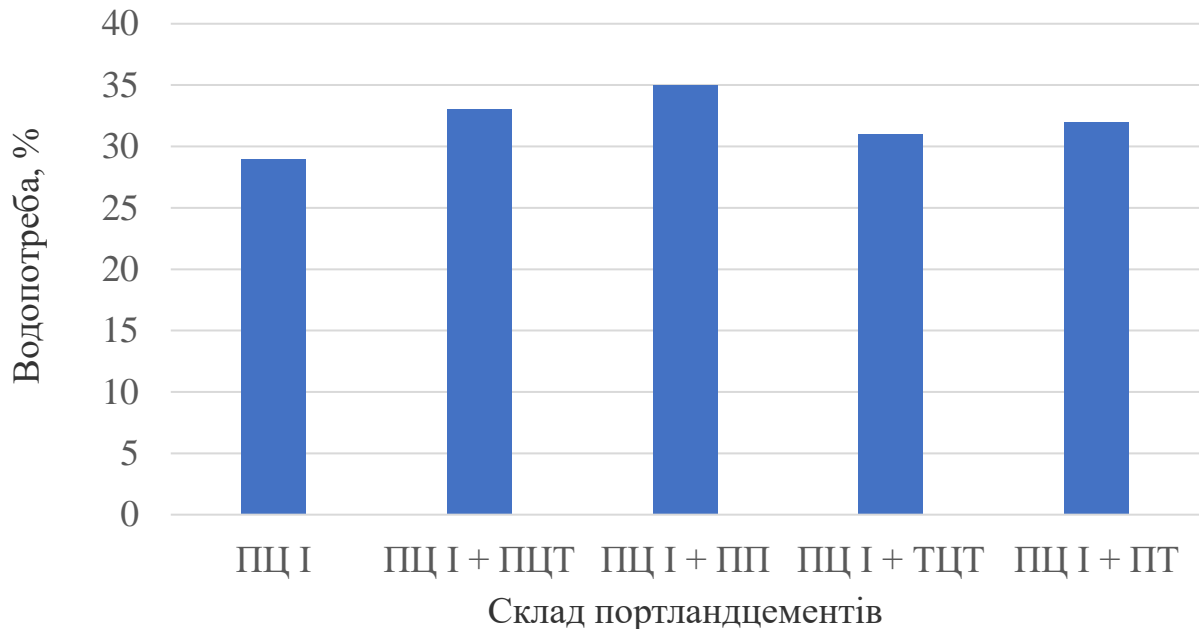


Рисунок 3.20 - Водопотреба в'язучого з добавкою 10 мас.% цеолітового туфу та перліту з різною дисперсністю

Із збільшенням водопотреби портландцементів з такими полідисперсними добавками важливе значення має водоутримувальна здатність, що сприяє рівномірному розподілу в тверднучій системі води. Результати досліджень свідчать (рис. 3.21), що при використанні у портландцементних в'язучих системах досліджуваних пуцоланових матеріалів покращується їх водоутримувальна здатність. Слід відзначити, що мінімальне водовідділення мають портландцементи з добавкою полідисперсних цеолітового туфу і перліту, внаслідок більш збереженої в процесі їх розмелювання пористості, в якій під дією капілярних сил в такому портландцементному в'язучому утримується додаткова резервна кількість води.

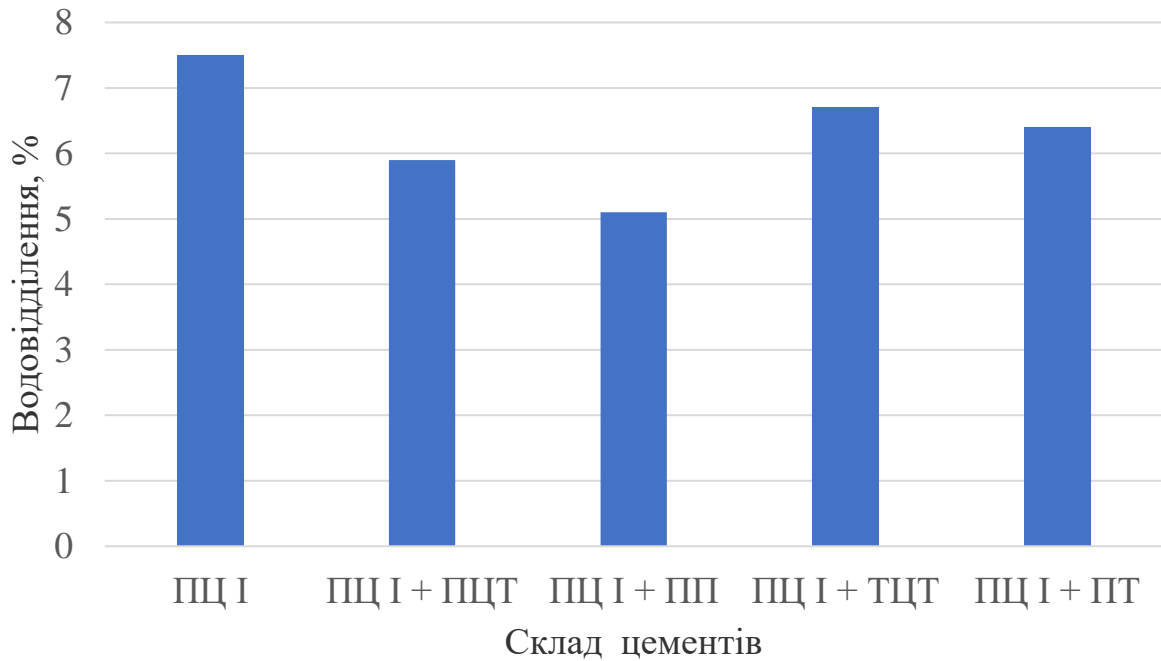


Рисунок 3.21 - Водовідділення портландцементів з добавкою 10 мас.% цеолітового туфу та перліту з різною дисперсністю

Терміни тужавіння в'язучих портландцементних систем, що містять цеолітові і перлітові мінеральні матеріали різної дисперсності, скорочуються (рис. 3.22). Так, при введенні тонкодисперсних перліт- і цеолітмістких матеріалів початок та кінець тужавіння портландцементу прискорюється на 20-25 хв і 10-15 хв відповідно. Скорочення термінів тужавіння, а особливо його початку, зумовлене швидкою втратою пластичності суміші внаслідок поступового поглинання тонкодисперсними пористими пуцолановими матеріалами води замішування. Разом з тим, у в'язучих з полідисперсним цеолітовим туфом і перлітом зменшення часу не перевищувало 5-10 хв.

При визначенні рівномірності зміни об'єму розширення за методом Ле Шательє для всіх портландцементів знаходиться в межах 1 мм. Це відповідає вимогам стандарту EN 197-1.

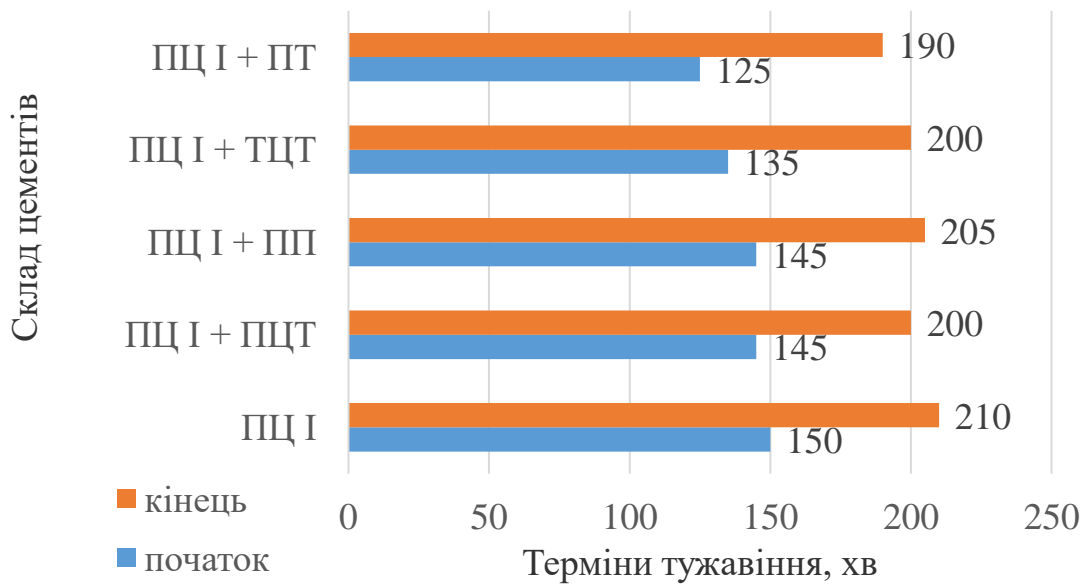


Рисунок 3.22 - Терміни тужавіння в'язучих з добавкою 10 мас.% цеолітового туфу та перліту різної дисперсності

Для оцінки і порівняння активності перлітових та цеолітових матеріалів різної дисперсності та складу вивчали їх вплив на границю міцності при стиску зразків (тісто нормальної густоти) в нормальних умовах тверднення (рис. 3.23).

Слід відзначити, що міцність усіх портландцементних в'язучих систем, незалежно від дисперсності і виду мінеральної добавки, в початковий період тверднення поступається портландцементу ПЦ I-500. Проте із збільшенням часу тверднення розрив в міцності між ними скорочується, і вже через 28 діб портландцементи з добавкою полідисперсного цеолітового туфу та дещо в меншій мірі портландцементи, що містять тонкодисперсний цеолітовий туф та перліт досягають міцності ПЦ I-500. У більш пізній період тверднення (через 42 доби) міцність портландцементу з 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу перевищує міцність ПЦ I-500 (рис. 3.23). В той час, як лише портландцемент, що містить полідисперсний перліт, характеризується найнижчою міцністю. Це пояснюється не тільки його підвищеною водопотребою, але й низькою міцністю частинок перліту в складі в'язучого (табл. 2.3).

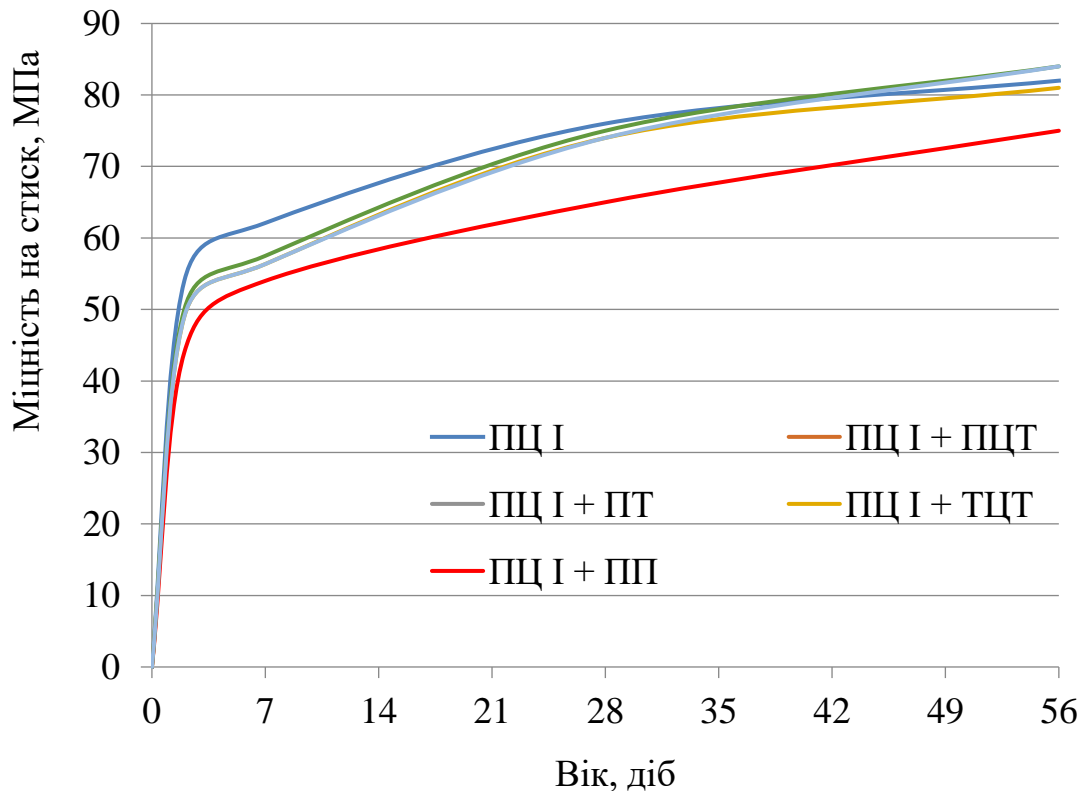


Рис. 3.23 - Міцність на стиск в'язучих з добавкою 10 мас.% цеолітового туфу та перліту різної дисперсності

Отже, серед досліджених пуцоланових матеріалів різної дисперсності, найбільшу активність, що зростає в часі, мають цеолітові матеріали, а особливо полідисперсний цеолітовий туф. Однак заміна портландцементу на цеолітовий туф вимагає застосування суперпластифікатора, щоб компенсувати втрату пластичності сумішню та міцності затверділого бетону [194, 330]. У зв'язку з цим, запроєктовано бетон з номінальним складом за масою 1:1,7:3,5 (марка за легкоукладальністю S3, Ц=340 кг/м³, В/Ц=0,5). Цеолітовий туф вводили замість частини портландцементу у кількості 4 та 8 мас.% [271]. Кількість пластифікатора змінювали в межах 0,4-1,0 мас.%. Дослідження показали, що бетонні суміші були однорідними без ознак розшарування чи водовідділення. Як видно з табл. 3.6, сумісне використання 4,0 мас.% цеолітового туфу та суперпластифікатора забезпечує зростання міцності бетону у всі терміни тверднення. Так, міцність бетону, модифікованого 4 та 8 % цеолітового туфу, а також 0,7 мас.%

суперпластифікатора, через 3 доби тверднення зростає на 22,9 та 27,1 % порівняно з бетоном, модифікованим 0,7 % суперпластифікатора. Через 28 діб тверднення модифіковані цеолітвмісні бетони досягають міцності 56,8-57,9 МПа, що перевищує міцність бетону, модифікованого 0,7 мас.% суперпластифікатора, в 1,2 рази. При збільшенні вмісту суперпластифікатора до 1 мас.% міцність бетону у всі терміни тверднення знижується.

Таблиця 3.6 – Вплив суперпластифікатора та цеолітового туфу на міцність бетону

	Супер- пластифікатор, мас.%	Цеолітовий туф, мас.%	Міцність на стиск, МПа, у віці, діб		
			3	7	28
1	0,4	0	28,9	37,9	50,5
2	0,7	0	26,2	36,1	47,8
3	1,0	0	21,4	32,7	47,1
4	0,4	4	29,7	36,7	56,8
5	0,7	4	32,2	40,4	55,8
6	1,0	4	24,7	32,7	46,9
7	0,4	8	25,5	32,1	46,2
8	0,7	8	33,3	38,3	57,9
9	1,0	8	19,9	28,2	44,4

Досліджено вплив цеолітового туфу та суперпластифікатора на водопоглинання та пористість бетонів, які є одними з найважливіших параметрів, які визначають довговічність бетону. Результати показали, що зі збільшенням вмісту цеолітового туфу водопоглинання бетону (рис. 3.24, а, б) і пористість (рис. 3.25, а, б) зростають приблизно на 6-10%.

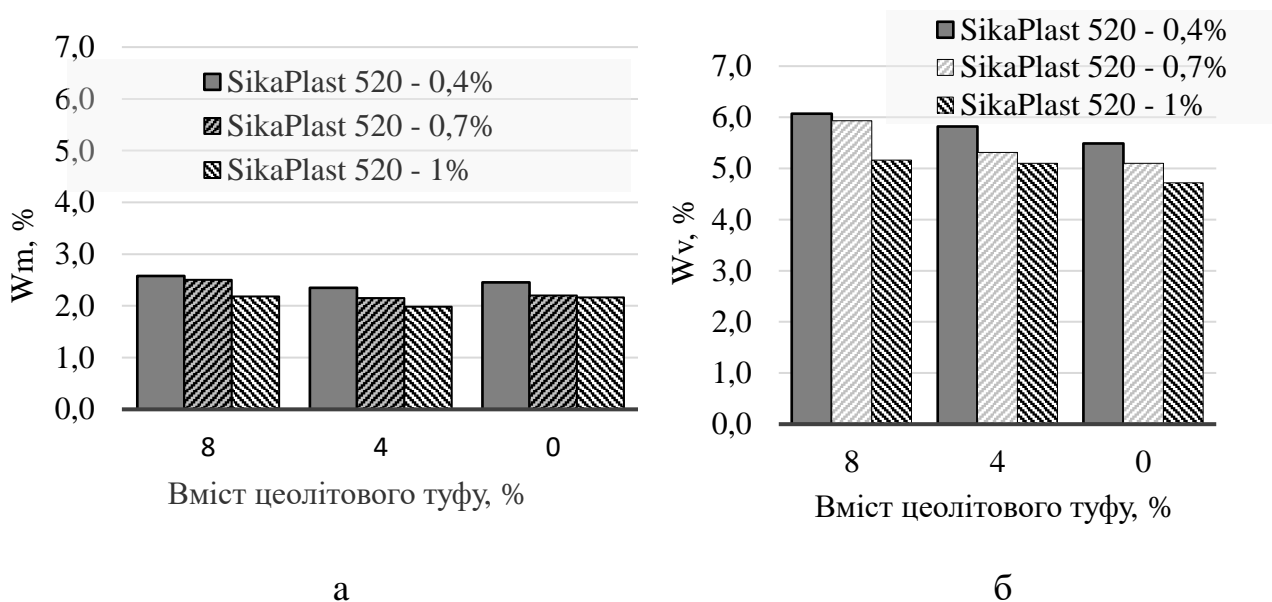


Рисунок 3.24 - Водопоглинання бетонів з різною кількістю цеолітового туфу та пластифікатора за масою (а) і за об'ємом (б)

У той же час, збільшення вмісту суперпластифікатора в бетоні призводить до ущільнення структури бетону та зниження водопоглинання і пористості приблизно на 10-30%. Загальна пористість бетонів з вмістом 8 мас.% цеолітового туфу вища порівняно з бетоном без мінеральної добавки.

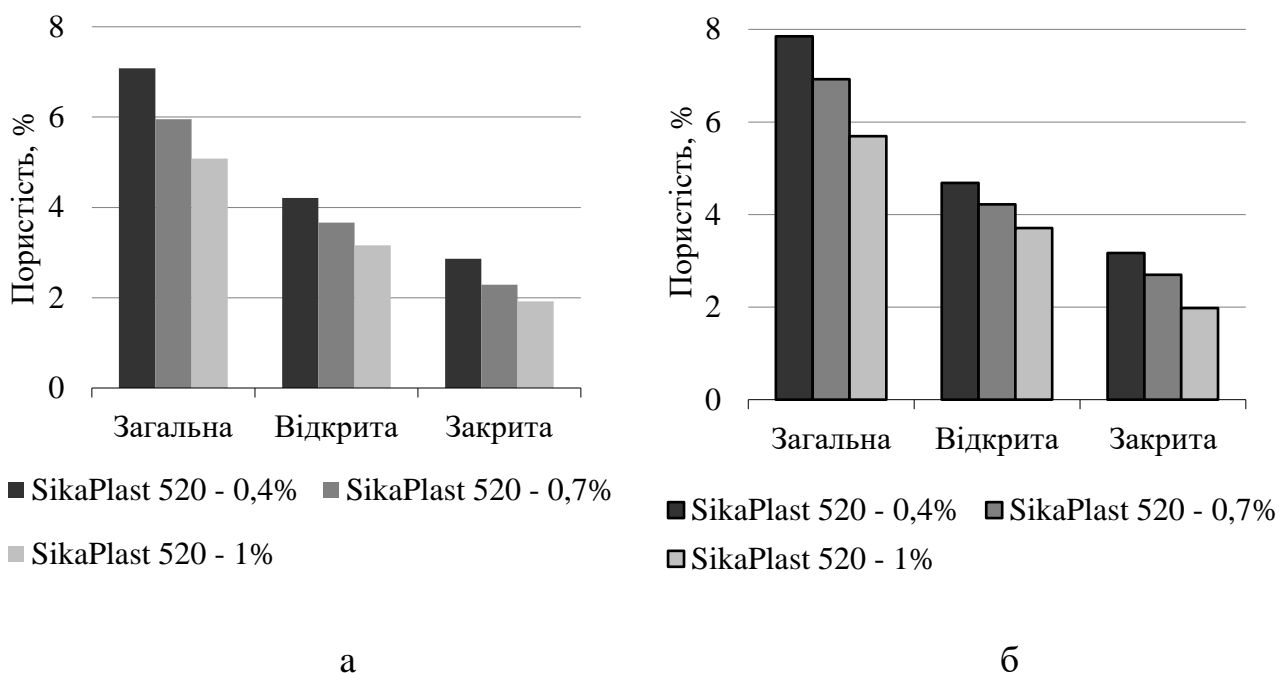


Рисунок 3.25 - Пористість бетону без (а) і з 8 мас.% (б) цеолітового туфу

Отже, введення пористих мінеральних добавок збільшують водопотребу портландцементу, що вимагає їх використання в комплексі з суперпластифікатором. При сумісному використанні цеолітового туфу та суперпластифікатора міцність на стиск бетонів зростає на 23-28 % за рахунок водоредукуючого ефекту суперпластифікуючої добавки, а також пуцоланічної реакції цеолітового туфу. Для встановлення максимально можливої заміни портландцементу на цеолітовий туф без зниження міцності доцільно провести оптимізацію його вмісту.

3.3. Бетони з підвищеною міцністю, модифіковані органо-мінеральними добавками

Для встановлення максимального ступеня заміни портландцементу на цеолітовий туф в бетонах з підвищеною міцністю проведено оптимізацію технологічних (рецептурних) параметрів. З практичної точки зору оптимізація кількості цеолітового туфу і суперпластифікатора в бетоні дозволяє отримати бетонну суміш з покращеними властивостями та забезпечує проектні параметри бетонів. Тому використано математичне планування експерименту для пошуку оптимальних технологічних параметрів і складів бетонів із необхідним комплексом властивостей [80]. Засоби математичного планування експерименту на основі експериментально-статистичних моделей сприяють вирішенню задач оптимізації складів бетонів з додатковими цементуючими матеріалами та хімічними добавками. Для оптимізації вмісту цеолітового туфу та суперпластифікатора в бетоні використано метод статистичної математичної обробки результатів – метод ортогонального центрального композиційного проектування (ОЦКП), який дає можливість одержати модель об'єкту дослідження, впорядкувати пошук

оптимальних умов. Суть цього методу планування експериментів полягає у отриманні математичної залежності між заданими складом і властивостями чи витратою матеріалів. Наведене рівняння регресії отримується з використанням методу ОЦКП і математично описує процес, що відбувається:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (3.2)$$

де x_1, x_2 – значення змінних факторів.

В методі ОЦКП коефіцієнти регресії визначаються за такими формулами:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y(i); \quad (3.3) \quad b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_1(i)x_2(i)}{\sum_{i=1}^n (x_1(i)x_2(i))^2}; \quad (3.4)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_1(i)}{\sum_{i=1}^n x_1(i)^2}; \quad (3.5) \quad b_{11} = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_1^*(i)}{\sum_{i=1}^n x_1^*(i)^2}; \quad (3.6)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_2(i)}{\sum_{i=1}^n x_2(i)^2}; \quad (3.7) \quad b_{22} = \frac{\sum_{i=1}^n y(i)x_2^*(i)}{\sum_{i=1}^n x_2^*(i)^2}; \quad (3.8)$$

$$x_1^*(i) = x_1(i)^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_1(i)^2; \quad (3.9)$$

$$x_2^*(i) = x_2(i)^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_2(i)^2 \quad (3.10)$$

Значення x_i^* матриці двофакторного математичного планування експерименту наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 - Значення x_i^* матриці двофакторного математичного планування експерименту

№ дослідю	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

Оптимізація кількості цеолітового туфу, як заміника портландцементу в бетоні, відкриває шлях для направленою формування фазового складу продуктів гідратації, що сприяють підвищенню міцності на стиск [28]. Запроектовано бетон з номінальним складом за масою 1:1,7:3,5 (марка за осадкою конуса бетонної суміші S3) з витратою портландцементу 350 кг/м³.

В заданому інтервалі зміни кількісного співвідношення полідисперсного цеоліту $x_1 = 0; 10; 20$ об.% та пластифікуючої добавки Sika ViscoCrete 5320 $x_2 = 0,7; 1,0; 1,3$ мас.% методом математичної статистичної обробки результатів здійснено оптимізацію складу бетону для отримання оптимального співвідношення між полідисперсним цеолітовим туфом та хімічною добавкою, щоб одержати бетон з покращеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями [271].

В табл. 3.8 наведені основні характеристики плану експерименту. Такі контрольні параметри (функції відгуку) вибрані при плануванні експерименту:

Y_1 - міцність на розтяг при згині через 28 діб тверднення;

Y_2, Y_3 – міцність при стиску через 7 і 28 діб тверднення в нормальних умовах відповідно.

Таблиця 3.8 - Характеристика плану експерименту

Характеристика	Вміст добавок, мас.%	
	Sika ViscoCrete 5320 (x_1), мас.%	ПЦТ (x_2), мас.%
Основний рівень “0”	1,0	10
Нижній рівень “-1”	0,7	0
Верхній рівень “+1”	1,3	20

За формулами 3.2-3.8 для отриманих результатів проведено розрахунок коефіцієнтів регресії, а за спеціально складеними програмами, в яких застосовано до регресивного аналізу і знаходження коефіцієнтів регресії матричний підхід, побудовано лінії міцності при $y = \text{const}$.

Встановлено за результатами фізико-механічних випробувань (рис. 3.26), що спостерігається різний вплив на властивості бетонів залежно від співвідношення полідисперсного цеолітового туфу і хімічної добавки.

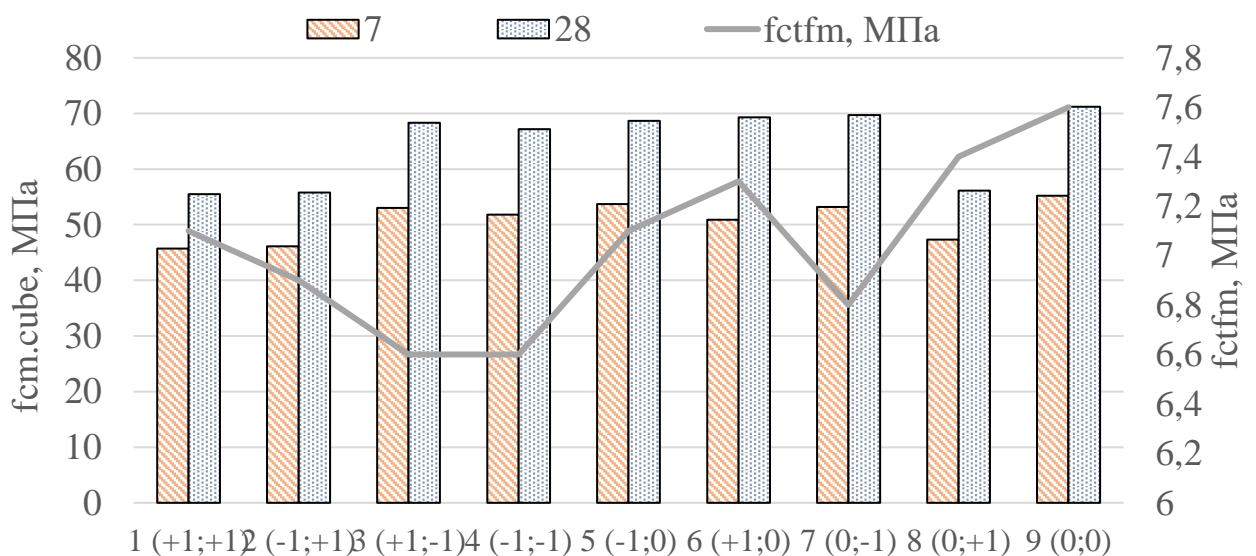


Рисунок 3.26 - Міцність на стиск і на розтяг при згині бетону з добавкою полідисперсного цеолітового туфу і пластифікуючої добавки

Отримані коефіцієнти регресії за результати розрахунку наведені в табл. 3.9. Ряд технологічних висновків можна зробити, аналізуючи отримані коефіцієнти регресії. Слід відзначити негативний вплив хімічної добавок на міцність на ранніх стадіях тверднення бетонів (7 діб) і позитивний її вплив у подальші терміни (28 діб), про що вказують знаки при коефіцієнтах регресії b_1 . Знаки коефіцієнтів регресії свідчать також, що максимальний вміст полідисперсного цеолітового туфу (коефіцієнт b_{22}) та хімічної добавки (коефіцієнт b_{11}) спричиняє негативний вплив на міцність бетону впродовж всього періоду тверднення. В той же час, їх сумісне поєднання є найбільш ефективним.

На основі одержаних коефіцієнтів за формулою (3.2) складені рівняння регресії функцій ($Y_1...Y_3$) та побудовані ізолінії міцності через 7 і 28 діб тверднення ($Y_1, Y_2, Y_3 = \text{const}$) (рис. 3.27-3.29).

Таблиця 3.9 - Коефіцієнти регресії

Функції відгуку	Коефіцієнти регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
Y_1	38,0	-2,8	-2,6	-4,2	-2,1	0,6
Y_2	54,4	-0,3	-3,2	-1,7	-3,8	-0,4
Y_3	70,8	0,2	-6,3	-1,5	-7,6	-0,4

Графічна інтерпретація (рис. 3.27-3.28) та аналіз одержаних математичних залежностей дозволяють встановити оптимальний вміст мінеральної добавки (цеолітового туфу) та хімічної добавки – Sika ViscoCrete 5320, що відповідають відповідно 10 мас. % полідисперсного цеолітового туфу та 1,0 мас.% добавки Sika ViscoCrete 5320, які забезпечують достатньо високу ранню і марочну міцність при марці бетонної суміші за осадкою конуса S3 (осадка конуса бетонної суміші 10-14 см). Јана [245] виявив, що при введенні в бетон 0, 10, 20, 30 і 40 мас.% цеолітового туфу від загальної маси цементуючих матеріалів, саме заміна 10 мас.% портландцементу цеолітовим туфом, показала найвищу міцність порівняно з

контрольним бетоном.

Отже, проведеними дослідженнями встановлено, що суттєвий вплив при формуванні міцності бетону має оптимальний вміст компонентів бетону, а саме додаткового цементуючого матеріалу та хімічної добавки.

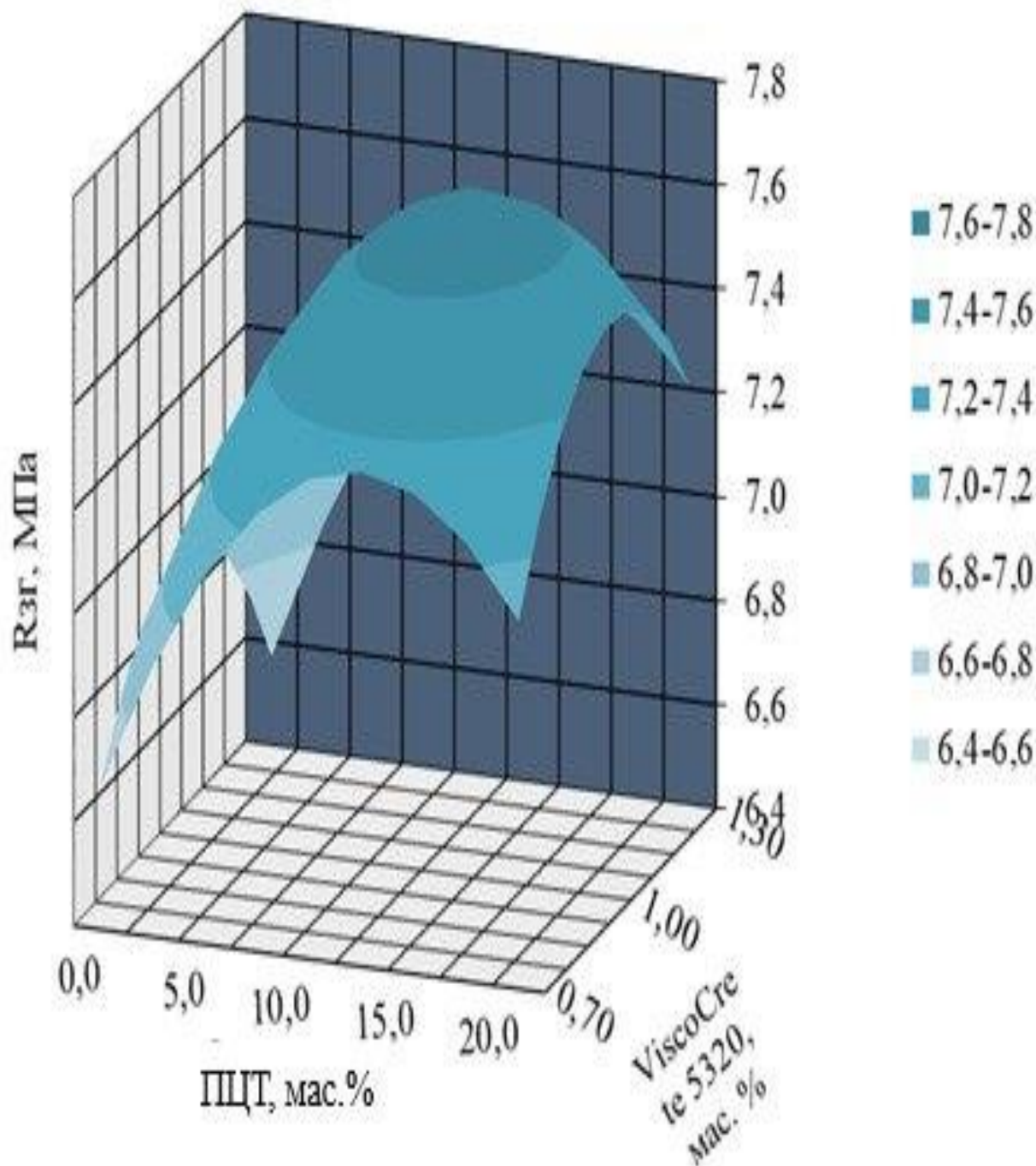
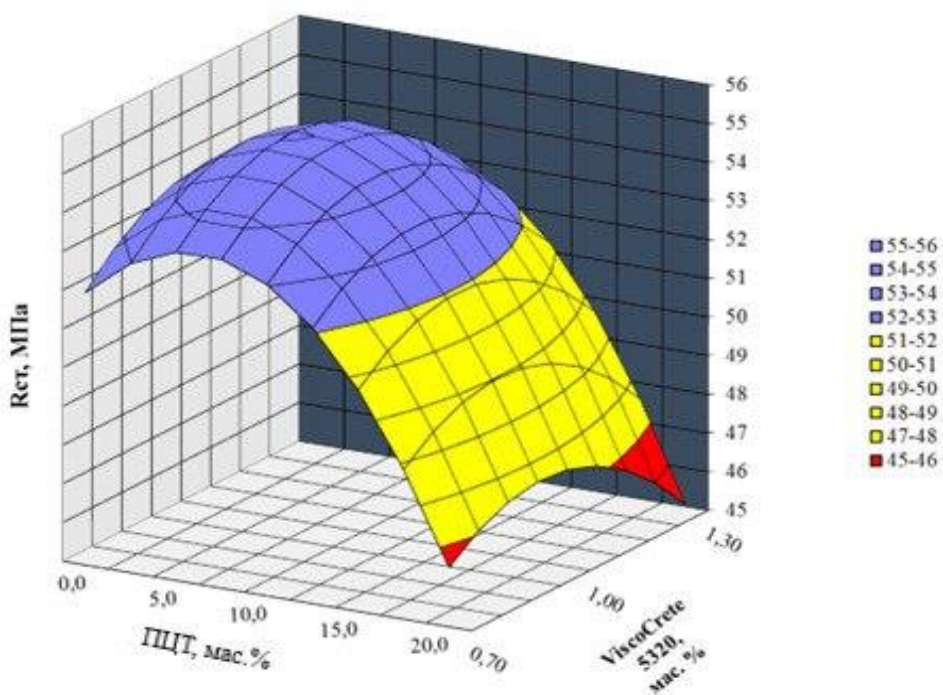
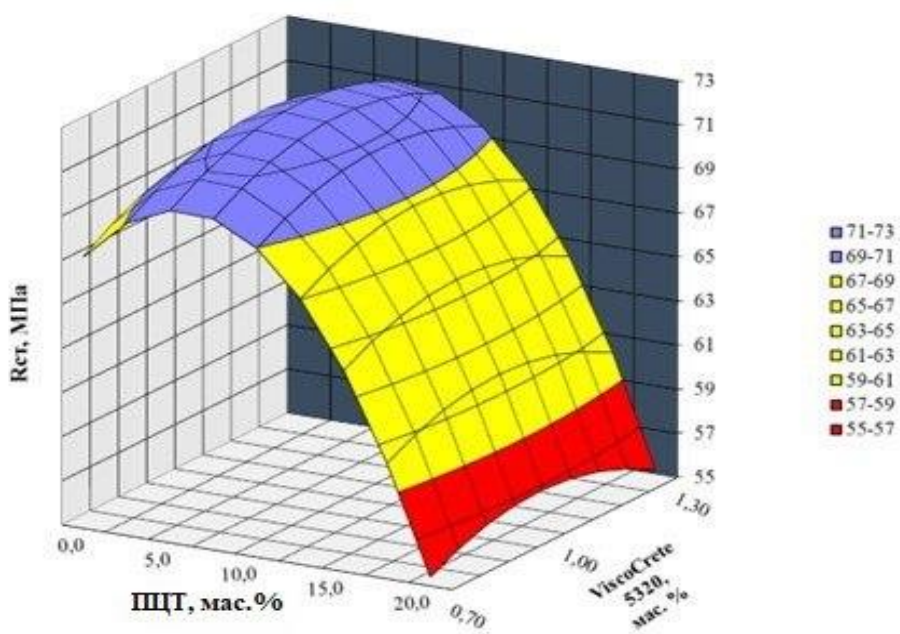


Рисунок 3.27 - Ізолінії рівної міцності на розтяг при згині бетону з підвищеною міцністю у віці 28 діб



а



б

Рисунок 3.28 - Ізолінії рівної міцності при стиску бетону з підвищеною міцністю на стиск у віці 7 (а) та 28 діб (б)

Для вивчення поведінки бетону з добавкою полідисперсного цеолітового туфу в умовах від'ємних температурах проведено дослідження деформацій

розширення та температури замерзання рідкої фази свіжозамороженої дрібнозернистої бетонної суміші методом низькотемпературної дилатометрії. Як показано на рис. 3.29, заміна 10 мас.% портландцементу цеолітовим туфом майже не впливає на температуру замерзання води порівняно зі складом без пуцоланової добавки, але після відтавання залишкові деформації розширення зменшуються з 15,24 до 12,62 мм/м.

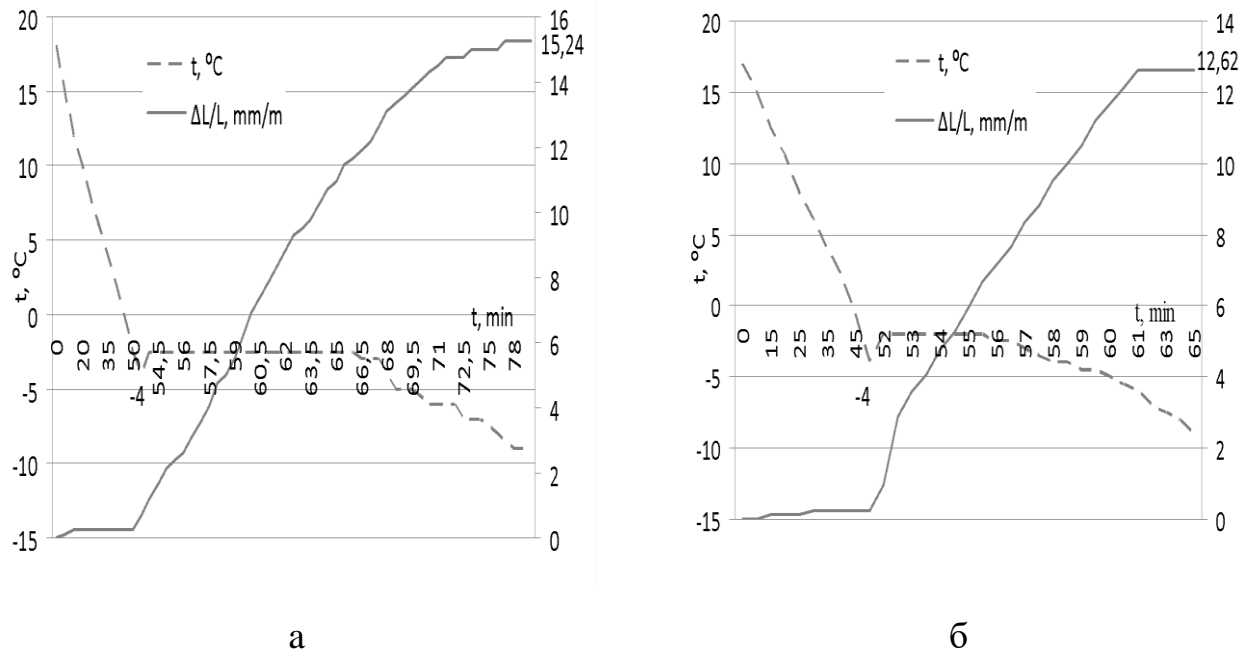


Рисунок 3.29 - Деформації розширення та температура замерзання рідкої фази свіжозамороженої дрібнозернистої бетонної суміші (Ц:П=1:2, РК=160 мм) без (а) та з вмістом 10 мас.% (б) цеолітового туфу

3.4. Фазовий склад та мікроструктура модифікованої цементної матриці бетону з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю

Вивчення процесів гідратації в'язучих систем, які містять цеолітовий туф і хімічні модифікатори, а також дослідження генезису їх мікроструктури є дуже

важливими, оскільки відкривають шлях до наукового прогнозування властивостей бетонів з підвищеною міцністю, їх тріщиностійкості та довговічності. Водночас процеси структуроутворення цементної матриці бетону модифікованого хімічними добавками з додаванням полідисперсного цеолітового туфу ще недостатньо вивчені.

Дослідження складів в'язучих (тісто 1:0, зразки-кубики 2x2x2 см), які наведені в табл. 3.10 показали, що заміна 10 мас. % портландцементу на цеолітовий туф призводить до збільшення на 6% водопотреби (рис. 3.30). Це пояснюється мікроструктурою цеолітового туфу, яка представлена великою кількістю пор, з'єднаних величезною сіткою каналів. Додавання водоредукуючих пластифікаторів зменшує водопотребу портландцементу на 10% [298].

Таблиця 3.10 - Міцність на стиск цеолітвмісних в'язучих

Ідентифікація суміші	Склад в'язучого, мас.%			Міцність на стиск, МПа, у віці, діб		
	Портланд-цемент	Цеолітовий туф	Пластифікатор	3	7	28
Z0	100	0	0	54,8	56,0	75,7
Z10	90	10	0	50,9	56,4	75,0
Z10P	90	10	0,42	48,8	54,8	75,5

Початок і кінець тужавіння портландцементів, що містять цеолітовий туф коротший, ніж у звичайного портландцементу без цеолітового туфу. Слід відзначити, що заміна деякої кількості портландцементу пуцолановими матеріалами зазвичай призводить до сповільнення тужавіння цементної системи через меншу кількість клінкеру у в'язучому. Протилежне явище спостерігається при додаванні цеолітового туфу через різке зниження пластичності цементного тіста, що викликано швидким поглинанням води частинками цеолітового туфу відразу після приготування тіста нормальної консистенції, про що свідчить коротший час початку тужавіння порівняно з часом кінця тужавіння, що становить

15 і 30 хв відповідно, оскільки процес поглинання води зернами цеолітового туфу з часом сповільнюється, тому що вони стають майже повністю насиченими.

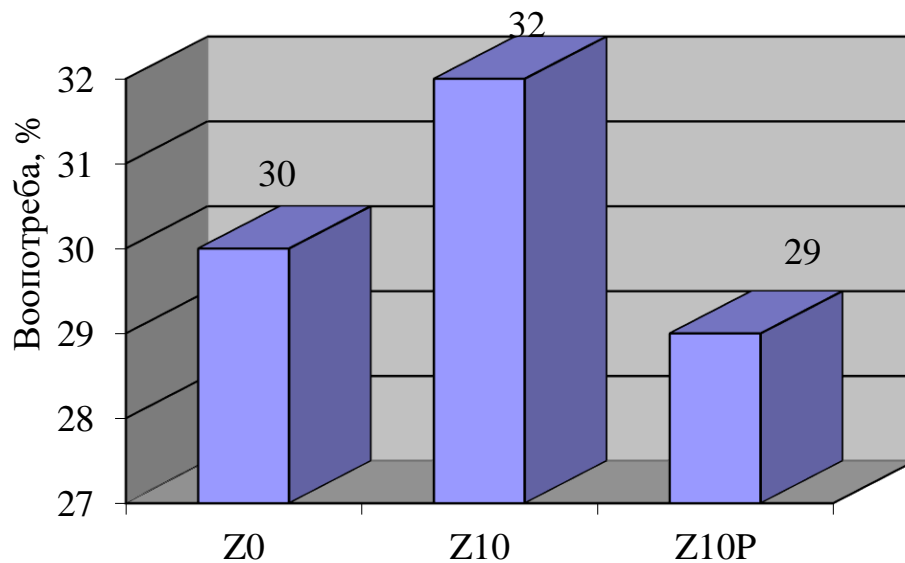


Рисунок 3.30 - Водопотреба в'язучих

Встановлено, що використання пластифікаторів є одним із найбільш універсальних, доступних і гнучких методів регулювання властивостей в'язучих [70, 270]. Механізм пластифікуючої дії полягає насамперед в утворенні гідрофільної адсорбційної плівки на всій поверхні цементних зерен і сформованих новоутворень. Ця адсорбційна оболонка міцно утримує на поверхні товстий шар води, зв'язаної з поверхнею молекулярними силами, а також частину вода, що утримується в адсорбованому гелеподібному шарі поверхнево-активних речовин. Такі стабілізуючі шари (адсорбційно-гідратна оболонка на твердій поверхні) виконують дві функції: по-перше, усувають зчеплення між частинками, забезпечуючи гідродинамічне змащення, а саме зменшують тертя між ними, що є основною причиною підвищення текучості тіста; по-друге, гідрофільні адсорбційні шари гальмують гетерогенні процеси гідратації та гідролізу цементу в початковий період через появу значного дифузійного опору в перехідних шарах. Додавання цеолітового туфу разом із пластифікатором призводить до затримки часу початку та кінця тужавіння на 15 та 35 хв відповідно порівняно з портландцементом без добавок (рис. 3.31).

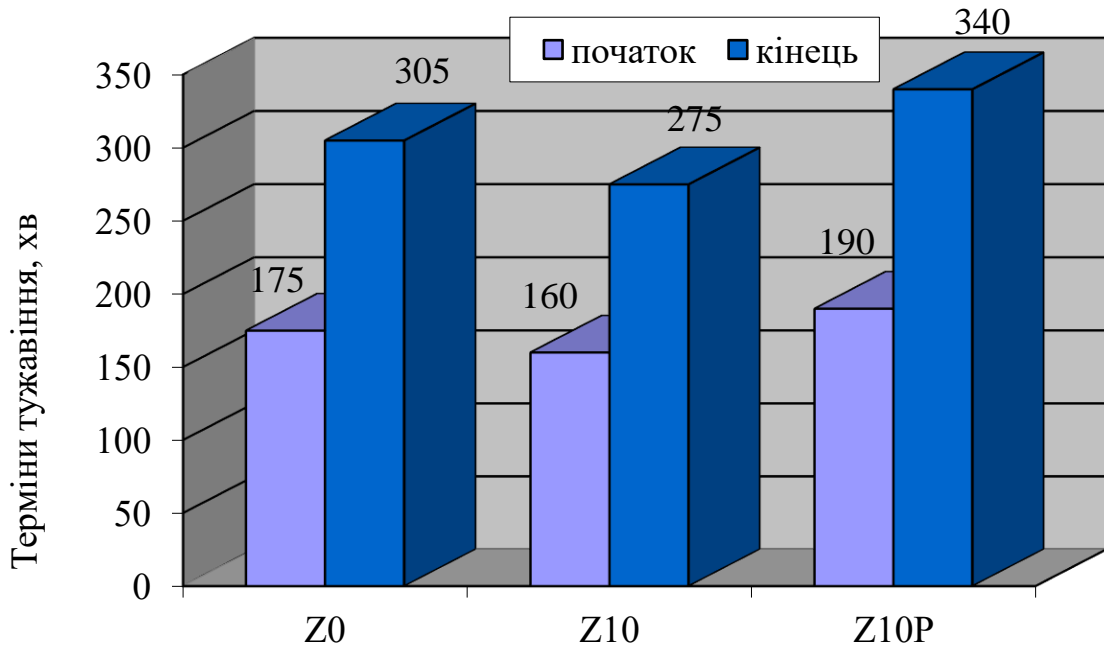


Рисунок 3.31 - Терміни тужавіння в'язучих

Активну структуроутворюючу роль цеолітового туфу та хімічних добавок підтверджують результати визначення міцності цементного каменю (табл. 3.10). Міцність на стиск каменю, що містить цеолітовий туф і як цеолітовий туф, так і пластифікатор у ранньому віці, нижча на 7-11%. Однак кінетика набору міцності в'язучого, що містить цеолітовий туф, зростає з часом тверднення, і через 28 діб тверднення міцність таких портландцементів не поступається міцності портландцементу без пуцоланових матеріалів.

Методом фізико-хімічного аналізу досліджено особливості процесів гідратації цементу з пуцолановими матеріалами та хімічними добавками.

Аналіз дифрактограми показав наявність активних процесів тверднення та утворення основних гідратних фаз (рис. 3.32). На дифрактограмах гідратованого портландцементу без добавок поряд із лініями фази аліту та беліту ($d/n = 0,277$; $0,273$ нм) спостерігаються через 28 діб тверднення лінії кальцію гідроксиду ($d/n = 0,263$; $0,493$ нм), а також лінії еtringіту малої інтенсивності. Часткова заміна портландцементу на цеолітовий туф призводить до зменшення ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і зростання ліній гідросульфоалюмінату кальцію. Взаємодія активного Al_2O_3 з кальцію гідроксидом в присутності гіпсу сприяє утворенню додаткової кількості

етрингіту ($d/n = 0,973; 0,561$ нм). Слід зазначити, що фазовий склад продуктів гідратації практично не змінюється після додавання пластифікуючих добавок.

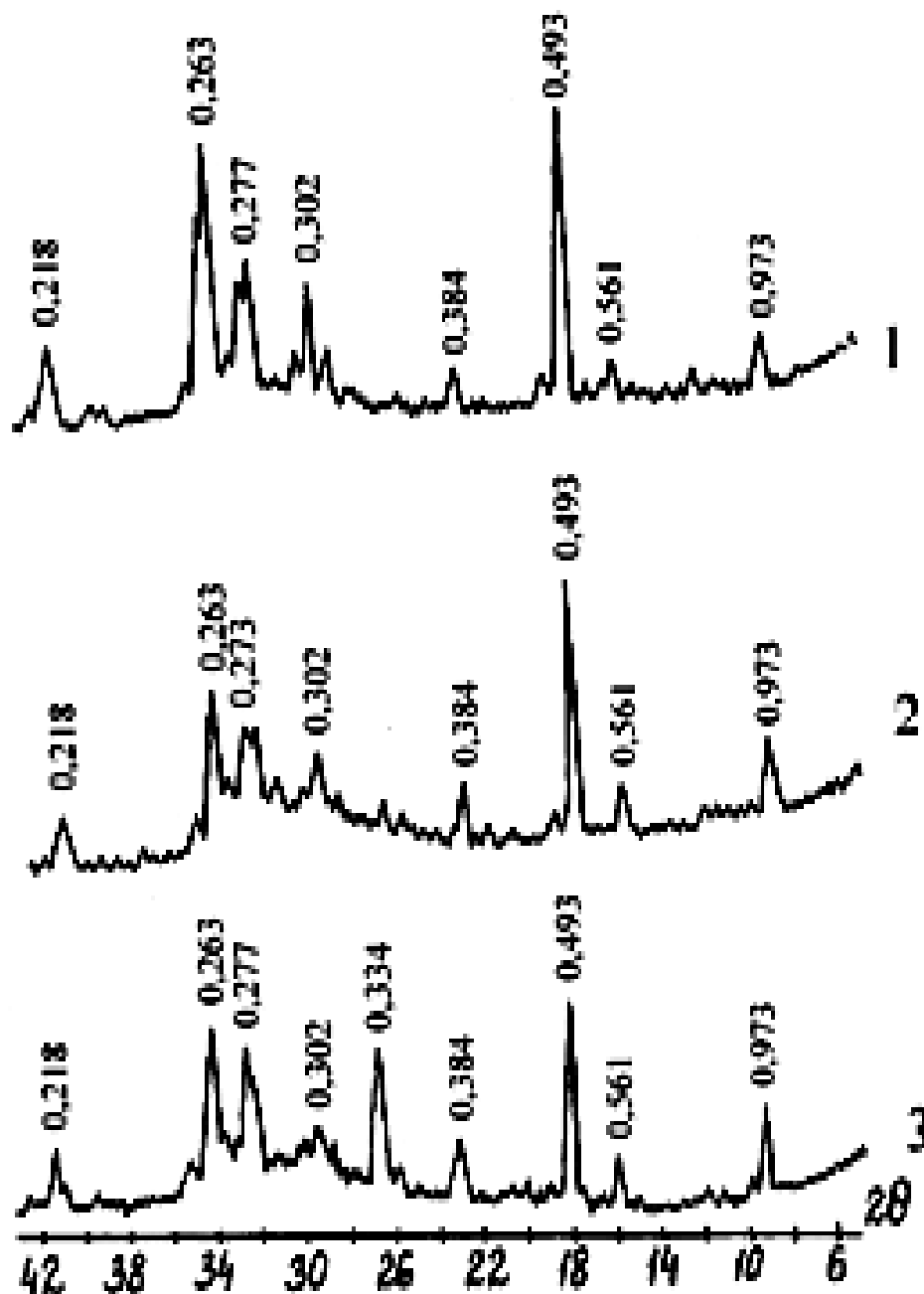


Рисунок 3.32 - Рентгенограми затверділого цементного каменю через 28 діб: 1) без добавок; 2) з 10 мас.% цеолітового туфу; 3) з 10 мас.% цеолітового туфу та 0,42 мас.% пластифікатора

Ефективність дії цеолітового туфу на процеси гідратації цементних

композицій підтверджена дослідженнями, проведеними методом термічного аналізу (рис. 3.33). На кривих ДТА портландцементу ПЦ І-500Р-Н, гідратованого 28 діб, ендотермічні максимуми були зафіксовані при 100, 500 і 720⁰С. Перший пік свідчить про виділення води з гідросилікатів кальцію та гідросульфоалюмінату, другий – про розпад кальцію гідроксиду і третій пік відповідає розкладу гідрокарбоалюмінату кальцію. Зниження ендотермічного максимуму при 500⁰С цеолітвмісного зразка свідчить про зменшення кількості $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з 15,3 (для портландцементу без добавок) до 12,5% за рахунок реакції з мінеральною добавкою з пуцоланічною природою активності, що підтверджено рентгенофазовим аналізом. За даними термогравіметрії загальна втрата маси чистого портландцементу (без добавок) становить 27,6 мас. %, а з добавкою цеолітового туфу 10 мас. % - 24,1 %.

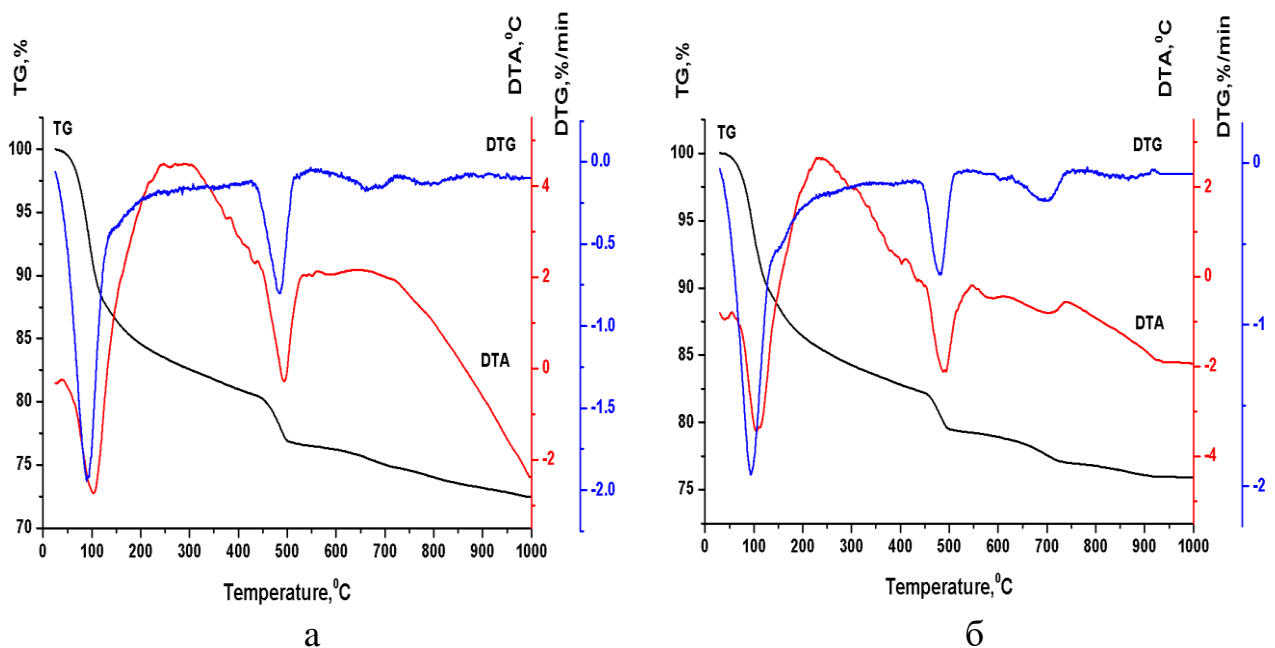


Рисунок 3.33 - Дериватограми портландцементу, гідратованого 28 діб:

а – без цеолітового туфу, б – з 10 мас.% цеолітового туфу

Метод електронної мікроскопії доповнює дані про структуроутворення цементного каменю. Аналіз мікроструктури цементного каменю без добавок через 28 діб тверднення (рис. 3.34) свідчить про інтенсивний перебіг процесів гідратації. В об'ємі мікроструктура представлена великою кількістю гідратованих новоутворень. Деякі кристали мають форму тонких голчастих або пластинчастих

кристалів, що сприяє ступінчастому росту деяких шарів гідратних утворень. У деяких місцях щільні шестикутні пластини кальцію гідроксиду змінені (рис. 3.34, а), що підтверджено мікрозондовим аналізом (рис. 3.34, б).

Мікроструктура портландцементу з добавкою цеолітового туфу через 28 діб тверднення характеризується підвищеною однорідністю та утворенням щільних субмікроскопічних кластерів гідросилікатів і гідросульфоалюмінатів кальцію (рис. 3.35). Подекуди спостерігаються кристалічні блоки пластинчастих кристалів портландиту.

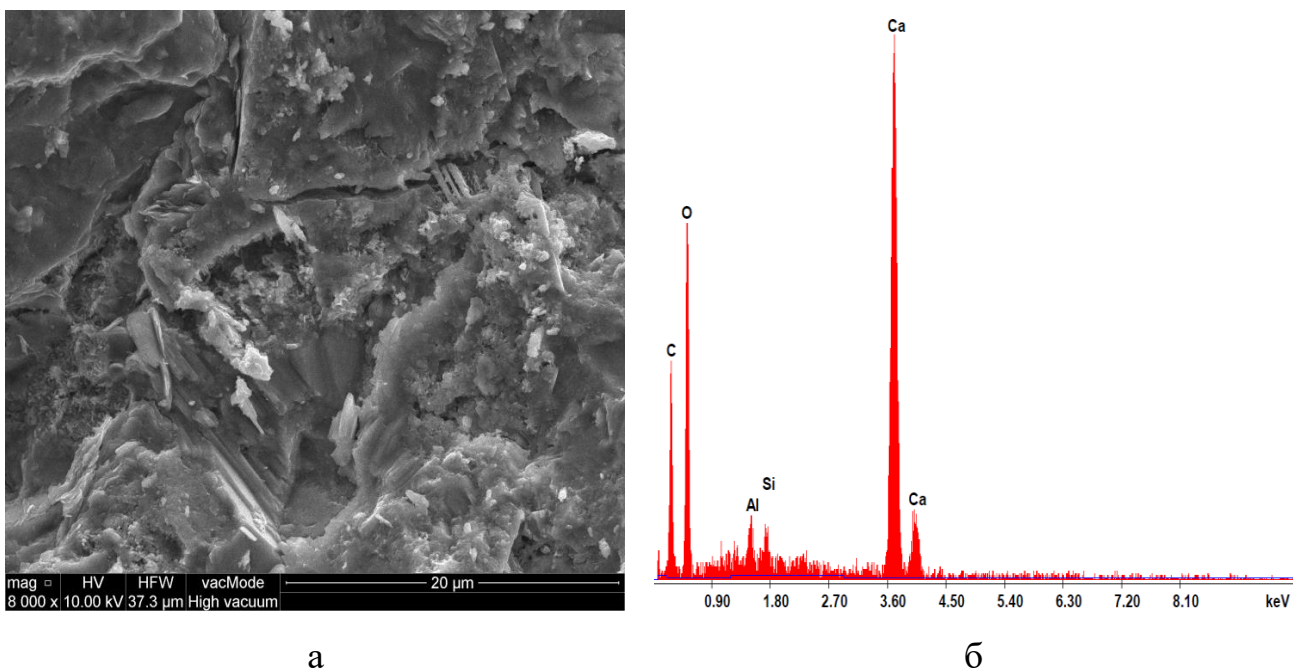
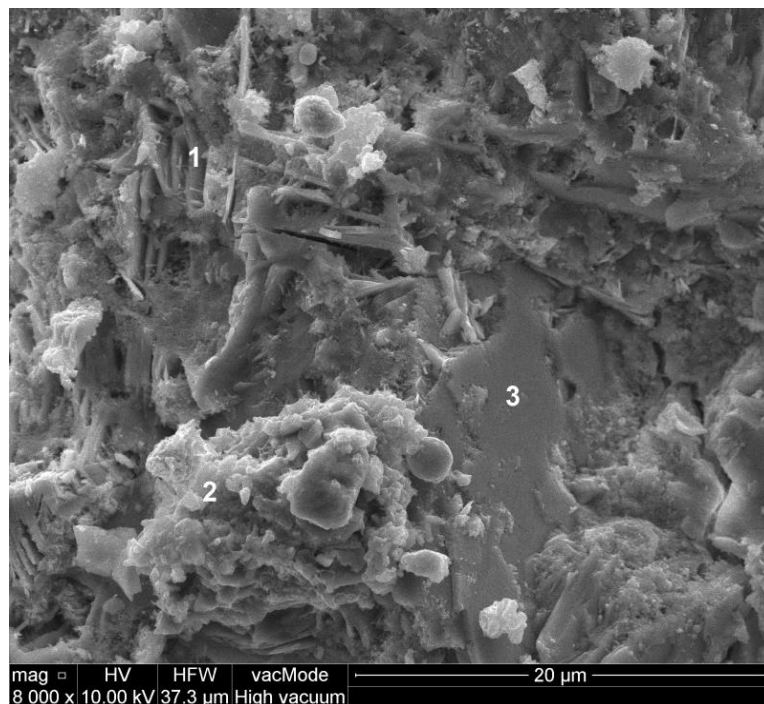
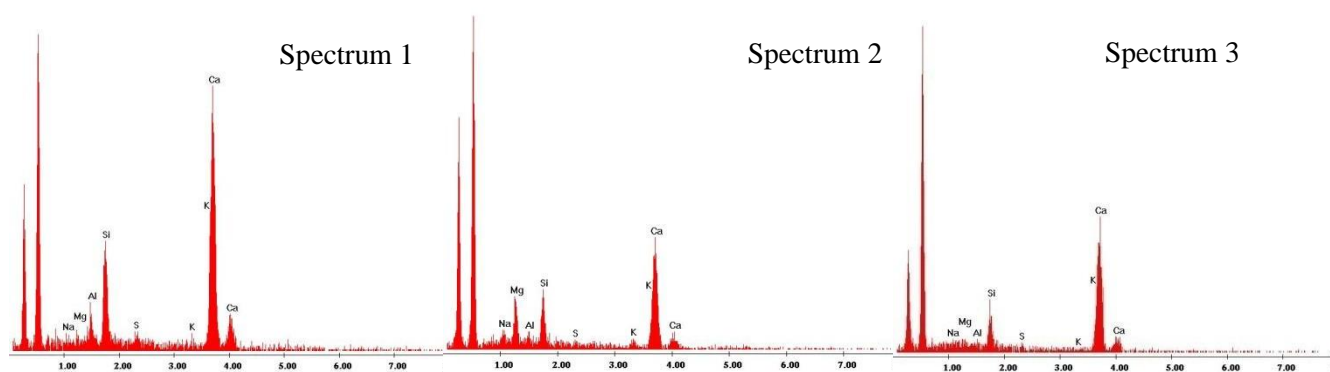


Рисунок 3.34 - Мікроструктура (а) та мікрозондовий рентгеноспектральний аналіз (б) звичайного портландцементного каменю через 28 діб тверднення

Слід відзначити, що дрібнокристалічний еtringіт, який утворюється шляхом гідратації портландцементу, що містить цеолітовий туф і хімічну добавку, порівняно з гідросульфоалюмінатом звичайного портландцементу, не викликає небезпечних внутрішніх напруг. Однією з характерних особливостей мікроструктури портландцементу, що містить цеолітовий туф, є значне збільшення вмісту метаміктної складової, що підтверджує ефективність адсорбційної модифікації в'язучої системи добавками пластифікуючої дії (рис. 3.36).



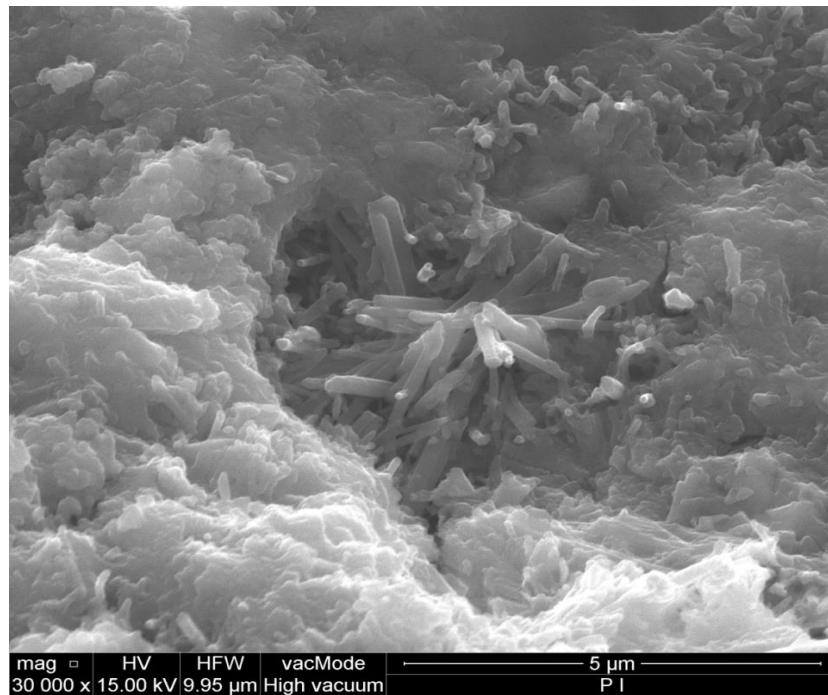
а



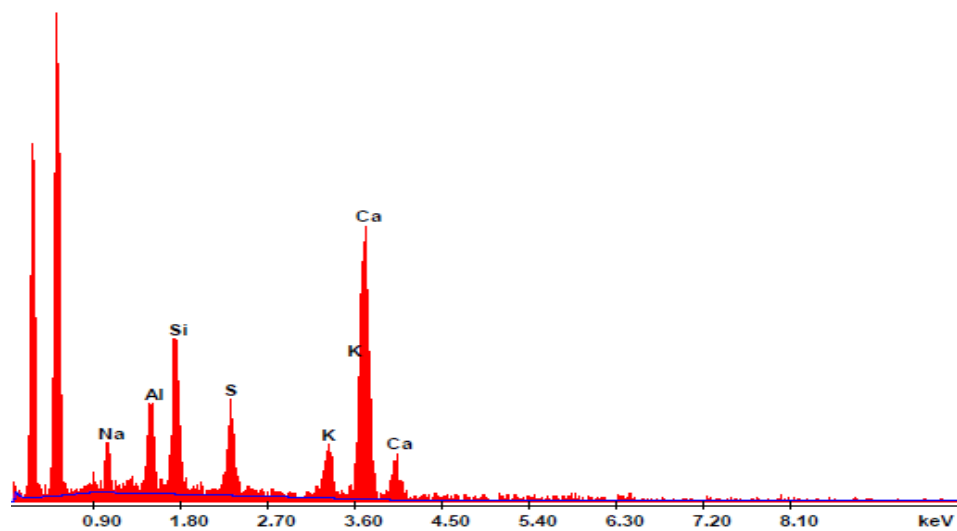
б

Рисунок 3.35 – Мікроструктура (а) та мікрзондовий рентгеноспектральний аналіз (б) портландцементного каменю, що містить 10 мас.% цеолітового туфу, через 28 діб тверднення

Використання добавок, таких як цеолітовий туф і пластифікатор, дозволяє створити кращі умови гідратації з урахуванням потенційних можливостей клінкеру та мінеральних компонентів порівняно з портландцементом без добавок [330].



а



б

Рисунок 3.36 - Мікроструктура (а) та мікрозондовий рентгеноспектральний аналіз (б) портландцементного каменю, що містить 10 мас.% цеолітового туфу і пластифікатор, через 28 діб тверднення

Отже, підтверджено закономірності, що визначають формування фазового складу та мікроструктури цеолітвмісних цементних композицій. Це дозволяє регулювати параметри цементної системи бетону, створюючи можливість направленою формування гідратних фаз, які виявляють в'язучі властивості в мінеральній неклінкерній частині портландцементу [100]. Додаткова кількість волокнистих гідросилікатів кальцію типу CSH (B) забезпечує синтез міцності та

ефект самоармування цементного каменю з підвищеною тріщиностійкістю та експлуатаційними властивостями.

Висновки до розділу

1. Показано, що при використанні штучних мінеральних добавок цеолітового типу пуцоланічна взаємодія відбувається в об'ємі кожної частинки. Кристалічні новоутворення виділяються в об'єм тверднучої системи в результаті чого формується щільна дрібнокристалічна структура цементного каменю, забезпечуючи інтенсивне зародкоутворення. В структурі не спостерігаються блоки портландиту, натомість відзначається більша кількість субмікрокристалічних кристалів гідросилікатів, гідроалюмінатів кальцію та еtringіту, які призводять до мікроармування бетону на рівні мікроструктури, кольматування порового простору, зменшуючи кількість дефектів та дислокацій. Встановлено за результатами випробувань підвищені значення границі міцності при стиску ($R_{ст}=53,5$ МПа) та розтягу при згині ($R_{зг}=7,8$ МПа), внаслідок ефекту самоармування, через 28 діб тверднення дрібнозернистого бетону з 10 мас.% штучного цеоліту Na-P1, що позитивно впливає на його тріщиностійкість.

2. Досліджено міцність в'язучих систем, що містять як пуцоланові матеріали гранульований доменний шлак і золу-винесення з різною дисперсністю та корозійну стійкість арматурної сталі в бетонах, в яких портландцемент замінено на вищезазначені побічні продукти переробки. Встановлено, що ступінь заміни портландцементу в бетонах на ГДШ і золу-винесення залежить від їх питомої поверхні. Показано, що збільшення тонини помелу ГДШ з 310 до 500 м²/кг призводить до зростання міцності в'язучого на 47 і 18% через 2 і 28 діб тверднення відповідно. Отримані результати показують ефективність використання неактивованої золи-винесення для виробництва цементу та бетону та необхідність постійного контролю її зернового складу для визначення ступеня заміни клінкеру

в цементі та цементу в бетоні. Виявлено позитивний синергетичний ефект поєднання ГДШ і золи-винесення при наборі міцності на стиск бетону. Кінетика набору міцності портландцементів і бетонів, що містять ці пуцоланові матеріали, нижча на ранньому етапі формування структури, але прискорюється на більш пізніх етапах через пуцоланову реакцію, яка відбувається.

3. Неактивована зола-винесення також дозволяє оптимізувати розподіл частинок за розміром у бетонах з підвищеною міцністю, щоб забезпечити більш тривалий час гідратації цементу та призводить до отримання більш щільної та компактної структури з часом завдяки її ролі як додаткового цементуючого матеріалу з пуцолановими властивостями, так і як мікронаповнювача. Одночасне використання мінеральних добавок різної природи активності, таких як ГДШ (приховані гідравлічні властивості) і золи-винесення (пуцоланічні) дозволяє покращити мікроструктуру бетонів за рахунок утворення додаткової кількості еtringіту та тоберморитоподібних низькоосновних гідросилікатів кальцію в неклінкерній частині цементної складової бетону. Водопоглинання знижується з 5,5% до 4,7% і, як наслідок, підвищується стійкості до пошкоджень, спричинених замерзанням і відтаванням. Спостерігається зменшення спаду міцності на стиск з 30,2 для бетону контрольного бетону до 24,1% для бетону з 10 мас.% ГДШ та золи-винесення CS10(380)F10(510) через 100 циклів заморожування-відтавання. Внаслідок більш щільної структури покращується стійкість арматури в таких бетонах і довговічність залізобетонних виробів.

4. Полідисперсні пуцоланові матеріали, як ПЦТ так і ПП, збільшують водопотребу в'язучого завдяки більш розвинутій поровій структурі полідисперсних мінеральних добавок порівняно з тонкодисперсними. Водоутримувальна здатність в'язучих систем з цими пористими матеріалами покращується, скорочуються терміни тужавіння, особливо відчутно для тонкодисперсних перліт- і цеолітмістких матеріалів, яке становить в межах 20-25 хв і 10-15 хв відповідно. Міцність таких в'язучих систем, незалежно від дисперсності і виду мінеральних добавок, в початковий період тверднення поступається портландцементу ПЦ I-500, проте із збільшенням часу тверднення

скорочується розрив в міцності, а вже через 42 доби в'язуче з 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу навіть перевищує міцність ПЦ І-500.

5. Проведено оптимізацію вмісту полідисперсного цеолітового туфу, як одного з найбільш ефективних пуцоланових матеріалів, в складі бетону. Методом математичного планування експерименту, а саме ортогональним центральним композиційним плануванням, встановлено, що модифікування бетонів з підвищеною міцністю суперпластифікуючою добавкою та полідисперсним цеолітовим туфом у кількості 1 та 10 мас.% відповідно дає змогу одержати найкращі показники за критеріями міцності на розтяг при згині та стиску. Введення пластифікуючих добавок є ефективним і необхідним технологічним рішенням, яке дозволяє компенсувати зростання водопотреби бетонної суміші при використанні мінеральних добавок цеолітового типу. Водопоглинання і пористість бетонів, що містять цеолітовий туф, збільшується приблизно на 6-10%. Використання цеолітового туфу в бетонах не впливає на температуру замерзання рідкої фази свіжозамороженої бетонної суміші, але після відтавання залишкові деформації розширення зменшуються приблизно на 17%. Комплексне використання та оптимізація вмісту в бетоні мінеральних добавок та хімічних модифікаторів дозволяє покращити технологічні властивості бетонних сумішей та підвищити міцність затверділих бетонів в більш пізньому віці тверднення. Така поведінка пов'язана з пуцолановою активністю мінеральних добавок.

6. Встановлено закономірності, що визначають формування фазового складу та мікроструктури в'язучих систем з пуцолановими матеріалами, що дає змогу регулювати їх параметри, створюючи можливість утворення гідратних фаз, які виявляють в'язучі властивості в мінеральній неклінкерній частині мікроструктури бетону. Більша кількість субмікроструктурних волокнистих гідросилікатів типу CSH (I), які утворюються в неклінкерній частині цементної матриці бетону при використанні мінеральних добавок, забезпечує кращий ефект самоармування бетону на мікроструктурному рівні та синтез міцності на стиск і на розтяг при згині. Це в комплексі дає змогу покращити тріщиностійкість бетонів з підвищеною міцністю та його експлуатаційні властивості.

РОЗДІЛ 4. РОЛЬ МЕЗОСТРУКТУРИ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ПОКРАЩЕНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ, МОДИФІКОВАНИХ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ

4.1. Роль полідисперсного цеолітового туфу в мезоструктурі бетонів з підвищеною тріщиностійкістю

Технологія виробництва бетонів з підвищеною міцністю базується на керуванні процесами структуроутворення на різних рівнях [20]. Один з методів підвищення міцності і довговічності використовує відому концепцію [253] для досягнення максимально щільного упакування частинок шляхом забезпечення неперервності гранулометричного складу на мезоструктурному рівні. Зважаючи на те, що якісні заповнювачі, які використовуються у бетонах з підвищеною міцністю, зазвичай мають незначний вміст зерен менше 0,16 мм, а сучасні портландцементи характеризуються значною тониною помелу, у гранулометрії таких бетонів виникають розриви між в'язучим і дрібним заповнювачем у діапазоні 60-160 мкм (рис. 4.1).

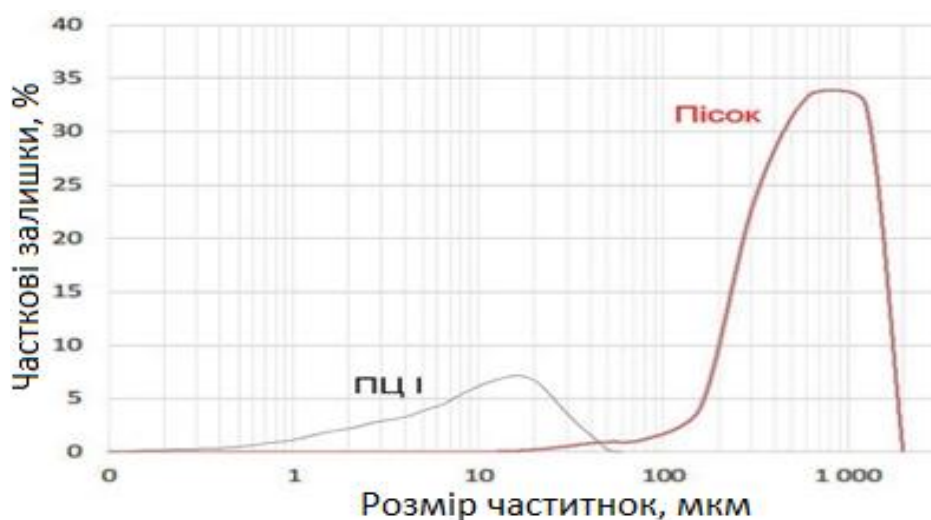
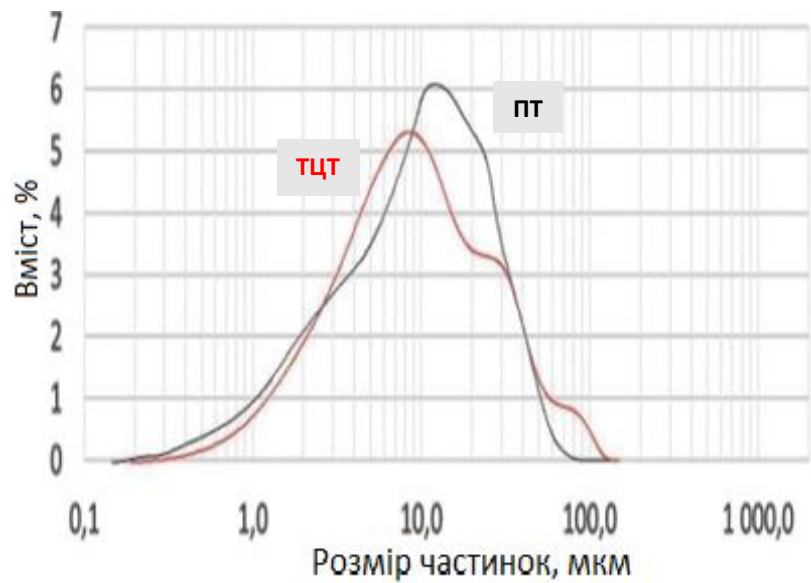


Рисунок 4.1 - Диференційні криві розподілення зерен піску та портландцементу за розмірами

Це вимагає коригування за рахунок використання полідисперсних мінеральних компонентів. Результати лазерної гранулометрії показують, що основна кількість частинок тонкодисперсних добавок знаходиться у діапазоні 1-60 мкм, що відповідає гранулометрії портландцементу (рис. 4.2, а) [1].

В той же час, диференційне розподілення частинок полідисперсних компонентів свідчить (рис. 4.2, б), що розмір їх зерен знаходиться в діапазоні 0,4-800 та 1-1250 мкм для ПЦТ та ПП відповідно.



а



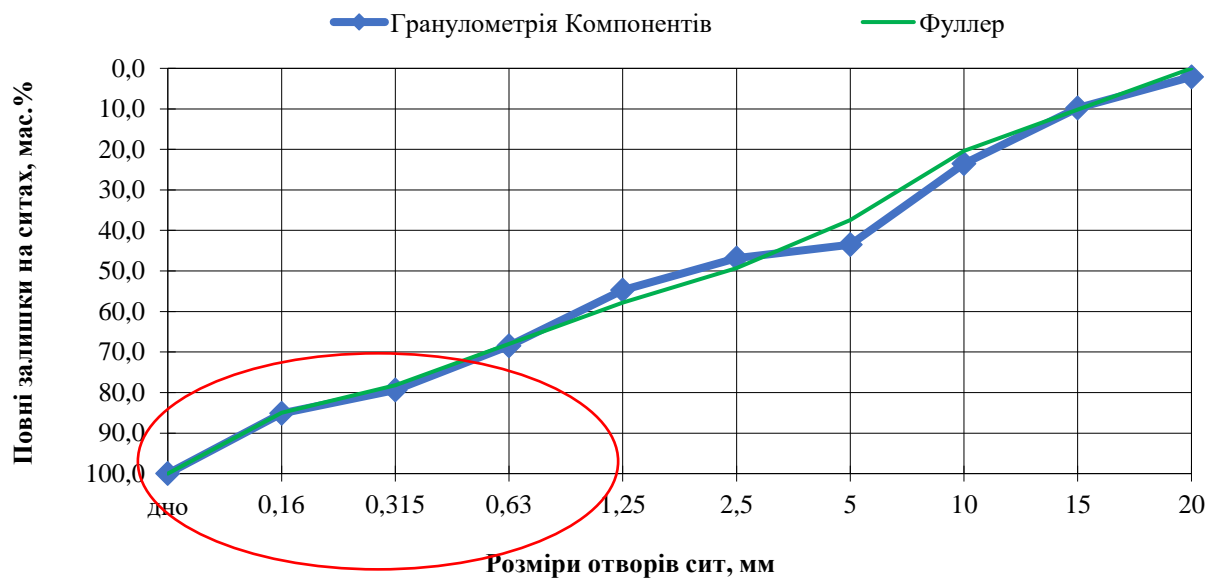
б

Рисунок 4.2 - Диференційні криві розподілення зерен за розмірами:

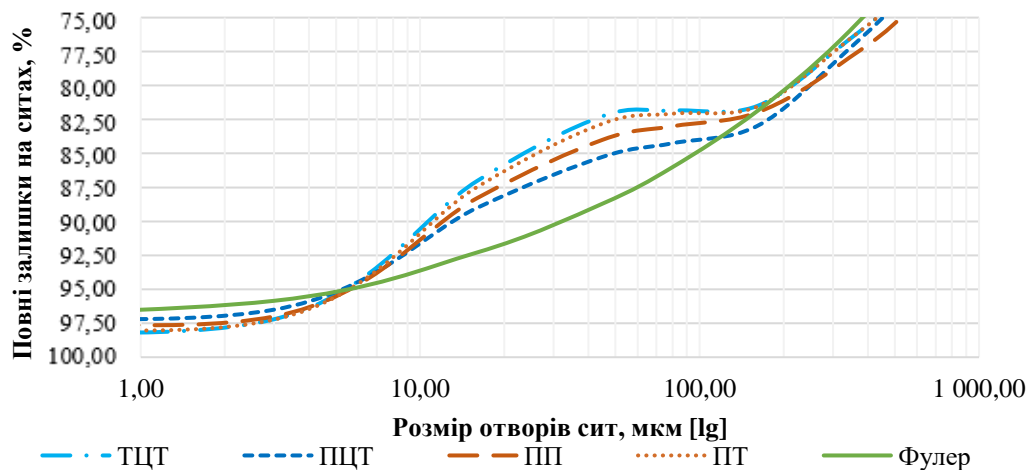
а – тонкодисперсний цеолітовий туф (ТЦТ) та перліт (ПТ);

б – полідисперсний цеолітовий туф (ПЦТ) та перліт (ПП)

Показано, що внаслідок введення до бетонної суміші полідисперсного цеолітового туфу (ПЦТ) досягається найвищий рівень неперервності гранулометричного складу в діапазоні мезоструктури, що підтверджує порівняння кривих розподілу зерен складових досліджуваних бетонів та кривої максимальної щільності пакування частинок Фуллера (рис. 4.3).



а



б

Рисунок 4.3 – Гранулометричний склад компонентів на макро- (а) та

мезоструктурному рівнях (б), крива Фуллера - КОГ,

$$A(D) = \left(\frac{D}{D_{\max}}\right)^{0.37} \quad (4.1)$$

Вплив полідисперсних цеолітового і перлітового компонентів на процес формування мезоструктури досліджували випробуванням дрібнозернистих бетонів складу 1:2 (табл. 4.1).

Результати свідчать, що незважаючи на збільшення водопотреби ($\Delta V/C=4-9\%$), для дрібнозернистого бетону з добавкою полідисперсного цеолітового туфу БПЦТ характерна найвища міцність на розтяг при згині серед усіх досліджених складів. Підвищена водопотреба даної суміші зумовлена здатністю цеолітового туфу іммобілізувати певну кількість води. Зменшення фактичного водоцементного відношення сумішей проходить за рахунок внутрішньоканальної кристалічно-порової структури цеолітового туфу. Бетон з вмістом полідисперсного перліту характеризується нижчою міцністю, що зумовлено низькими механічними характеристиками спученого перліту.

Таблиця 4.1 - Міцність дрібнозернистих бетонів з вмістом мінеральних добавок різної дисперсності

Назва складу	Вміст мінеральних компонентів, мас.%				В/Ц	Міцність на згин, МПа, у віці, діб			Міцність на стиск, МПа, у віці, діб		
	ТЦТ	ПЦТ	ПТ	ПП*		2	7	28	2	7	28
Б	0	-	0	-	0,45	4,9	5,2	7,5	29,4	41,8	54,1
БТЦТ	10	-	-	-	0,47	4,2	5,0	7,9	27,1	39,9	53,6
БПТ	-	-	10	-	0,49	5,6	6,1	7,7	27,9	39,1	51,9
БПЦТ	-	10	-	-	0,49	4,4	5,1	8,2	27,7	38,2	52,7
БПП	-	-	-	10	0,52	3,9	4,5	6,8	23,4	33,9	48,8

*дозування за об'ємом

Отже, підвищення границі міцності при згині дрібнозернистих бетонів БТЦТ і БПЦТ зумовлено унікальними властивостями структури цеолітового туфу, який характеризується наявністю внутрішньокристалічних пор і каналів, а також пуцоланічними властивостями, що сприяють формуванню щільної та міцної

структури бетону.

Застосування таких компонентів в технології бетону може використовуватися для забезпечення більшої повноти гідратації портландцементу, яка відіграє ключову роль в одержанні проектних характеристик бетону та тривалості служби конструкції. В більшості випадків вона забезпечується доглядом за бетоном, який дає змогу зменшити усадочні деформації та стимулювати гідратаційні процеси в портландцементі. Однак зовнішній догляд не завжди можливий, особливо у важкодоступних місцях конструкцій, і завжди є складним та витратним процесом. Зазвичай зовнішній догляд є неефективним через щільність структури бетону з підвищеною міцністю навіть у ранньому віці тверднення. Тому додатковий резерв води, який забезпечується при використанні полідисперсного цеолітового туфу в бетонах з підвищеною міцністю, які виготовляються за досить низьких В/Ц відношень та мають щільну структуру, є дуже важливим і ефективним.

Такий резерв води є необхідний в бетонах, які використовуються при зведенні транспортної інфраструктури. Для дорожніх бетонів, наприклад, внутрішній резерв води є більш ефективним. Це пов'язано із значною відкритою площею поверхні, а використання дорогих плівкоутворювачів призводить до зростання вартості будівництва. Наявність резервної вологи у тілі бетону сприяє більш повній гідратації портландцементу, що потенційно призводить до підвищення його міцності та зменшує проникність. Ефективність цього процесу можна оцінити через внутрішню вологість бетону, залежно від співвідношення радіусу водонаповнених капілярів до вологості порового простору.

Достатньо простим та економічно доступним способом забезпечення внутрішнього резерву води в бетоні з підвищеною міцністю є використання пористих матеріалів. Подрібнені пористі пуцоланові матеріали володіють здатністю швидко поглинати воду завдяки їх високій питомій поверхні. Заміна дрібного заповнювача заздалегідь водонасиченим пористими матеріалами суттєво впливає на зменшення усадочних деформацій, поліпшує характеристики бетону та навіть сприяє підвищенню морозостійкості [146, 176, 365]. Проте, зазвичай, може спостерігатися невелике зниження міцності на стиск [177]. Пуцоланові матеріали

здатні частково замінити портландцемент в бетоні, тим самим зменшуючи негативний вплив виробництва портландцементу на довкілля, знижуючи вартість бетону та підвищуючи його міцність та експлуатаційні характеристики.

Реакція між портландцементом і водою призводить до утворення гелевих та кристалічних продуктів гідратації. Така взаємодія супроводжується контракційною усадкою, так, як кінцеві продукти реакції займають менший об'єм, ніж вихідні компоненти (рис. 4.4).

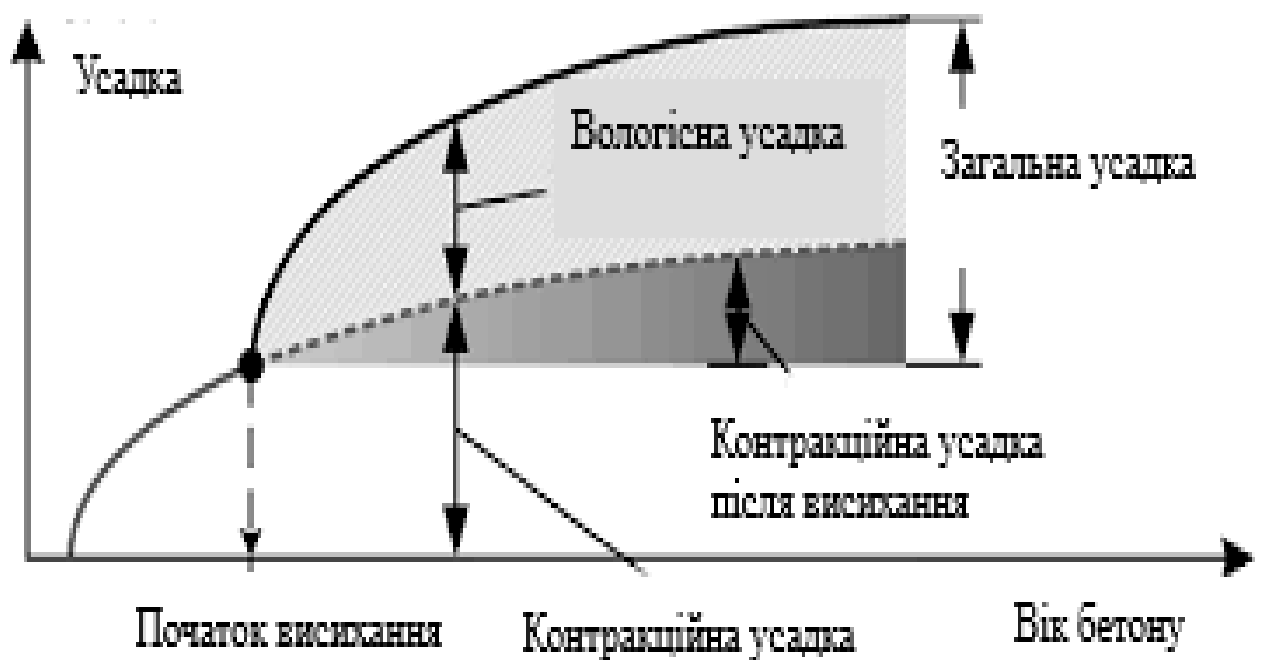


Рисунок 4.4 - Процес усадки в бетоні з підвищеною міцністю [227]

До початку тужавіння портландцементу проходить вологісна усадка [145], а з початком тужавіння контракційна усадка бетону. Процес зменшення об'єму системи на основі портландцементу за відсутності достатньої для гідратації води викликає самообезводнення, через те, що у мікроструктурі утворюються частково заповнені поровим розчином капіляри. Розчини, що залишаються у частково обезводнених порах, створюватимуть суттєвий капілярний тиск, прямопропорційний до поверхневого натягу розчину і обернено пропорційний розміру найбільшої частково обезводненої пори. Рівняння Юнга описує дане співвідношення (4.2) [150]:

$$\sigma = \frac{-2\gamma\cos\theta}{r} \quad (4.2)$$

де σ - напруження або капілярний тиск, γ - поверхневий натяг розчину, що знаходиться в порах, θ – контактний кут, а r - радіус пор.

Як видно з рівняння (4.2), існують два способи зниження величини даних капілярних напружень, а саме зменшення поверхневого натягу розчину в порах за рахунок використання хімічної добавки SRA (Shrinkage Reducing Admixture) [147] та збільшення об'єму пор у бетоні введенням додаткових резервів води в структуру бетону. У випадку, коли додаткових пор недостатньо, у процесі гідратації дані капілярні напруження будуть значно зростати, оскільки з часом будуть зневоднюватися пори все меншого діаметру.

Надлишковий капілярний тиск водночас створюватиме суттєву усадку структури, що можна обчислити з використанням модифікованого рівняння Маккензі (Mackenzie, 1950) [150]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma S}{3} \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right) \quad (4.3)$$

де ε - лінійна деформація, K – модуль об'єму пористого матеріалу, K_s - модуль щільності структури, а S - ступінь насичення порового простору (від 0 до 1). Коли дані напруження та деформації усадки стають критичними, може виникати мікротріщиноутворення у ранньому віці, знижуючи довговічність бетонних конструкцій.

Самообезводнення і зростання σ призводить до зниження внутрішньої відносної вологості системи, що твердне. Процес описується рівнянням Кельвіна (4.4) [150]:

$$\sigma = \frac{RT \ln(RH)}{V_m} \quad (4.4)$$

де R - універсальна газова стала, RH - відносна вологість, T - абсолютна температура, а V_m - молярний об'єм порового розчину.

Рівняння (4.4) свідчить, що ефективність внутрішнього резерву води можливо

кількісно визначити шляхом вимірювання внутрішньої відносної вологості тверднучої системи. Поєднання рівняння (4.4) із залежністю (4.2) встановлює взаємозв'язок між відотною вологістю порового простору і розміром капілярів, що піддаються обезводненню (рис. 4.5).

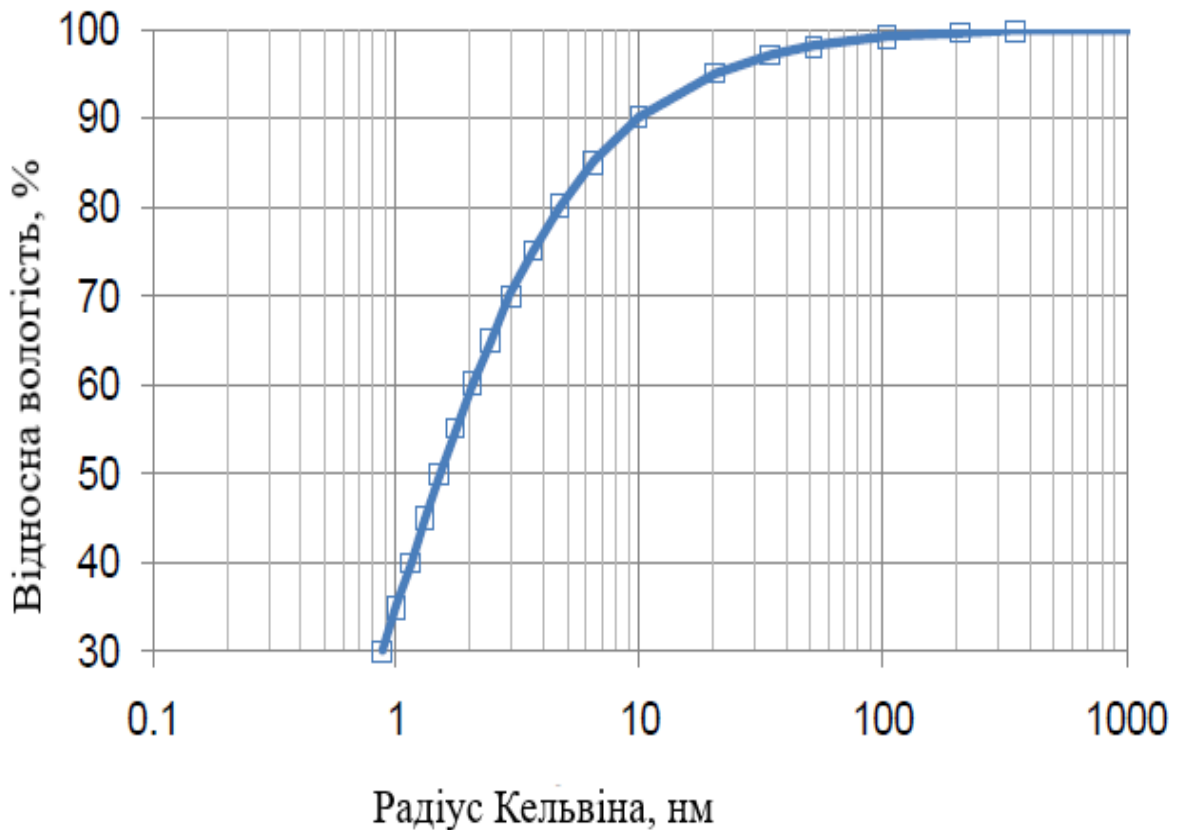


Рисунок 4.5 – Співвідношення між внутрішньою відотною вологістю та радіусом капілярів, що обезводнюються [150]

Таким чином, основною метою резерву води є створення внутрішнього джерела додаткової вологи, щоб забезпечити насичення капілярних пор цементуючої системи в процесі гідратації, що зменшить внутрішні напруження і деформації усадки. Також додаткова вода підвищить повноту гідратації портландцементу в бетоні з пуцолановими матеріалами, забезпечить належний набір міцності і знизить проникність бетону. Зазвичай, частину цієї надмірної вологи забезпечують за допомогою догляду за бетоном, який може включати в себе створення туманних завіс, полив або покриття вологими матеріалами, але у бетонах з високою міцністю капілярна пористість різко знижується під час перших днів

гідратації. Тому вода, яка надходить у процесі зовнішнього догляду, може проникати в структуру бетону тільки на кілька міліметрів від поверхні, тоді як внутрішня частина бетону самообезводнюється. Тому метою створення внутрішнього резерву води можна вважати забезпечення додаткової кількості вологи у необхідному обсязі та з рівномірним розподілом у всьому об'ємі бетону, щоб зберегти оптимальну вологість тривимірної структури портландцементного композиту і зменшити деформації усадки (рис. 4.6).

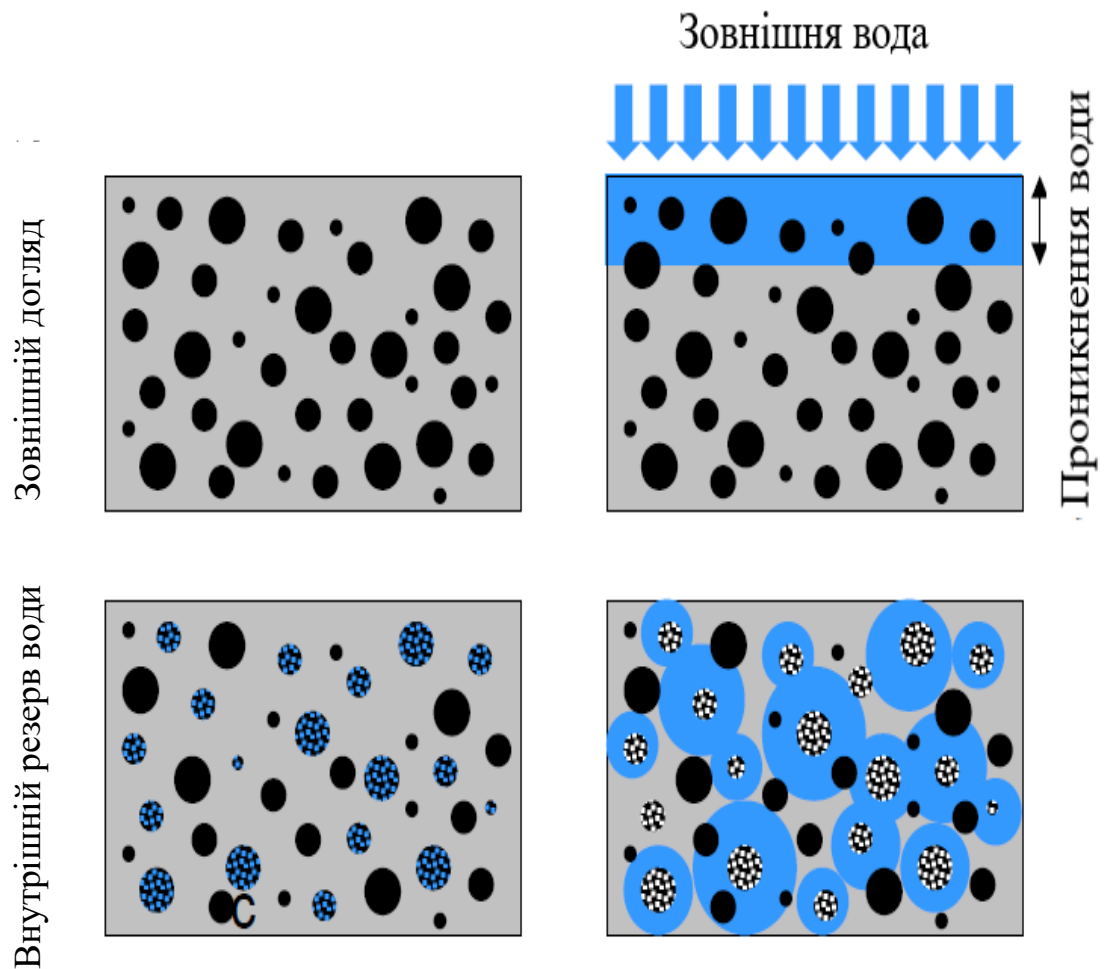


Рисунок 4.6 – Процес забезпечення внутрішнього резерву води [150]

Для оцінки ефективності використання цих полідисперсних пуцоланічних матеріалів як резервуарів для додаткової води, проводилися дослідження адсорбційних властивостей ПЦТ і ПП та міцнісних характеристик бетонів, що тверднули в різних умовах [352, 353]. Аналіз кінетики адсорбції води цими матеріалами залежно від часу показав, що ПЦТ має більш інтенсивне поглинання,

але об'єм адсорбованої води в полідисперсному перліті перевищує ПЦТ майже у 5 разів (рис. 4.7).

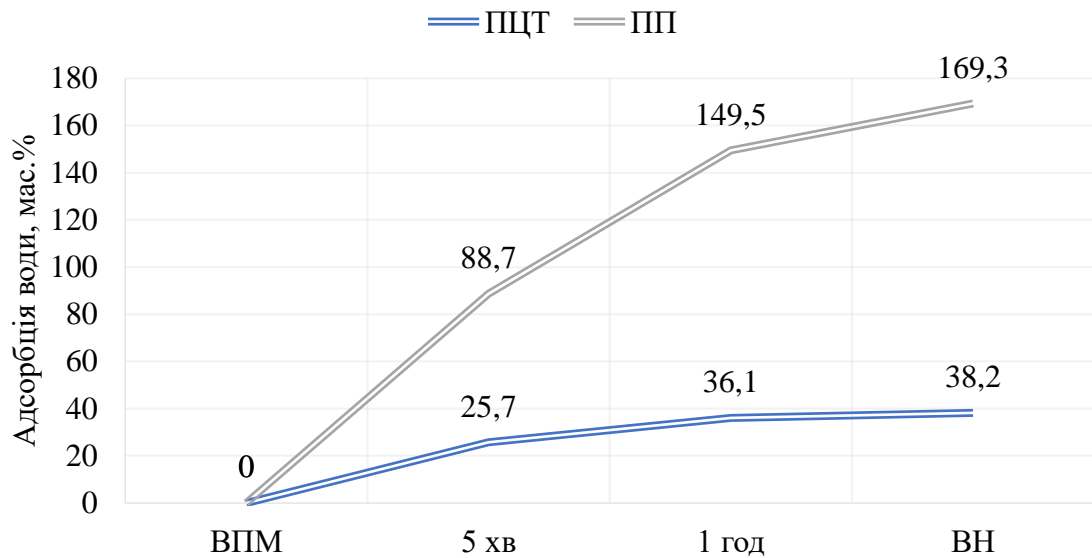


Рисунок 4.7 - Кінетика адсорбції води пористими компонентами в часі:
ВПМ - висушений до постійної маси, ВН –водонасичений

Оскільки ефективність внутрішнього резерву води зростає обернено пропорційно водоцементному відношенню, його вплив визначали у бетонах з В/Ц=0,37, заформованих з сумішшю номінального складу за масою 1:1,65:2,88 з маркою бетонної суміші за осадкою конуса S1, та вмістом 10 мас.% і 10 об.% полідисперсного цеолітового туфу та перліту відповідно, шляхом співставлення властивостей бетонів за різних умов тверднення з контрольним складом К (табл. 4.2) [235].

Таблиця 4.2 - Вміст мінеральних добавок та властивості бетонних сумішей

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

Бетони на основі бетонної суміші з осадкою конуса S1 та вмістом полідисперсного цеолітового туфу після тверднення в сухих умовах у віці 90 діб не характеризуються значним недобором міцності на відміну від контрольного складу (рис. 4.8) [350]. Так, через 90 діб тверднення контрольного бетону в сухих умовах міцність на 9% нижча порівняно з нормальними, в той час як для бетонів з ПЦТ та ПП тільки на 3%. Це служить підтвердженням гіпотези про позитивний вплив додаткових внутрішніх резервуарів води у бетоні на нормалізацію перебігу реакцій гідrataції і забезпечення розвитку міцності цементобетону в сухих умовах тверднення [91].

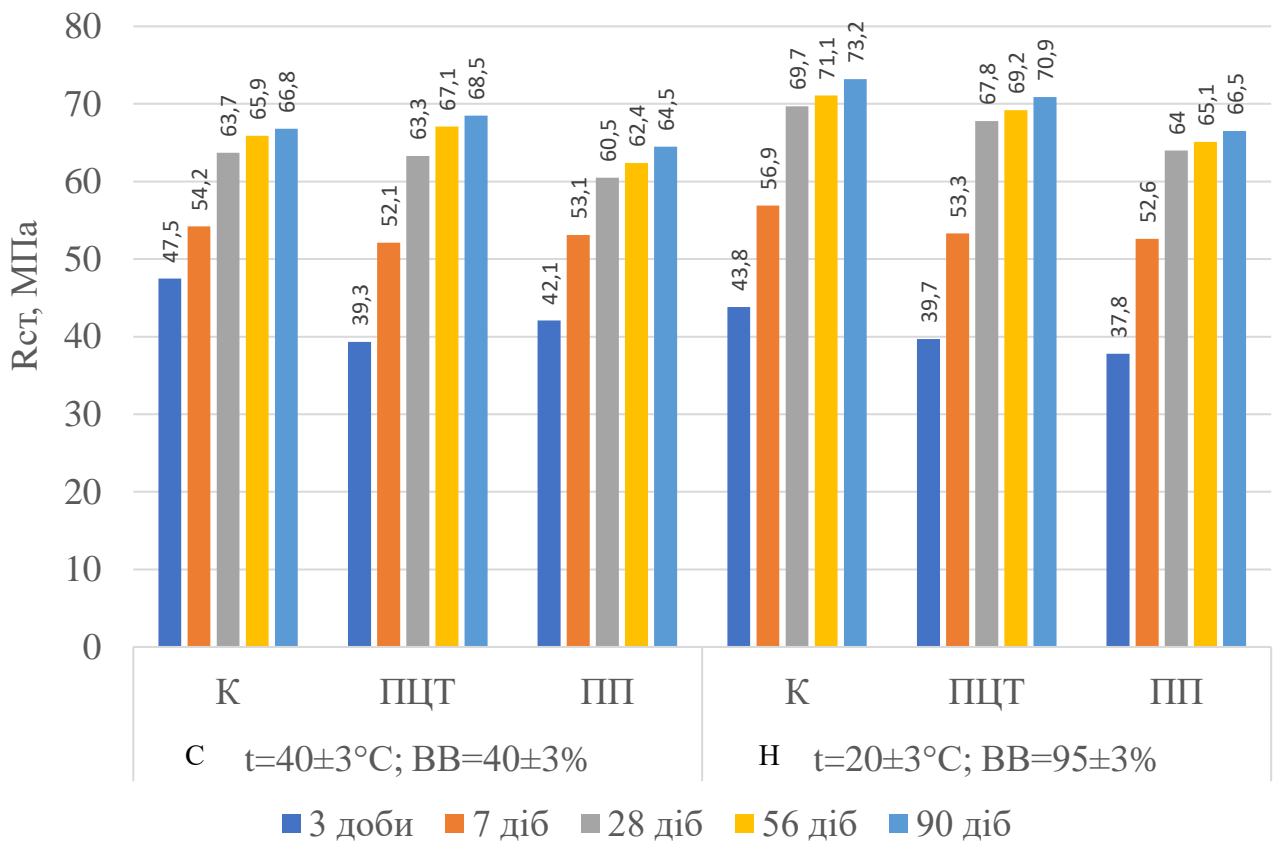


Рисунок 4.8 - Міцність на стиск бетонів у різних умовах тверднення

Співвідношення між результатами визначення границі міцності на розтяг при згині бетонів, що тверднули у різних умовах вказують на високу чутливість цього показника до обезводнення (рис. 4.9). Встановлено, що міцність на розтяг при згині зразків складу К через 90 діб тверднення в повітряно-сухих умовах складає

5,5 МПа, тоді як міцність бетону, що тверднув у нормальних умовах є нижчою на 28% порівняно з контрольним складом. Найвищі показники характерні для бетону з вмістом 10 мас.% ПЦТ, з досягненням міцності на розтяг при згині 8,9 МПа через 90 діб тверднення в нормальних умовах.

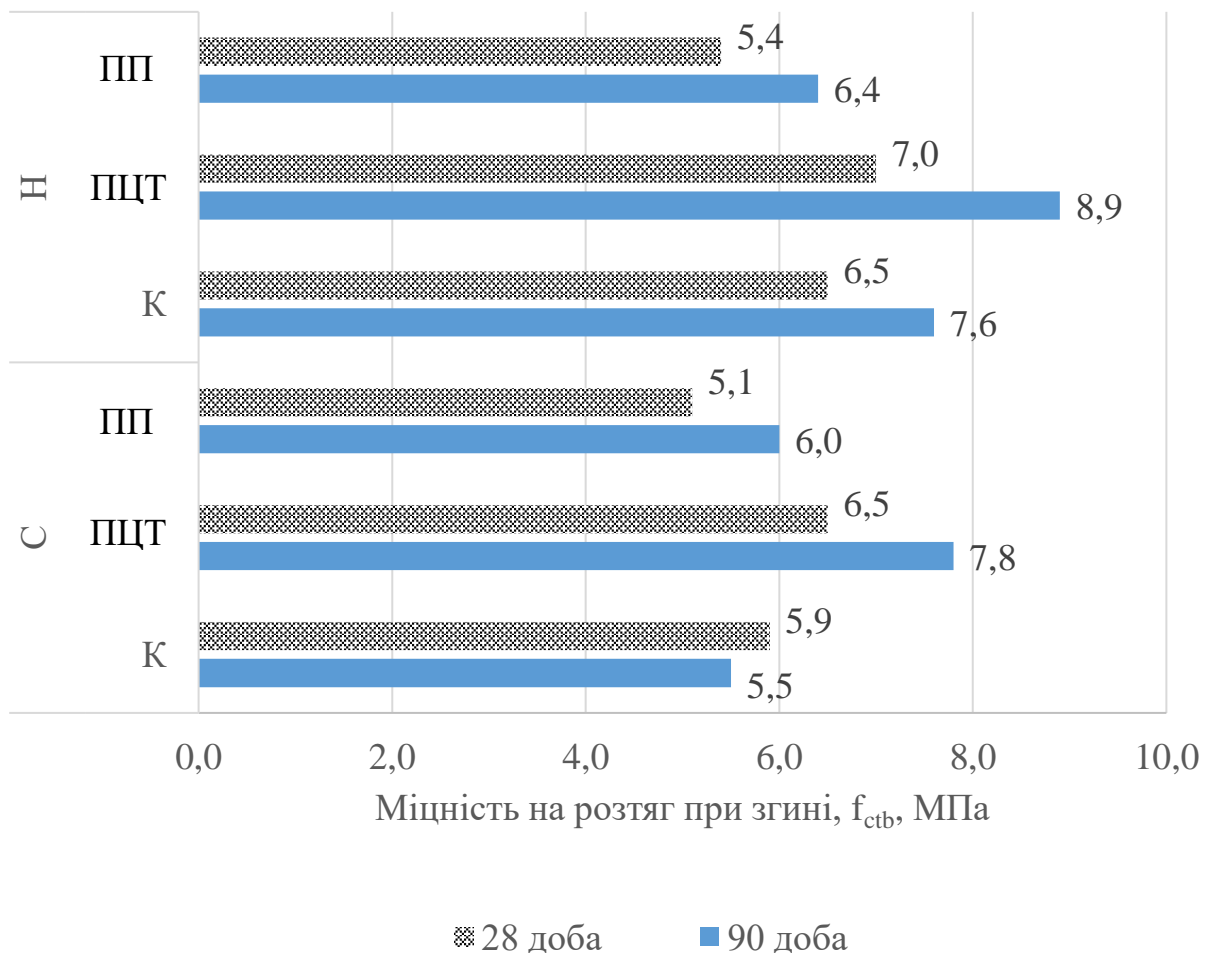


Рисунок 4.9 - Міцність на розтяг при згині бетонів у різних умовах тверднення: «Н» – нормальні ($t=20\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=95\pm 3\%$), «С» – повітряно-сухі ($t=40\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=40\pm 3\%$)

Як видно з рис. 4.11, внутрішня відносна вологість бетонів пропорційна втраті маси бетонних зразків (рис. 4.10). Аналіз одержаних результатів свідчить, що полідисперсний перліт є більш перспективним для забезпечення внутрішнього догляду ніж полідисперсний цеолітовий туф. Це пов'язано з тим, що цей компонент

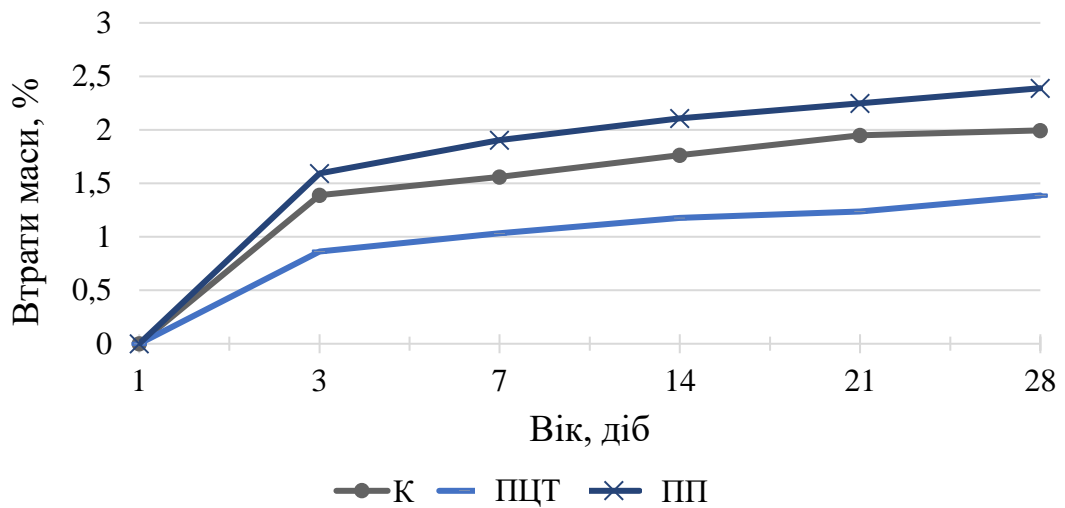


Рисунок 4.10 - Втрати маси зразків, що знаходилися в сухих умовах

має вищий показник адсорбції води. В той же час, досить низькі механічні характеристики та пуцоланічна активність перліту обмежують використання полідисперсного перліту в бетонах з підвищеною міцністю.

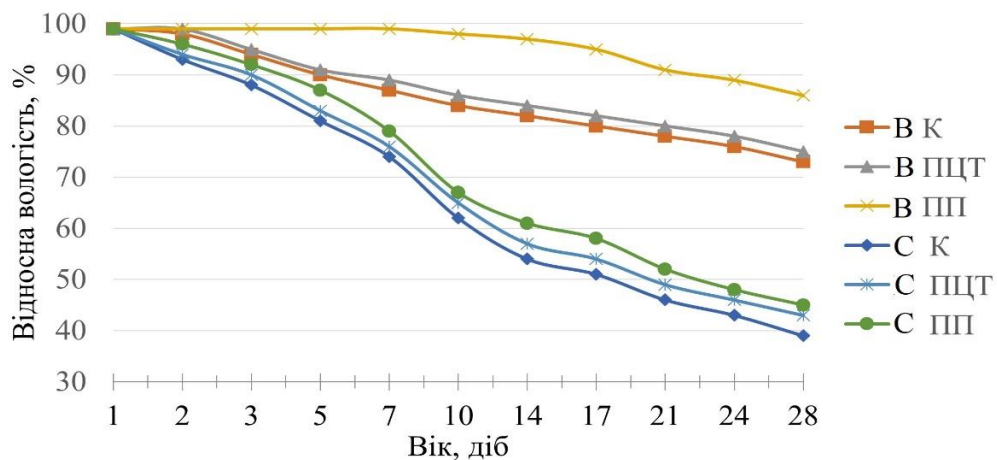


Рисунок 4.11 – Відносна (внутрішня) вологість бетонів за різних умов тверднення:

«С» – $t=40\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=40\pm 3\%$; «В» – $t=20\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=68\pm 3\%$

Отже, застосування полідисперсного цеолітового туфу забезпечує належний внутрішній резерв води, більш повне протікання гідратації в'язучого, знижує імовірність самообезводнення бетону з підвищеною міцністю, а також дає змогу підвищити фізико-механічні характеристики таких бетонів.

4.2. Вплив повітровтягувальних добавок на властивості бетонів на мезоструктурному рівні

Для підвищення експлуатаційних характеристик, морозостійкості та довговічності бетонів в більшості випадків застосовують повітровтягувальні добавки. Вивчення впливу повітровтягувальних добавок на розчинову суміш та затверділу розчинову частину бетону становить значний інтерес з практичної та теоретичної точок зору [275]. Відомо, що властивості розчинової частини залежать від її складу. Тому проведено дослідження впливу повітровтягувальних добавок та складу розчинової суміші на густину, об'єм втягнутого повітря розчиновою сумішшю та міцність на стиск затверділих розчинів [272].

Застосування повітровтягувальних добавок призводить до втягування необхідної кількості бульбашок повітря, які змінюють густину і покращують реологічні властивості розчинової суміші, а також впливають на міцність затверділих розчинів [77, 85]. Додавання повітровтягувальних добавок покращує легкоукладальність розчинових сумішей. Це дозволяє реалізувати технологічний ефект від використання добавки при зниженні водоцементного співвідношення. Результати випробувань свідчать (рис. 4.12), що суттєве зниження (на 44%) В/Ц

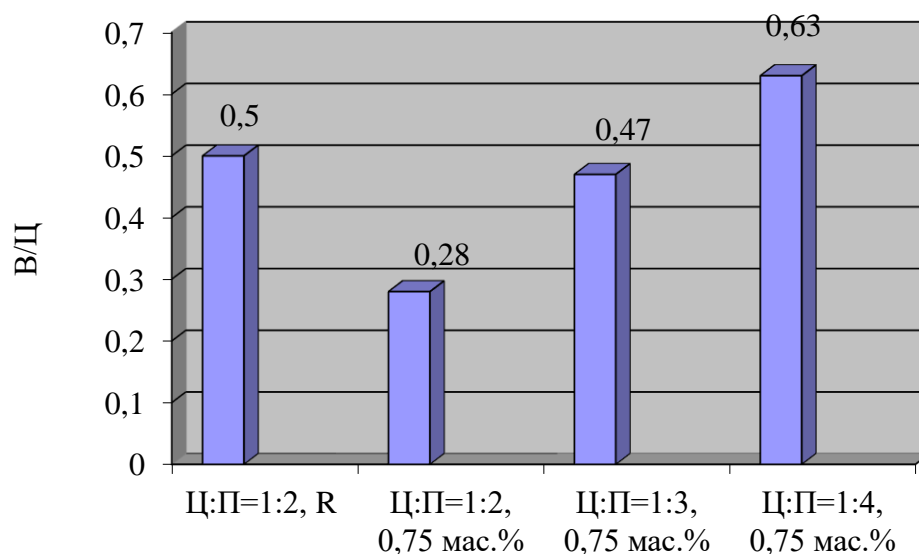


Рисунок 4.12 - В/Ц відношення розчинів з різним співвідношенням портландцементу і піску (РК=125-135 мм)

відношення спостерігається для розчину із співвідношенням цемент:пісок=1:2. Якщо співвідношення Ц:П становить 1:3, відбувається незначне зниження В/Ц відношення порівняно з еталонним розчином R. Подальше зниження співвідношення Ц:П, що містить повітровтягувальну добавку, призводить до збільшення В/Ц відношення на 26%.

Середня густина розчинів при РК=125-135 мм, що містять повітровтягувальні добавки, закономірно знижується порівняно з контрольним розчином (рис. 4.13). Зменшення середньої густини спостерігається для розчинів зі співвідношенням Ц:П=1:2 і 1:3 на 8,2 і 10,6% відповідно. Однак густина зростає з 1758 до 1789 кг/м³, якщо співвідношення Ц:П змінюється з 1:3 до 1:4.

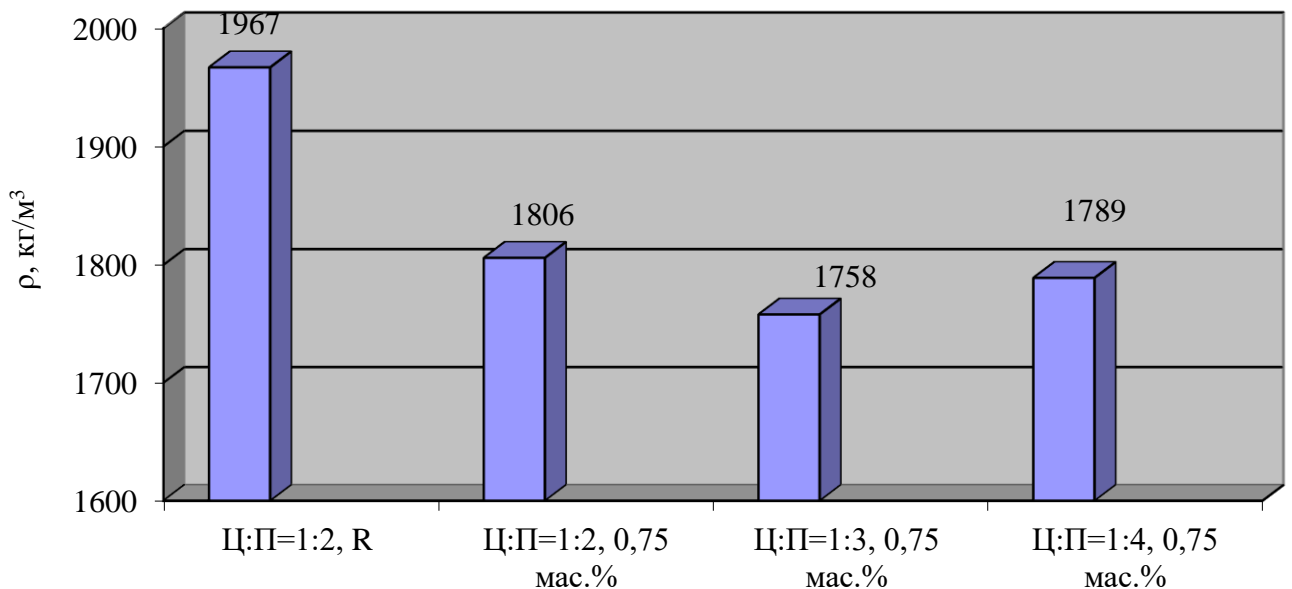


Рисунок 4.13 – Середня густина розчинових сумішей з різним співвідношенням портландцементу і піску (РК=125-135 мм)

Як видно з рис. 4.14, найбільший об'єм втягнутого повітря ($V=11,4\%$) спостерігається для розчинової суміші з найбільшим вмістом цементного тіста (Ц:П=1:2). Збільшення кількості піску в розчинах з співвідношенням Ц:П=1:3 і Ц:П=1:4 призводить до зростання об'єму втягнутого повітря з 4,9 для контрольного розчину R до 7,4 і 7,2% відповідно. Отримані результати показують, що об'єм втягнутого повітря залежить від номінального складу суміші.

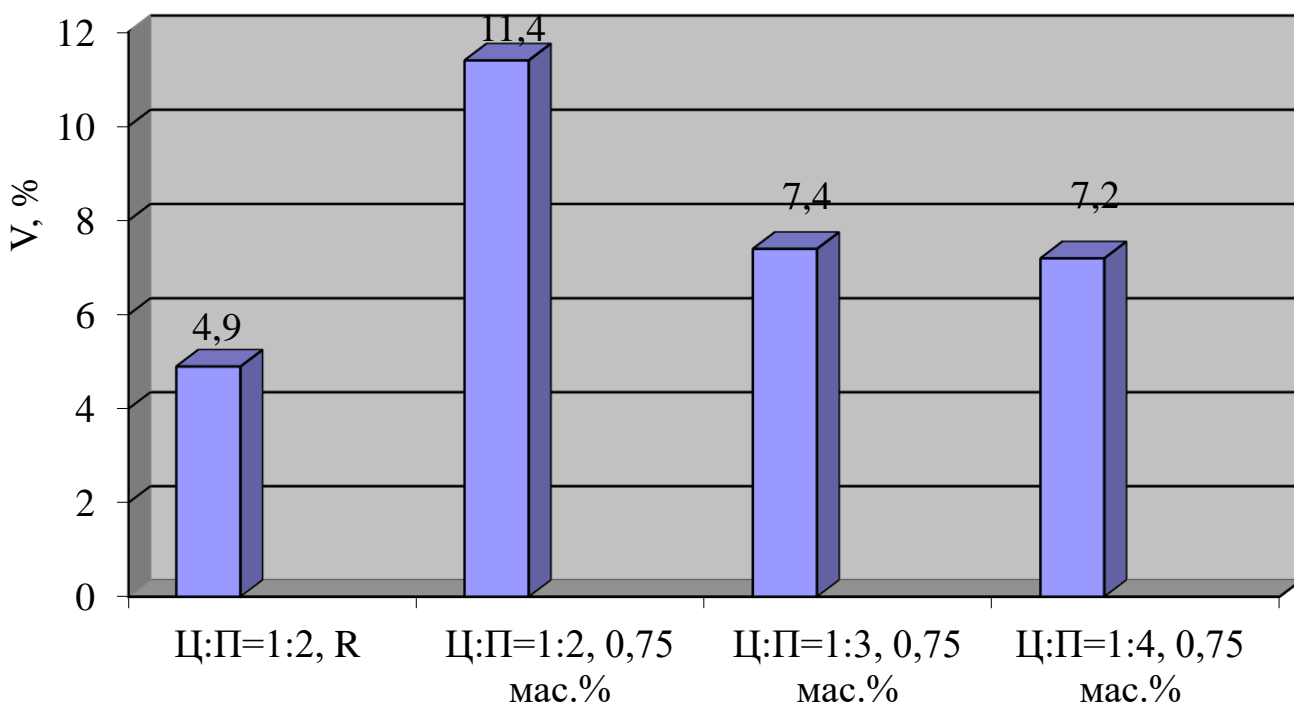


Рисунок 4.14 - Об'єм втягнутого повітря розчиновими сумішами з різним співвідношенням цементу і піску (РК=125-135 мм)

Результати визначення міцності на стиск наведені на рис. 4.15. Отримані значення показують, що, незважаючи на значний об'єм втягнутого повітря в розчині з Ц:П=1:2, його міцність на стиск є вищою у всі терміни тверднення. Так, міцність на стиск збільшується на 16,7; 56,1 і 13,9% через 7; 14 і 28 діб тверднення відповідно порівняно з контрольним складом. В цьому випадку спостерігається ключова роль В/Ц відношення. Збільшення вмісту піску в розчинах із номінальним складом Ц:П=1:3 і Ц:П=1:4 і більший об'єм втягнутого повітря спричиняє зниження міцності на стиск порівняно з контрольним розчином R. Слід зазначити, що при використанні повітровтягувальних добавок закономірність, пов'язана з В/Ц відношенням, не зберігається, коли міцність на стиск збільшується зі зменшенням В/Ц відношення. З отриманих результатів слід зазначити, що зниження міцності на стиск залежить від номінального складу розчину.

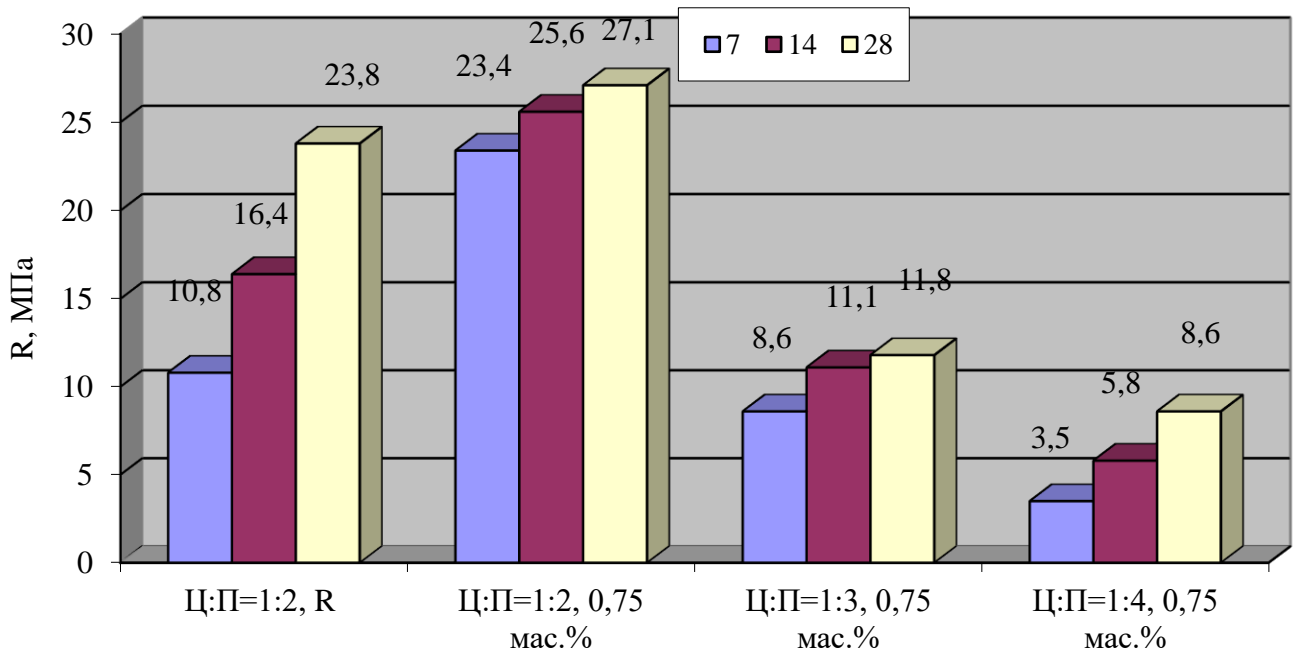


Рисунок 4.15 - Міцність розчинів на стиск із різним співвідношенням цементу та піску (РК=125-135 мм)

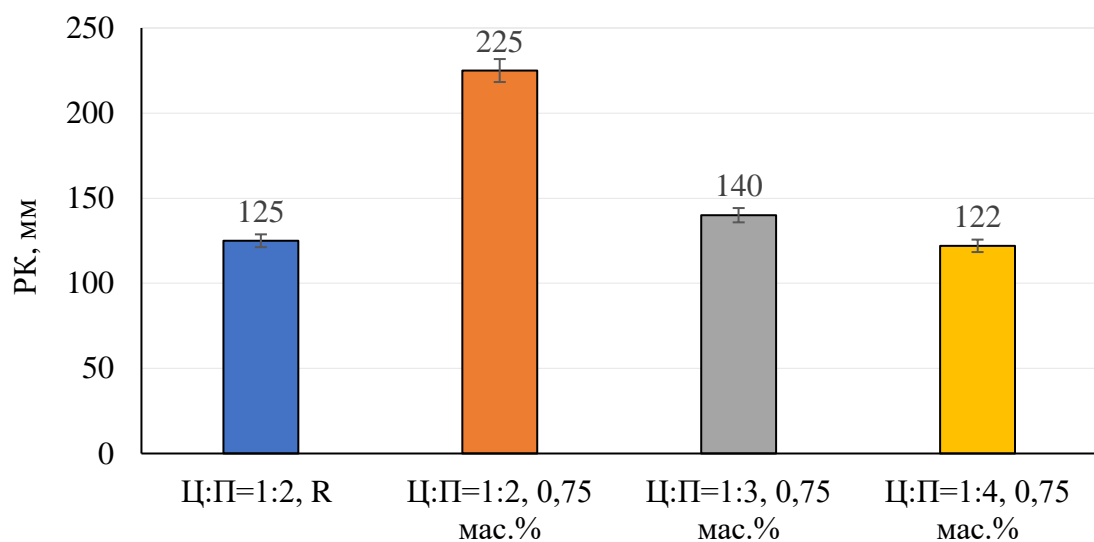
Втягування повітря досить складний процес. Тому дослідження впливу повітровтягувальної добавки при сталому водоцементному відношенні на реологічні властивості суміші, густину та міцність на стиск має також практичне та теоретичне значення [179, 348, 351].

Проведено дослідження впливу повітровтягувальної добавки та складу розчинової частини бетону на об'єм втягнутого повітря, пластичність, густину розчинової суміші, а також міцність на стиск і стійкість до попереминого заморожування та відтаювання розчину.

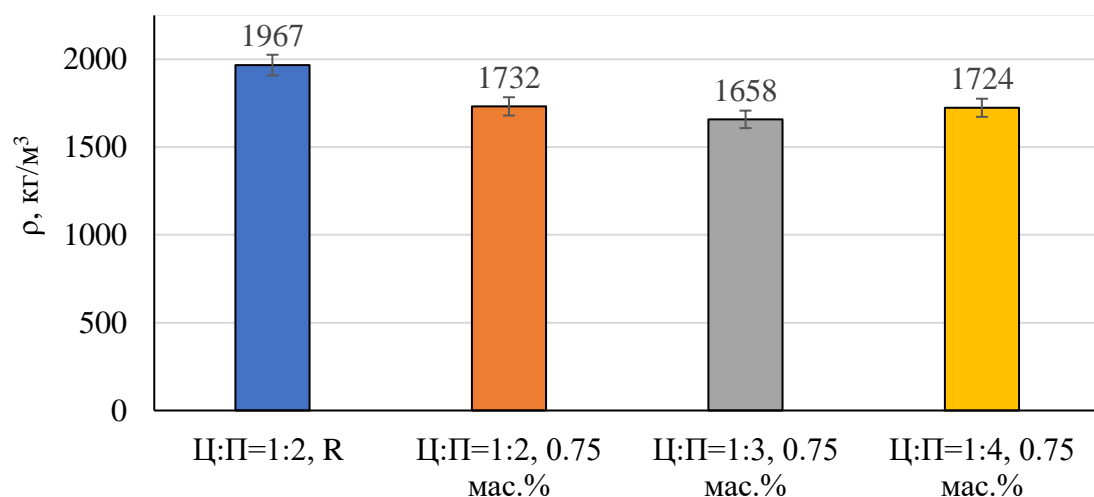
Повітровтягувальні добавки дозволяють отримувати систему стабільних повітряних пор в розчині та бетоні, що призводить до зменшення розшарування, покращення водоутримувальної здатності, рухомості, підвищення стійкості до попереминого заморожування та відтаювання та, як наслідок, довговічності.

Легкоукладальність є дуже важливою характеристикою якості як розчинових, так і бетонних сумішей і визначає якість ущільнення та формування. Відповідно до

отриманих результатів (рис. 4.16, а), введення повітровтягувальних добавок призводить до підвищення пластичності сумішей за рахунок ефекту «роликотпідшипника» [367] на 80 і 12% при співвідношенні цементу і піску 1:2 і 1:3 відповідно. При ще більшому підвищенні вмісту піску (Ц:П=1:4) спостерігається незначне зниження розпливу конуса порівняно з еталонним розчином (Ц:П=1:2) без повітровтягувальних добавок. Позитивний вплив повітровтягувальних добавок на рухомість розчинових сумішей підтверджується також деякими дослідниками [191, 348].



а



б

Рисунок 4.16 - Розплив конуса (а) і густина (б) розчинових сумішей з різним номінальним складом (В/Ц=0,5)

Результати визначення середньої густини розчинів залежно від співвідношення цементу і піску та наявності повітровтягувальних добавок наведено на рис. 4.16, б. Густина розчинової суміші (Ц:П=1:2), що містить повітровтягувальні добавки, зменшується з 1967 до 1732 кг/м³. При співвідношенні цементу і піску 1:3 густина досягає 1658 кг/м³. Збільшення піску в розчинової суміші (Ц:П=1:4) призводить до зростання густини майже на 4% порівняно з сумішшю із співвідношенням цементу до піску 1:3.

Об'єм втягнутого повітря розчинових сумішей з різними співвідношеннями портландцементу та піску при В/Ц відношенні 0,5 представлений на рис. 4.17. Результати свідчать, що об'єм втягнутого повітря залежить не лише від розпливу конуса, а й від номінального складу розчину. Так, найбільшу кількість втягнутого повітря (14,5%) отримано при співвідношенні портландцементу і піску 1:2. Спостерігається збільшення майже в 3 рази порівняно з еталонним розчином. Зростання вмісту піску в розчинах із співвідношенням портландцементу до піску 1:3 і 1:4 призводить до збільшення вмісту повітря порівняно з еталонним розчином лише на 59 і 51% відповідно. Це можна пояснити меншою в'язкістю суміші.

Як показано на рис. 4.18, така ж тенденція спостерігається при дослідженні впливу повітровтягувальних добавок на міцність при стиску затверділих розчинів.

Чим більший об'єм втягнутого повітря, тим нижча міцність цементного розчину на стиск спостерігається при однаковому співвідношенні цементу і піску. Як видно з рис. 4.18, міцність розчину, що містить 0,75 мас.% повітровтягувальної добавки (Ц:П=1:2), знижується порівняно з еталонним розчином (Ц:П=1:2, R) на 58,3; 59,8 і 65,9% через 7; 14 і 28 діб тверднення відповідно. Якщо відношення портландцементу до піску зменшується, об'єм втягнутого повітря зменшується. Міцність на стиск дещо знижується через 7 діб тверднення (Ц:П=1:3) і підвищується на 18,2 і 20,9% через 14 і 28 діб порівняно з розчином, що містить повітровтягувальні добавки (Ц:П=1:2). Подальше зменшення співвідношення (Ц:П=1:4) призводить до зниження міцності на стиск на 11,4; 12,8 і 3,2 % через 7; 14 і 28 діб тверднення.

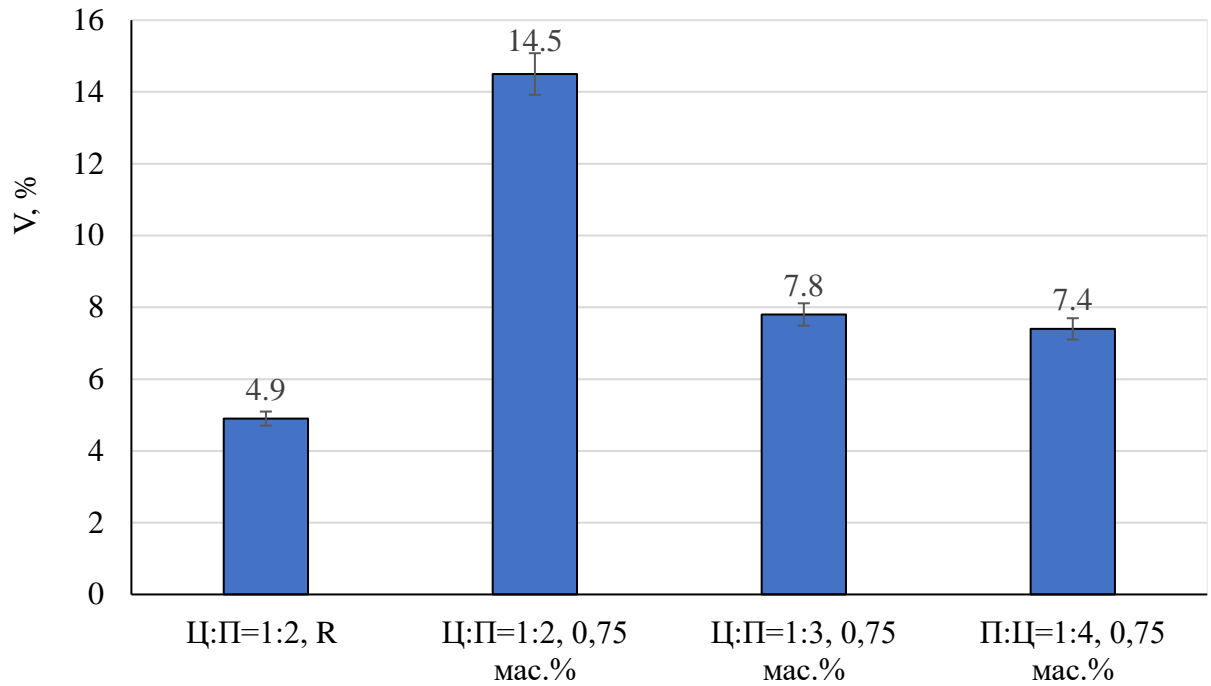


Рисунок 4.17 - Об'єм втягнутого повітря розчиновими сумішами з різними співвідношеннями цементу та піску ($V/C=0,5$)

Довговічність бетонів та будівельних розчинів залежить, в тому числі, від морозостійкості та тріщиностійкості і має велике значення у будівельній галузі, тому що впливає на термін експлуатації будівель і споруд, які знаходяться під дією від'ємних температур, навантаження, а інколи і агресивних середовищ. Деякі дослідники [185, 275] підтверджують, що повітровтягувальні добавки покращують як легкоукладальність бетонної суміші, так і стійкість до попереминого заморожування та відтаювання затверділого бетону. Морозостійкість розчинової частини бетону дуже важлива, оскільки вона має пористу структуру, в якій вода знаходиться в різних формах. Для захисту бетону від пошкоджень через замерзання води необхідна відповідна кількість втягнутого повітря, яка має відповідати вимогам стандарту. На об'єм втягнутого повітря може впливати багато факторів, таких як процес перемішування, склад суміші, характеристики заповнювачів, властивості портландцементу, кількість і якість води, дозування та властивості

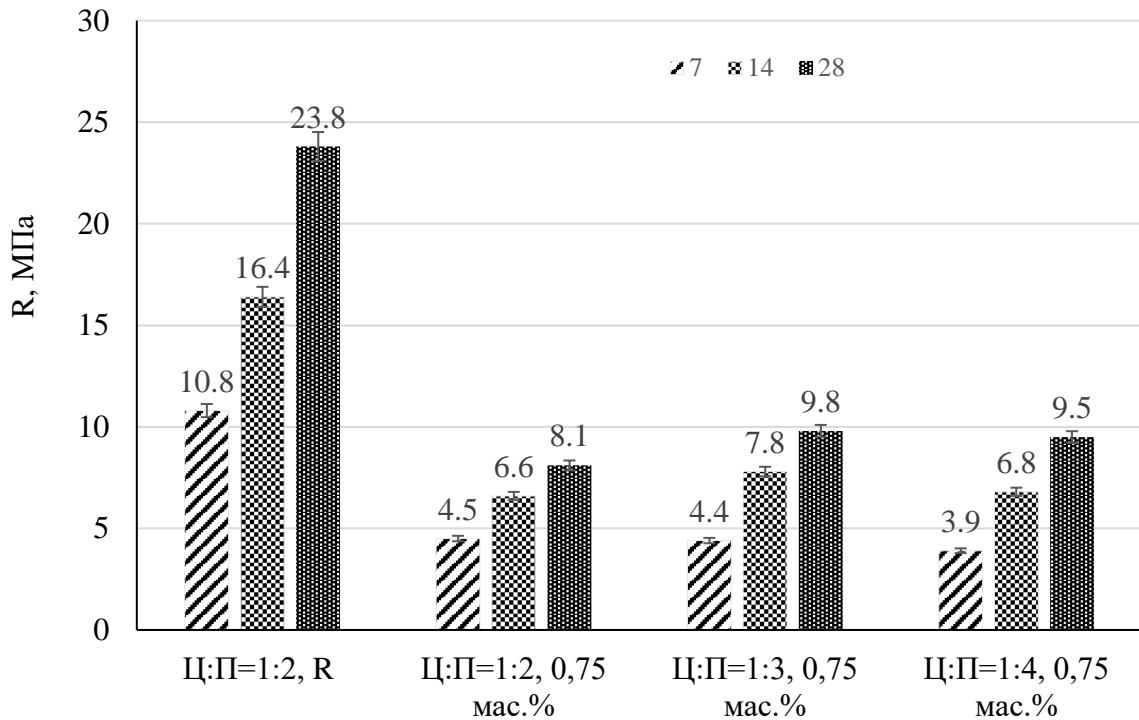


Рисунок 4.18 - Міцність на стиск розчинів з різним співвідношенням портландцементу та піску ($V/C=0,5$)

повітровтягувальних добавок та деякі інші параметри, а саме значення відношення води до портландцементу та портландцементу до піску, тип і мінералогічний склад портландцементу. Руйнування розчинів і бетонів відбувається під впливом негативних температур, які викликають замерзання води в порах і подальше збільшення льоду в об'ємі. Стінки пор руйнуються, в результаті чого виникають внутрішні напруження і, як наслідок, тріщини, які з'являються від несилових впливів і можуть впливати на тріщиностійкість бетону. Почергове заморожування і відтаювання у водонасиченому стані може викликати їх повне руйнування. Механізм зниження міцності на стиск із подальшим руйнуванням бетону відповідно до теорії, яка називається моделлю «glue-spall», після відповідної кількості циклів заморожування та відтаювання детально описаний Tunstall та ін. [367].

В роботі досліджено міцність будівельних розчинів після 35, 50 та 100 циклів заморожування/відтавання (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 - Міцність розчинів на стиск

Ідентифікація сумішей	Кількість циклів заморожування-відтаювання	Міцність розчинів на стиск, МПа		Зниження міцності розчинів порівняно з контрольними (без заморожування/відтаювання, %)
		Перед випробуванням на морозостійкість	Після заморожування / відтаювання	
Ц:П=1:4	35	15,9	14,7	7,5
	50		12,9	18,9
Ц:П=1:4, 0,75 мас.% повітровтягувальної добавки	50	13,6	12,5	8,1
	100		10,4	23,5

Відповідно до отриманих результатів після 50 циклів заморожування/відтаювання найбільше зниження міцності на стиск (18,9%) спостерігається для контрольного розчину. У той же час зниження міцності на стиск розчину, що містить повітровтягувальні добавки, становило лише 8,1%. Подальше збільшення кількості циклів заморожування/відтаювання до 100 для розчину, що містить повітровтягувальні добавки, призводить до зниження міцності на стиск на 23,5%. Це підтверджує позитивний вплив повітровтягувальних добавок на морозостійкість розчинової складової бетону. Ефективність застосування повітровтягувальних добавок для підвищення стійкості бетону до поперемінних циклів заморожування і відтавання також підтверджена багатьма дослідниками [275, 342, 367].

4.3. Властивості бетонів, модифікованих комплексними органо-мінеральними добавками

Деякі технології в будівництві вимагають використання пластичних сумішей при виготовленні бетонних конструкцій з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю. Розроблено бетони на основі сумішей з маркою за осадкою конуса S4, які можна вкладати без дороговартісної спецтехніки, застосовуючи засоби малої механізації, що дає змогу забезпечити разом із необхідними характеристиками міцності і високі показники довговічності бетону [275].

З цією метою запроектовано такі склади бетонів: контрольна суміш Z0P і Z0PA (містить суперпластифікатор та повітровтягувальну добавку) та дві суміші (Z10P, Z10PA), що містять оптимальну кількість полідисперсного цеолітового туфу (10 мас.%), суперпластифікатор та повітровтягувальну добавку. Склади бетонів представлені в табл. 4.4.

Міцність і тріщиностійкість бетону є важливими характеристиками, що визначають його якість, як будівельного матеріалу. Застосування природного цеолітового туфу знижує легкоукладальність бетонної суміші. Втрату технологічності суміші компенсували за допомогою додаткової кількості суперпластифікатора (табл. 4.4). Вища водопотреба бетонних сумішей, що містять цеолітовий туф, викликана унікальною мікроструктурою природного цеолітового туфу. Для підвищення експлуатаційних властивостей бетону використовували повітровтягувальну добавку. Вміст повітря в бетонних сумішах Z0PA та Z10PA, що містять повітровтягувальну добавку, становив 5,1 та 4,0 % відповідно. Це майже в два рази вище порівняно з бетоном без повітровтягувальної добавки.

Міцність бетонів на стиск при В/Ц=0,5 представлена на рис. 4.19. Слід зазначити, що міцність при стиску бетонів з полідисперсним цеолітовим туфом і суперпластифікатором була нижчою, ніж контрольного бетону (без цеоліту) до 90 діб тверднення. У віці 1 доби міцність бетонів з ПЦТ, суперпластифікатором і повітровтягувальною добавкою (Z10PA) на 19,4 % нижча порівняно з контрольним бетоном Z0PA (без цеоліту). Така тенденція підтверджена Najimi та ін. [137] та

Chan і Ji [161], що при В/Ц вище 0,45 міцність бетонів, що містять ПЦТ, нижча, ніж у контрольного бетону. Однак, величина зниження міцності в цілому зменшується зі збільшенням віку тверднення [192, 275, 356]. З часом міцність порівнюваних бетонів вирівнюється. Під час випробувань, проведених через 180 діб, міцність бетонів, що містять ПЦТ, навіть перевищує міцність бетонів без полідисперсного цеолітового туфу. Слід зазначити, що при застосуванні цеолітового туфу в бетоні залежність не зберігається, коли відсоток зниження міцності бетону відповідає відсотковому вмісту ПЦТ в бетоні.

Таблиця 4.4 - Склади цементобетонних сумішей з ПЦТ і хімічними добавками (марка бетонної суміші за осадкою конуса S4)

Умовне позначення	Портландцемент ПЦ I -500-Н	Цеоліт, кг/м ³	Суперпластифікатор (% від маси цементу)	Повітровтягувальна добавка, (% від маси цементу)	Об'єм втягнутого повітря (%)
Z0P	350	-	1,22	-	2,4
Z0PA	350	-	1,22	0,3	5,1
Z10P	315	35	1,64	-	2,4
Z10PA	315	35	1,64	0,3	4,0

Примітка: для всіх сумішей дійсні наступні значення: дрібний заповнювач = 660 кг/м³, крупний заповнювач (2-8 мм) = 450 кг/м³ і крупний заповнювач (8-16 мм) = 700 кг/м³, В/Ц= 0,5.

Слід відзначити, що приріст міцності бетонів з полідисперсним цеолітовим туфом дозволяє зменшити негативний вплив повітровтягувальної добавки на міцність бетону Z10PA.

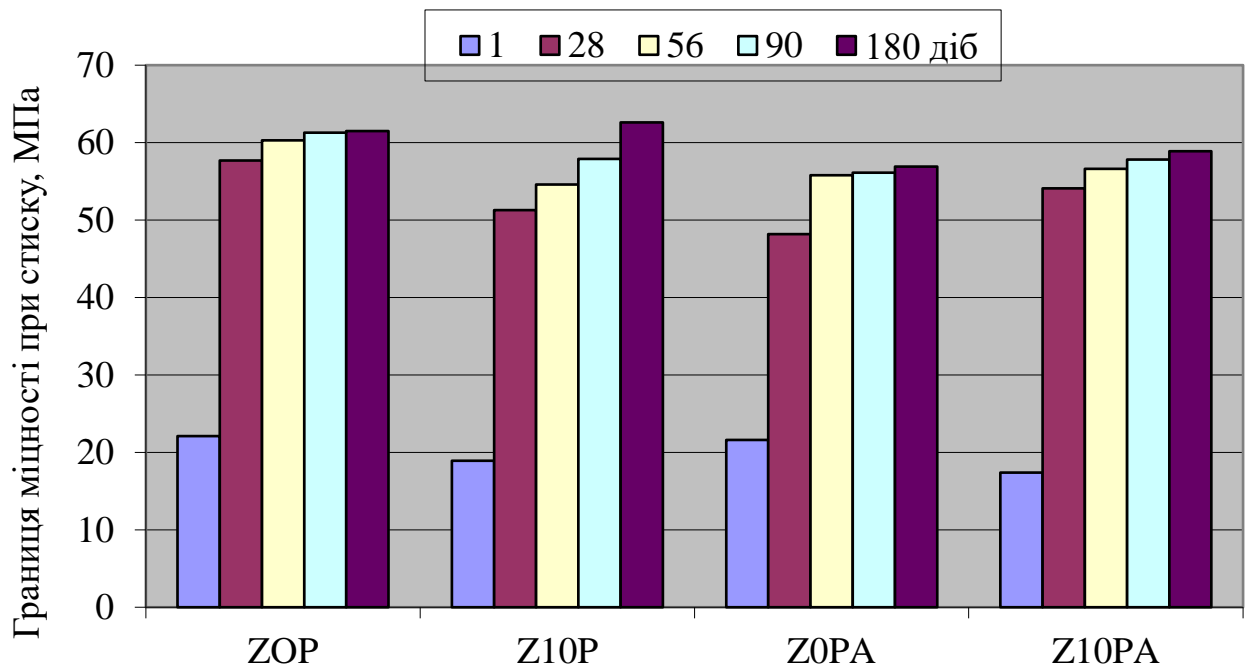


Рисунок 4.19 - Міцність на стиск бетонів

Використання скануючої електронної мікроскопії доповнює дані про структуроутворення цементного каменю. Мікроструктура бетону ZOP характеризується великою кількістю гідратних утворень (рис. 4.20). Деякі кристали вже добре сформовані, а інші ще формуються і мають форму невеликих голчастих або пластинчастих утворень. Нові кристали утворюються на поверхні існуючих кристалів, що призводить до поступового росту шарів продуктів гідратації. Їх морфологія змінюється зі зниженням швидкості кристалізації гідратів. У деяких місцях частина щільно складених гексагональних пластин кальцію гідроксиду трохи змінилася. Це підтверджено результатами мікрозондового аналізу (рис. 4.20, а). Велика кількість кліноптилоліту та площа внутрішньої поверхні природних цеолітів завдяки їхній пористій мікроструктурі, а також вмісту лужних катіонів у їхньому складі забезпечують необхідну пуцоланову активність. Слід зазначити, що вплив кількості катіонів K^+ і Na^+ в хімічному складі ПЦТ на реакційну здатність вапна і, як наслідок, на його пуцоланову активність наведено Саницьким та ін. [103] і Ghourchian та ін. [138].

Використання в бетонах ПЦТ, який є джерелом активних SiO_2 і Al_2O_3 ,

забезпечує утворення додаткової кількості волокнистих кристалів гідросилікатів і подовжених кристалів еtringіту [355]. Це призводить до кольматації пор, ефекту самоармування і зростання міцності бетону на рівні мікроструктури (рис. 4.20, б).

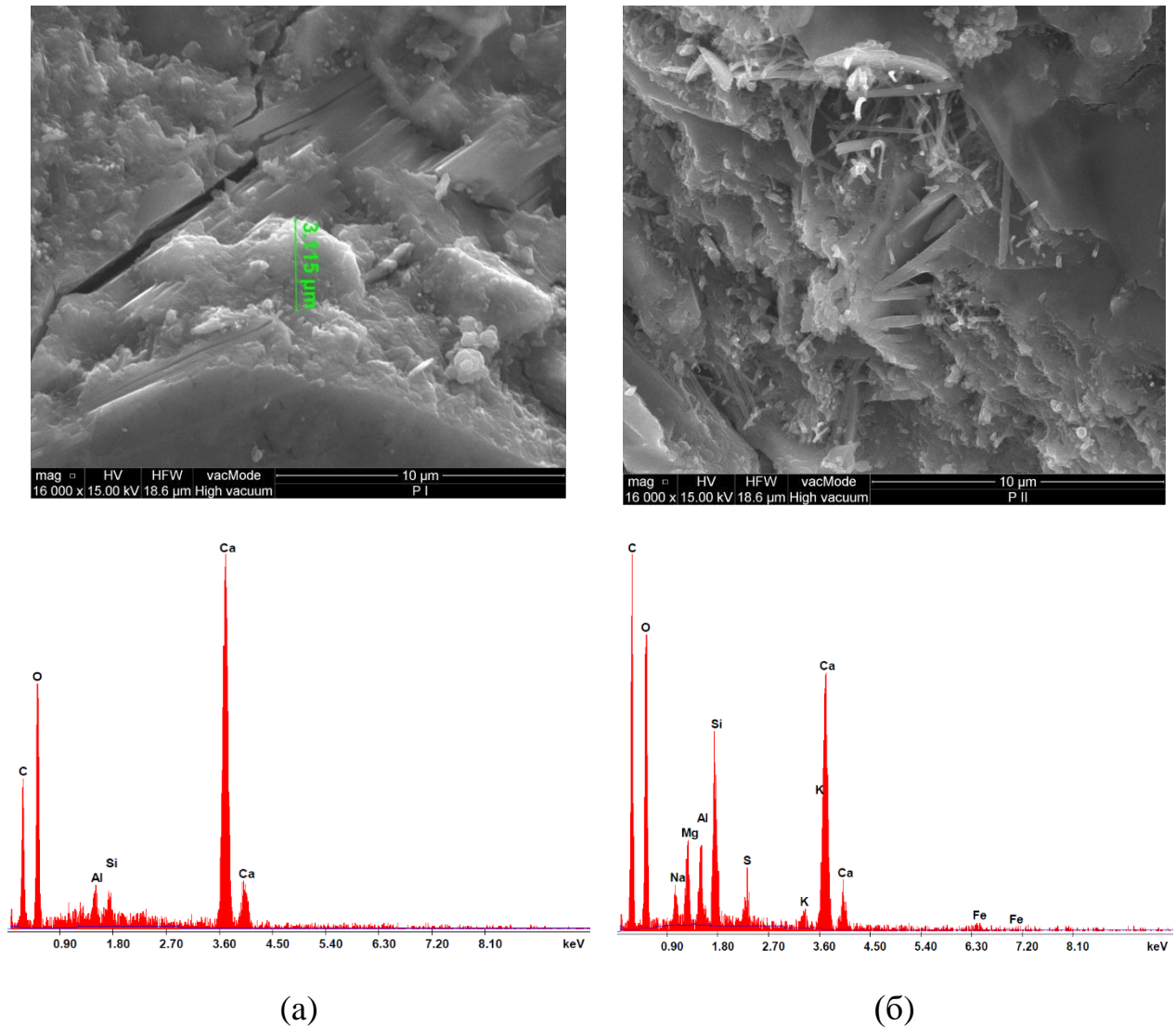


Рисунок 4.20 - Мікроструктура та спектри рентгенівського випромінювання бетону без ПЦТ (а) та з 10 мас. % ПЦТ (б)

Іншими важливими факторами, що впливають на довговічність бетону, є водопоглинання та водонепроникність, які опосередковано представляють пористість, а також дають розуміння інформації про структуру пор бетону. Результати випробувань бетонів на водопоглинання та глибину проникнення води під тиском представлені на рис. 4.21.

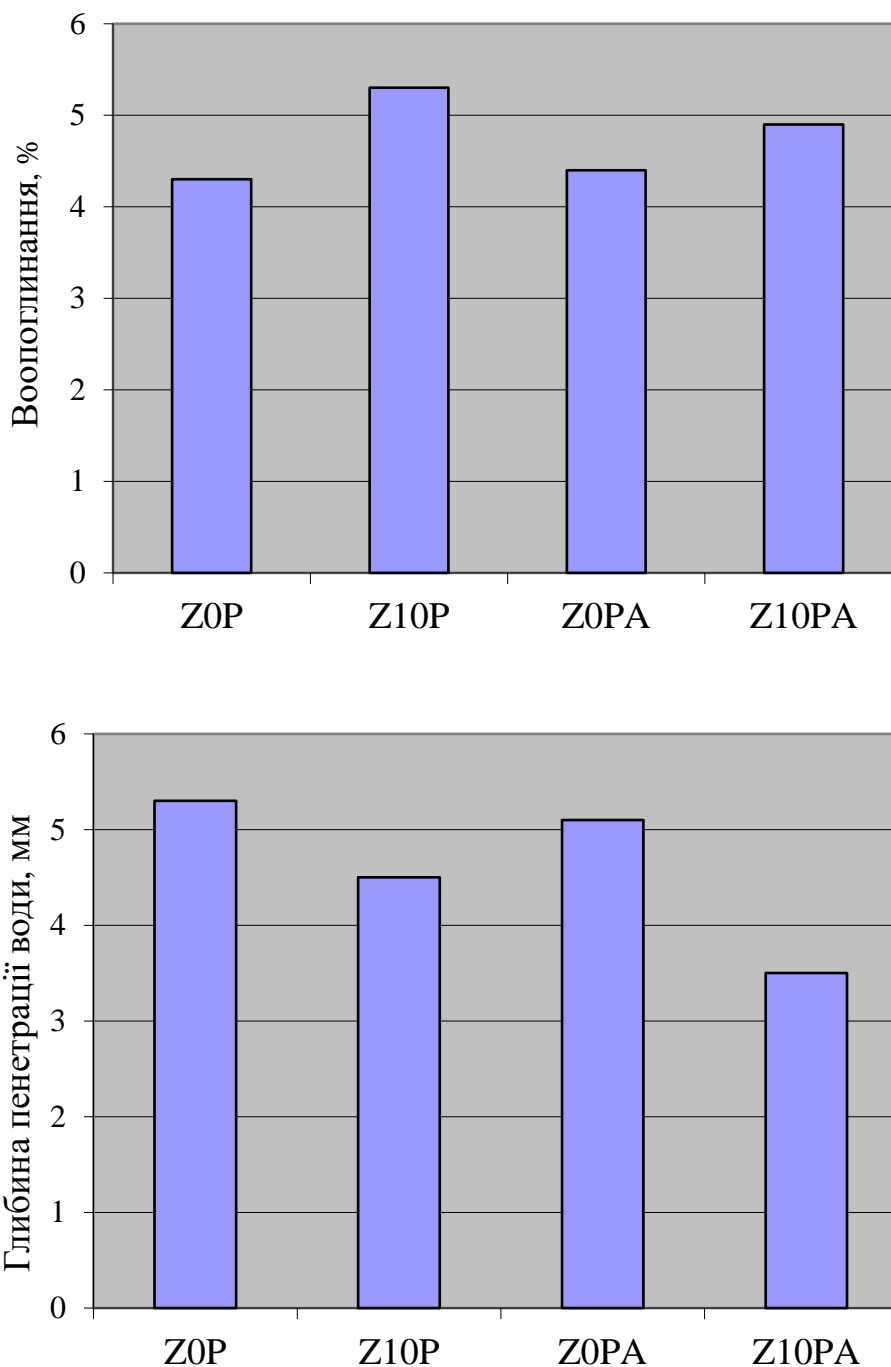


Рисунок 4.21 - Водопоглинання бетонів і глибина penetрації води через 28 діб

Водопоглинання бетонів, що містять ПЦТ і суперпластифікатор (Z10P), а також бетону, що містить ПЦТ, суперпластифікатор і повітровтягувальну добавку (Z10PA), становить 5,3 і 4,9% відповідно. Як видно з рис. 4.21, а, водопоглинання таких бетонів є вищим порівняно з бетонами без ПЦТ (Z0P і Z0PA), що пов'язано з підвищеним водопоглинанням полідисперсного цеолітового туфу та неминуче призводить до підвищеного водопоглинання бетонів.

Глибину проникнення води визначали через 28 діб. Результати свідчать, що

розроблений бетон можна вважати водонепроникним, оскільки глибина проникнення води менше 20 мм. Бетон, що містить ПЦТ, суперпластифікатор і повітровтягувальну добавку (Z10PA), характеризується найменшою глибиною проникнення води 3,5 мм. Це пояснюється позитивним впливом пуцоланової реакції між ПЦТ і продуктами гідратації портландцементу на мікроструктуру, а також повітровтягувальної добавки на структуру пор бетону. Najimi та ін. [137] спостерігали подібні залежності, але глибина проникнення води та водопоглинання бетонів були дещо вищими при однаковому водоцементному відношенні в бетонах, які випробовувалися в цих дослідженнях.

Руйнування бетону у водонасиченому стані при поперемінному заморожуванні і відтаюванні зумовлене складними фізичними процесами, що призводять до деформації та механічного руйнування бетону. Вивчено поведінку бетонів після 50, 100, 150 циклів заморожування/відтавання і зниження міцності на стиск показано в табл. 4.5. Спад міцності спостерігається через утворення тріщин, спричинених великими внутрішніми напруженнями, що є результатом об'ємного розширення. Процес заморожування води призводить до збільшення об'єму бетону приблизно на 9%. В результаті у внутрішній структурі бетону виникають несилові впливи, що можуть спричинити його руйнування. За даними Sun та ін. [342], зменшення міцності спостерігається через розтягуючі напруження, що розвиваються в льоді при зниженні температури. Внаслідок більшого теплового розширення ($50 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для льоду проти $\sim 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для бетону) виникають значні внутрішні напруження, що спричиняє розтріскування і відшарування бетону. Як видно з табл. 4.5, бетони з 10 мас.% ПЦТ показали вищу стійкість до пошкоджень при заморожуванні та відтаюванні порівняно з бетонами без ПЦТ. Це пов'язано з утворенням волокнистих гідросилікатів CSH за рахунок пуцоланової реакції, що призводить до ефекту самоармування та зменшення капілярної пористості бетону, що містить ПЦТ. Vejmelková та ін. [201] також свідчать, що введення 10 мас.% ПЦТ в бетон призводить до кращої стійкості до пошкоджень, спричинених поперемінним заморожуванням та відтаванням (після 100 циклів) порівняно з бетоном без ПЦТ.

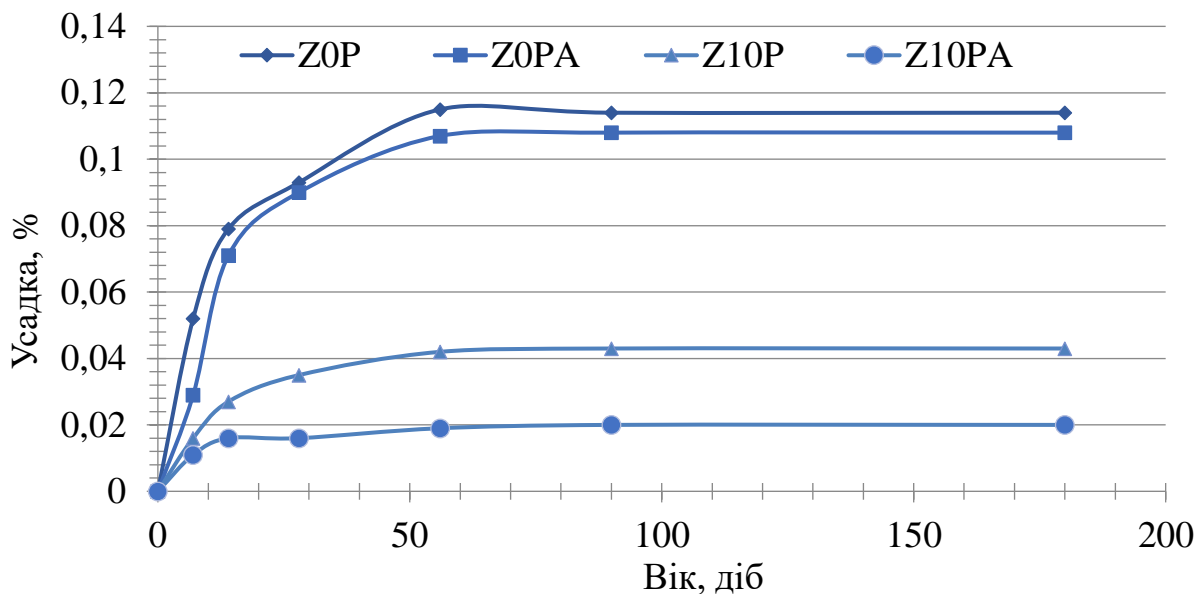
Таблиця 4.5 - Міцність на стиск бетонів

Умовне позначення	Кількість циклів	Границя міцності при стиску, МПа		Зниження границі міцності при стиску основних бетонів порівняно контрольними, %
		контрольних	основних	
NZ0P	50	56,9	49,3	-13,3
	100	58,0	41,7	-28,1
	150	58,5	36,3	-37,9
NZ10P	50	54,8	48,2	-12,0
	100	55,8	44,5	-20,2
	150	54,6	40,6	-25,6
NZ0PA	50	53,6	50,2	-6,3
	100	54,0	42,5	-21,2
	150	53,1	37,4	-29,5
NZ10PA	50	54,8	52,6	-4,0
	100	55,3	49,5	-10,4
	150	55,1	45,2	-17,9

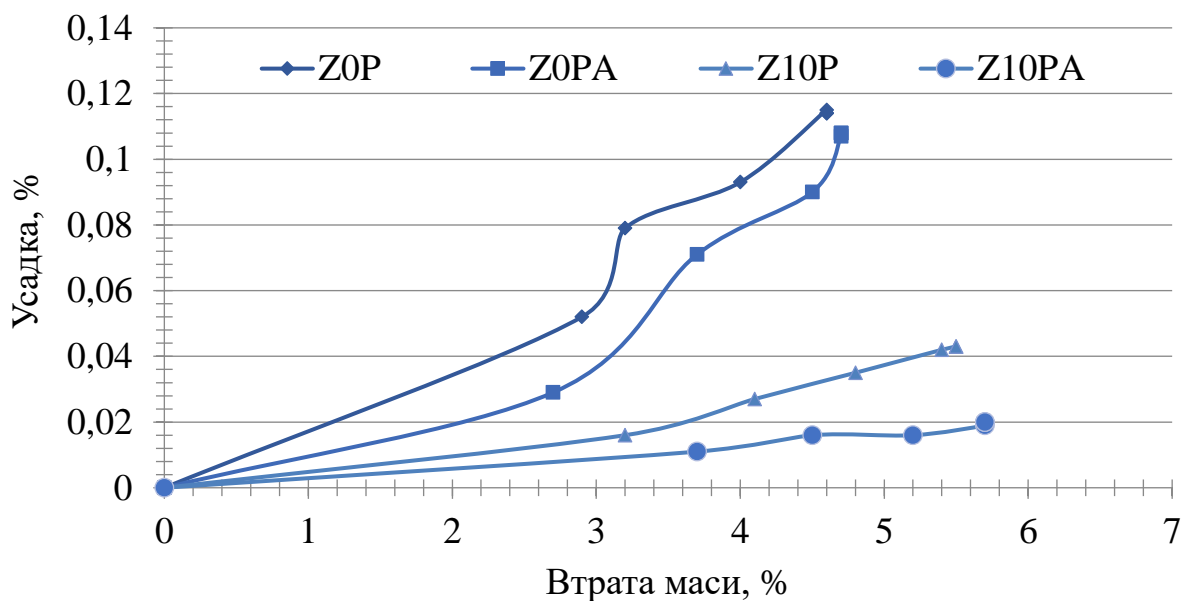
Як зазначено вище, використання повітровтягувальної добавки є ефективним методом підвищення стійкості до циклів заморожування та відтавання, оскільки втягнуті бульбашки повітря створюють достатній вільний простір для розміщення об'єму льоду, отриманого після заморожування води, але недостатньо досліджень про вплив як ПЦТ, так і повітровтягувальної добавки на морозостійкість бетонів. Слід відзначити, що необхідність використання повітровтягувальної добавки для підвищення стійкості до циклів заморожування та відтавання запропонована Bilim [151] при дослідженні розчину, що містив природний цеолітовий туф. Як показано в табл. 4.5, після 150 циклів заморожування/відтавання найменше зниження міцності на стиск 17,9% спостерігалось для бетону, що містить ПЦТ, суперпластифікатор і повітровтягувальну добавку (Z10PA).

Серед несилкових впливів на бетон усадка також займає важливе місце і впливає на якість і довговічність конструкцій і споруд. Дослідження впливу ПЦТ на усадочні деформації при висиханні та втрату вологи проводили на дрібнозернистих бетонах. Використовували номінальний склад розчину такий, як

у бетонах, описаних у табл. 4.4 (цемент: пісок = 1: 1,88; (цемент + ПЦТ): пісок = 1:1,88), за винятком того, що крупний заповнювач не використовувався та водоцементне відношення становило 0,41. Дозування суперпластифікатора і повітровтягувальної добавки наведено в табл. 4.4 і залежить від складу суміші. Усадка при висиханні дрібнозернистих бетонів представлена на рис. 4.22, а. Результати показують, що використання ПЦТ значно зменшує усадку [33, 275]. Усадка при висиханні Z10P і Z10PA є відповідно приблизно в 2,6 і 5,4 рази нижчою, ніж контрольні бетони Z0P і Z0PA через 180 діб. На рис. 4.22, б представлено графік залежності усадки при висиханні від втрати маси зразків. Слід відзначити, що у зразках із втратою маси до 2,7 % усадка бетонів із ПЦТ Z10P та Z10PA при висиханні була приблизно в 3 рази меншою, ніж у контрольних бетонів без цеолітового туфу Z0P та Z0PA, але із зростанням втрати маси, усадка при висиханні бетонів Z0P і Z0PA значно зростає. Згідно з отриманими результатами, усадка при висиханні бетонів з ПЦТ при втраті вологи 4,5% приблизно в 6 разів нижча, ніж у контрольних бетонів без ПЦТ. Це можна пояснити здатністю ПЦТ, як матеріалу з унікальною внутрішньоканальною структурою, поглинати частину води з свіжоприготовленої бетонній суміші та забезпечувати її внутрішній резерв і поглиблену гідrataцію портландцементу при твердненні. Ghourchian та ін. [138] вказують, що пористість цеолітового туфу, доступ до якої здійснюється через отвори розміром понад 100 нм, достатньо висока для забезпечення ефективного внутрішнього резерву води. Згідно з результатами РІП, представленими на рис. 2.6, більшість пор зерен ПЦТ в діапазоні гранулометричного складу 0,01-2000 мкм (див. рис. 2.7) мають розмір більше 100 нм. Отже, цеолітовий туф, використаний у цьому дослідженні, придатний для формування внутрішнього резерву води в бетоні, оскільки поглинута вода може поступово мігрувати з природного цеолітового туфу, забезпечуючи більш повну гідrataцію портландцементу.



а

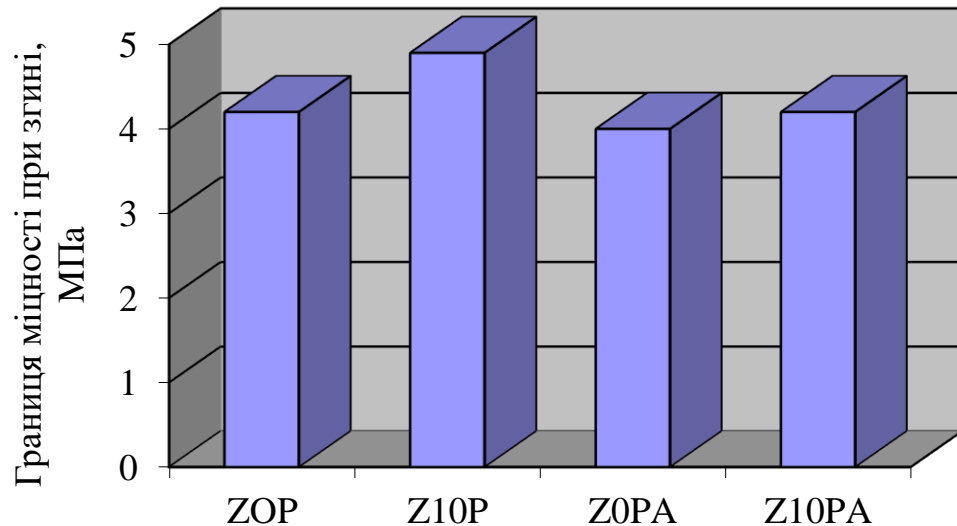


б

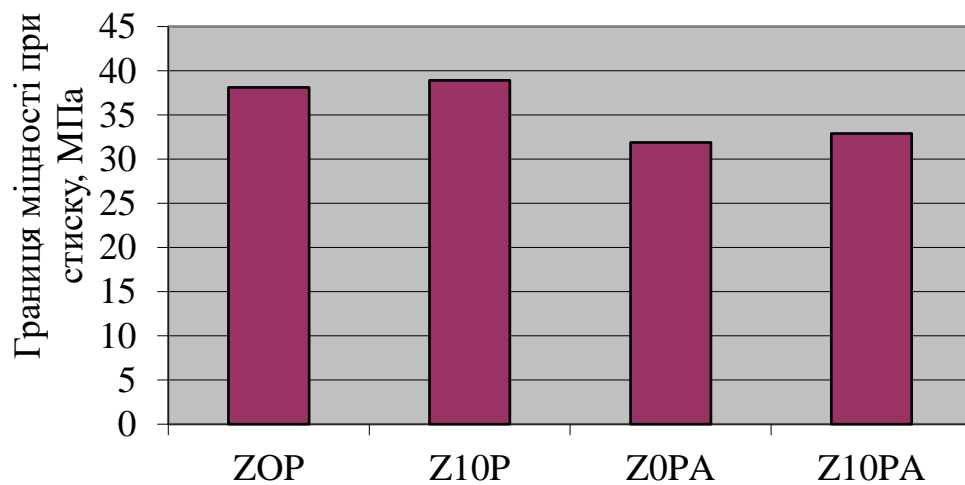
Рисунок 4.22 – Зміна усадки при висиханні дрібнозернистого бетону з часом (а) та залежно від втрати маси (б)

Наїмі та ін. [137] відзначили, що усадка при висиханні сумішей, що містять природний цеолітовий туф, при заміні ним портландцементу 15 і 30 мас.%, також була трохи нижчою, ніж у контрольній суміші, тоді як Jana [245] і Bilim та ін. [151] отримали протилежні результати.

Позитивний вплив ПЦТ на механічні властивості бетонів підтверджується також результатами випробувань на міцність зразків дрібнозернистих бетонів після вимірювання усадки при висиханні (рис. 4.23).



а



б

Рисунок 4.23 – Міцність на згин (а) і стиск (б) дрібнозернистих бетонів через 180 діб тверднення

Згідно з рис. 4.23, а, міцність на згин бетону Z10P, що містить ПЦТ, на 16% вища порівняно з контрольним бетоном ZOP. Використання повітровтягувальної добавки призводить до зниження міцності бетонів Z0PA і Z10PA на 4 і 17% відповідно. Подібні тенденції спостерігаються при визначенні міцності на стиск. Як показано на рис. 4.23, б, заміна 10 мас.% цементу на ПЦТ також викликає

незначне підвищення міцності на стиск бетонів Z10P і Z10PA порівняно з контрольними бетонами Z0P і Z0PA.

Слід відзначити, що довговічність бетонних конструкцій залежить як від умов тверднення, так і експлуатації [12]. Відомо, що використання мінеральних добавок замість портландцементу призводить до підвищення стійкості бетону в різних агресивних середовищах залежно від класів впливу [248, 298].

Показано, що реакційна здатність полідисперсного цеолітового туфу по поглинанню вапна може бути така ж, як в мікрокремнезему, і вища, ніж у золи-винесення [137, 307]. Кальцію гідроксид, який утворюється при гідратації портландцементу, реагує з реакційноздатними SiO_2 ПЦТ, утворюючи гідросилікати кальцію. Тому бетони, що містять ПЦТ, стають більш довговічними завдяки зменшенню вилугування вапна проточними водами [103].

Досліджено корозійну стійкість бетонів з 10 мас.% ПЦТ при дії агресивного середовища класу ХА. Встановлено, що коефіцієнт корозійної стійкості бетонів з 10 мас.% ПЦТ вищий як в агресивному середовищі MgCl_2 ($C(\text{Mg}^{2+})=10$ г/л), так і в Na_2SO_4 ($C(\text{SO}_4^{2-})=10$ г/л) [349]. При цьому коефіцієнт корозійної стійкості КС вищий для зразків бетону, що зазнали дії розчину Na_2SO_4 , приблизно в 1,5 рази порівняно з бетонами, які зазнали впливу агресивного середовища MgCl_2 (рис. 4.24).

Згідно з даними скануючої електронної мікроскопії, мікроструктура дрібнозернистого бетону без ПЦТ, витриманого протягом 180 діб у розчині MgCl_2 , представлена у формі багатогранного блоку, який щільно зцементований з іншими продуктами гідратації, як показано на рис. 4.25, а. На поверхні бетону спостерігаються пухкі новоутворення $\text{Mg}(\text{OH})_2$, які формуються в результаті хімічної реакції між кальцію гідроксидом (портландитом) і магнію хлоридом в агресивному середовищі. Ці утворення накопичуються в порах дрібнозернистого

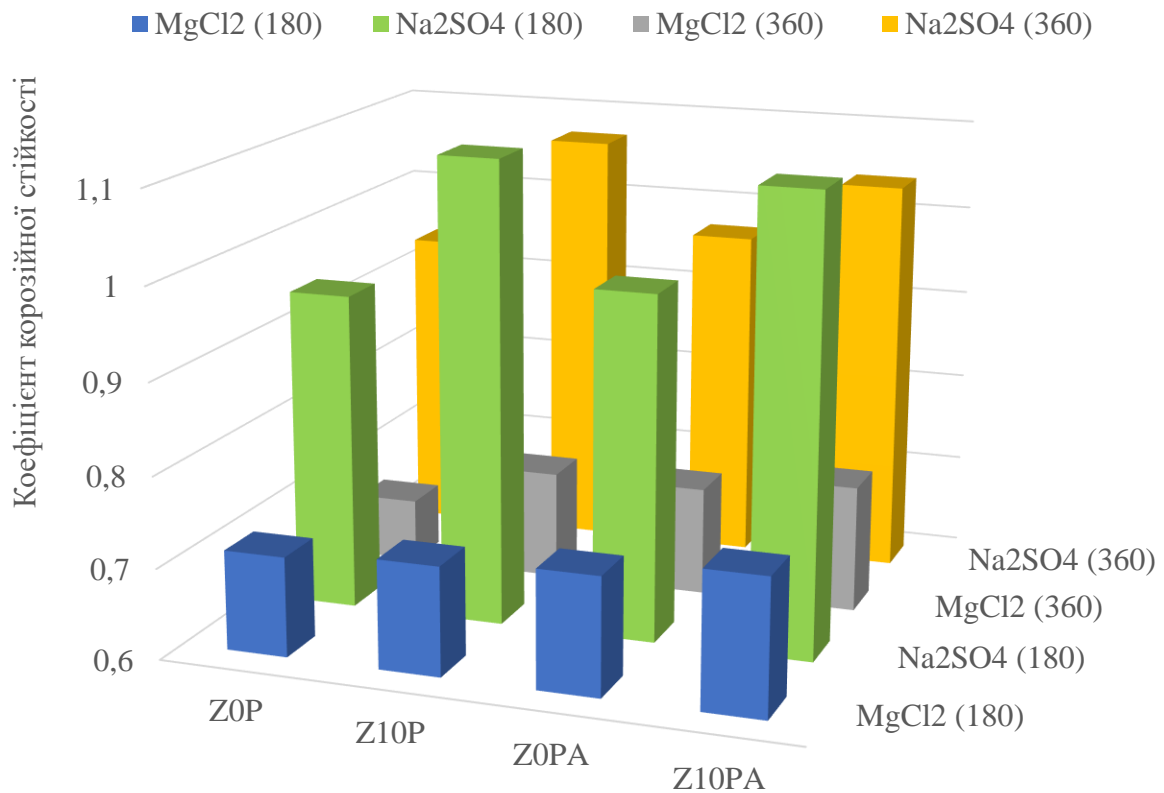


Рисунок 4.24 – Коефіцієнти корозійної стійкості дрібнозернистого бетону, визначені за результатами випробувань міцності на стиск

бетону і не перешкоджають дифузії іонів Ca^{2+} з глибинних шарів на поверхню. При зниженні концентрації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ гідросилікати і гідроалюмінати з високим вмістом кальцію починають руйнуватися, що призводить до втрати міцності бетону. Мікроструктура дрібнозернистого бетону без мінеральних добавок (рис. 4.25, б), витриманого протягом 180 діб у розчині Na_2SO_4 , характеризується дрібнокристалічною структурою, довгопризматичними кристалами еtringіту. Кристалізація еtringіту в затверділому камені супроводжується збільшенням об'єму в 2,5-2,9 рази. Швидкий ріст кристалів еtringіту при тривалому впливі сульфатів викликає руйнування структури бетону. Утворення речовин, таких як $\text{Mg}(\text{OH})_2$, еtringіт, які утворюються при дії агресивних середовищах, підтверджено результатами мікрозондового аналізу. При додаванні ПЦТ, надлишок SiO_2 реагує з кальцієм гідроксидом, приводячи до формування додаткової кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію C-S-H і, як наслідок, більш витонченої та

компактної структури бетону та підвищення його довговічності в обох агресивних середовищах (рис. 4.25, в, г).

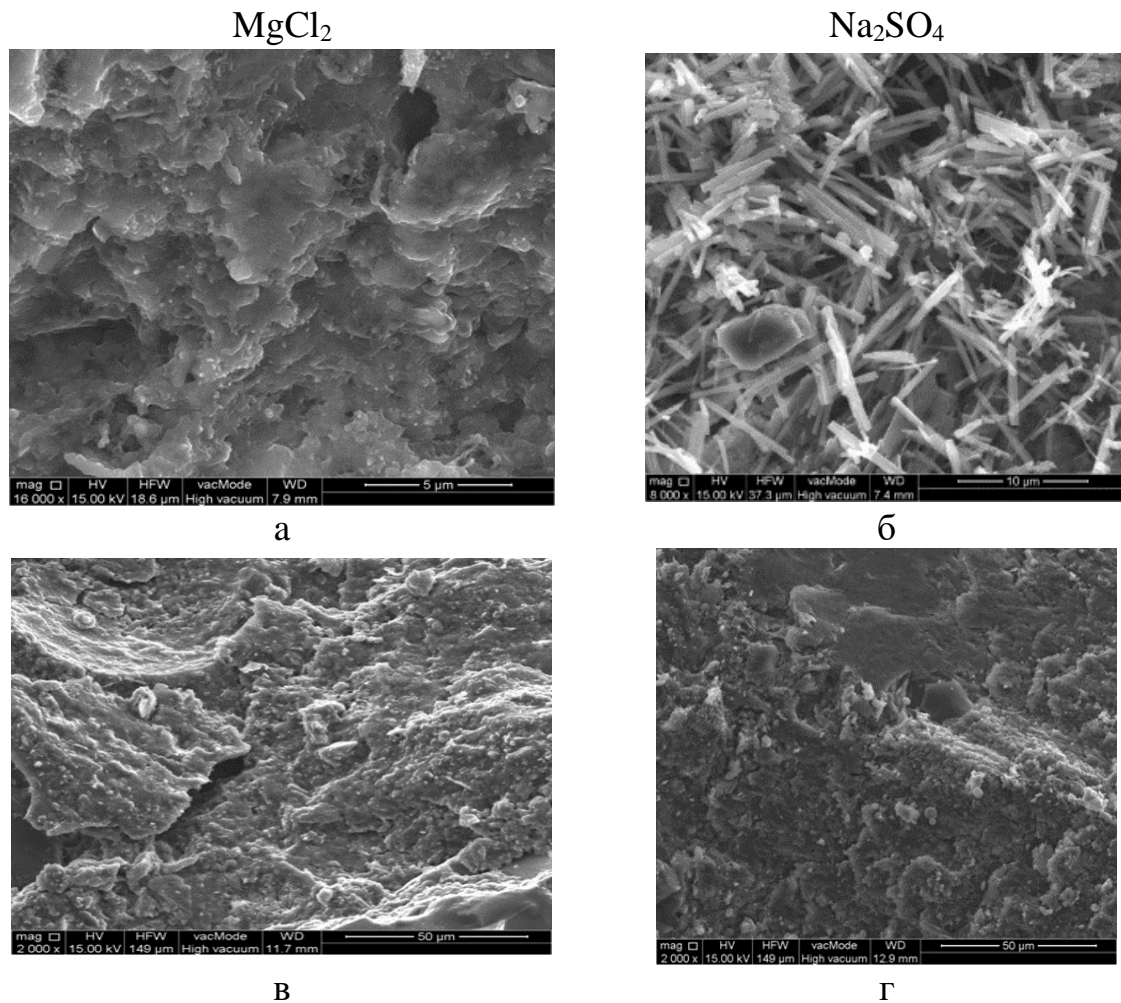


Рисунок 4.25 – Мікроструктура зразків ZOP без ПЦТ (а, б) та з 10 мас. % полідисперсного цеолітового туфу Z10P (в, г), які знаходилися відповідно в розчинах $MgCl_2$ та Na_2SO_4

Отже, заміна частини портландцементу на ПЦТ, незважаючи на структуру його пор, дозволяє покращити міцність та стійкість бетону до дії агресивних середовищ, таких як розчини Na_2SO_4 та $MgCl_2$.

Досліджено також міцнісні властивості та характеристики тріщиностійкості бетонів з маркою бетонних сумішей за осадкою конуса S3 [105, 212]. Для виготовлення таких сумішей зменшено вміст пластифікуючої та повітровтягувальної добавки. Тенденція до зростання В/Ц відношення зберігається в бетонах з вмістом полідисперсного цеолітового туфу (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 - Склади бетонів з ПЦТ і хімічними добавками (марка бетонної суміші за осадкою конуса S3)

Умовне позначення	Поргланцемент ПЦ І -500-Н	Цеоліт, кг/м ³	Пісок, кг/м ³	Щебінь фр.(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
ПЦТ	315	35	600	1230	1,0	-	0,52	1,7
ПЦТПв	315	35	600	1230	1,0	0,1	0,51	3,9

Міцність при стиску бетону з полідисперсним цеолітовим туфом нижча у всі терміни тверднення порівняно з контрольним бетоном К (табл. 4.7). Бетон без мінеральних добавок (Пв), але з добавками пластифікуюче-повітровтягувальної дії характеризується нижчою міцністю на стиск протягом 7 діб тверднення порівняно з контрольним бетоном К.

Таблиця 4.7 - Міцність бетонів 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
ПЦТ	6,9	24,2	36,8	49,2
ПЦТПв	6,3	22,1	35,9	44,3

В той же час, міцність на розтяг при згині бетону з полідисперсним цеолітовим туфом зростає на 11% порівняно з контрольним складом і досягає 6,9 МПа. Приріст міцності при використанні, як пуцоланового матеріалу, полідисперсного

цеолітового туфу дає змогу нівелювати негативний вплив добавки повітровтягувальної дії на міцність бетону ПЦТПв.

Відомо [107], що в цементобетонах під навантаженням ініціюються і розвиваються різні дефекти. Пошкодження з'являються, в більшості випадків, в цементній матриці або в зонах контакту цементного каменю і заповнювача. Тому в проведених дослідженнях вивчено тріщиностійкість бетону з підвищеною міцністю та вплив на неї структури бетону на різних рівнях.

В роботі вперше запропоновано до використання параметр питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (G_l , Дж/м²), який разом із стандартизованим показником питомих енерговитрат на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i , Дж/м²) більш точно і в повній мірі характеризує поведінку бетону під навантаженням в докритичній і закритичній областях деформування і визначає ефективність армування. Питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_l , Дж/м² визначаються за формулою:

$$G_l = \frac{W_l}{t(b-a_0)}, \quad (4.5)$$

де W_l - енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини, Дж;

t, b - розміри зразка, м;

a_0 - висота надрізу, м.

На ефективність застосування полідисперсного цеолітового туфу разом з пластифікуючими та повітровтягувальними добавками вказують 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), які збільшуються на 27 та 14% відповідно для бетону ПЦТПв порівняно з контрольним складом, про що свідчить аналіз повних діаграм стану бетонів (рис. 4.26) та розраховані силові і енергетичні характеристики тріщиностійкості (табл. 4.8).

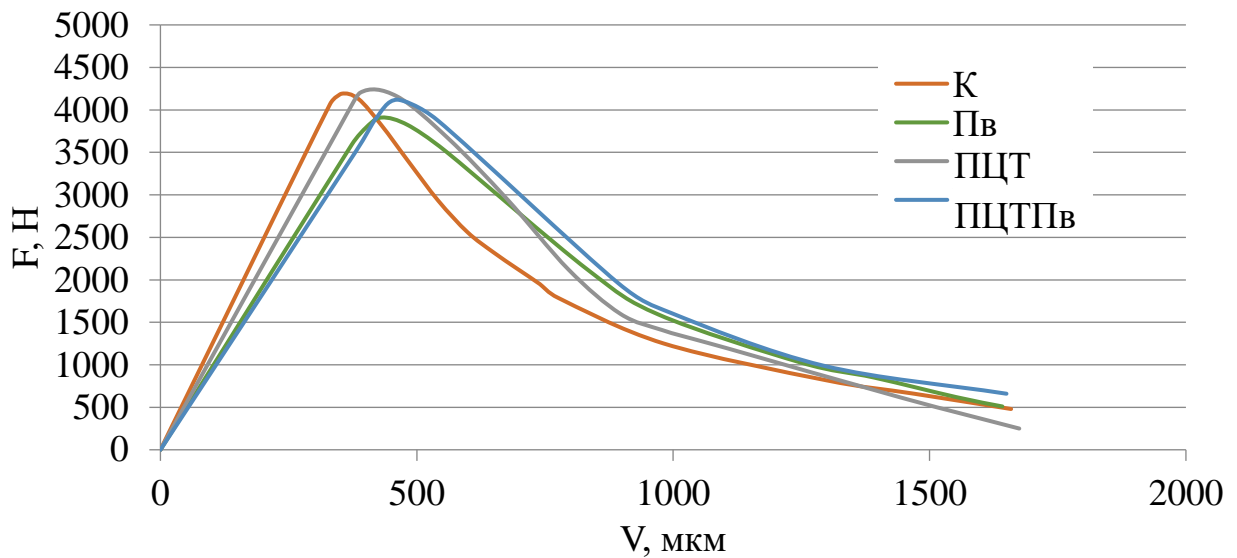


Рисунок 4.26 - Повні діаграми стану бетонів

Слід відзначити, що суперпластифікуюча та повітровтягувальна добавка позитивно впливають на енергію руйнування в докритичній (G_i) та закритичній (G_f) стадіях, а також на енергією руйнування G_F в бетоні Пв [212]. Одержані результати свідчать, що найвищою тріщиностійкістю в докритичній (G_i) і закритичній (G_f) стадіях деформування і, як наслідок, загальною енергією руйнування (G_F) характеризується модифікований бетон з підвищеною міцністю ПЦТПв (табл. 4.8) [20, 192, 212].

Таблиця 4.8 - Силві та енергетичні характеристики тріщиностійкості

Умовне позначення	G_i , Дж/м ²	G_f , Дж/м ²	G_F , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	Міцність на розтяг при згині, МПа	Критерій крихкості, $\chi_{fb} \cdot 10^{-3}$, м
К	128,61	350,95	457,77	0,70	7,57	90
Пв	148,06	362,00	497,27	0,62	8,11	133
ПЦТ	136,96	376,43	511,68	0,64	8,00	86
ПЦТПв	163,56	367,87	521,42	0,65	8,75	175

Отже, застосування полідисперсного цеолітового туфу для часткової заміни портландцементу в бетоні та раціональні технологічні рішення при проектуванні бетонних сумішей дозволяють отримати матеріали з покращеними властивостями, тріщиностійкістю та довговічністю. Використання полідисперсного цеолітового туфу в бетоні призводить до технічних, економічних та екологічних переваг, а також відповідає стратегії сталого розвитку в будівництві завдяки збереженню енергії та природних ресурсів і зменшенню забруднення навколишнього середовища, пов'язаного з виробництвом цементу.

4.4. Бетони з підвищеною тріщиностійкістю, модифіковані комплексними органо-мінеральними добавками

Для бетонів, наприклад, транспортного призначення найчастіше використовуються малорухливі бетонні суміші. Забезпечення необхідної довговічності затверділих бетонів на основі таких сумішей досягається, з поміж інших важливих проектних параметрів, необхідною проектною маркою за морозостійкістю, що забезпечується введенням в їх склад повітровтягувальної добавки та тріщиностійкістю. Вплив отриманої внаслідок цього замкнутої мікропористості на властивості бетонів з підвищеною міцністю (марка бетонної суміші за осадкою конуса S1) досліджували випробуванням бетону, що містить 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу, а також повітровтягувальну добавку в кількості 0,1; 0,15 та 0,25 мас.% [104].

В бетонних сумішах без повітровтягувальної добавки об'єм втягнутого повітря коливався в межах 2,7 – 2,8 %. При введенні добавки повітровтягувальної дії Sikanol A в кількості 0,1 мас.% цей показник підвищився до 4,3 % (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Склад та властивості бетонних сумішей (В/Ц=0,35; марка бетонної суміші за осадкою конуса S1)

Умовне позначення бетонної суміші	Портландцемент ПЦ І -500-Н	Цеоліт, кг/м ³	Пісок (кг/м ³)	Щебінь (кг/м ³)	Суперпластифікатор (мас. %)	Повітровтягувальна добавка (мас.%)	ОК, см	Об'єм втягнутого повітря (%)
К	400	-	660	1150	1,0	-	4	2,8
ПЦТПв1	360	40	660	1150	1,0	0,10	4	4,3
ПЦТПв2	360	40	660	1150	1,0	0,15	3	6,5
ПЦТПв3	360	40	660	1150	1,0	0,25	4	7,2

Показано, що при коливанні об'єму втягнутого повітря в бетонних сумішах з добавкою полідисперсного цеолітового туфу в межах 4-7% міцність на розтяг при згині не змінюється суттєво (табл. 4.10). Так, у віці 28 діб тверднення вона становить 9,1-9,4 МПа, а через 3 роки досягає максимального значення 14,1 МПа (бетон ПЦТПв2 з вмістом втягнутого повітря 6,5%).

Таблиця 4.10 - Міцність на розтяг при згині та стираність бетонів з підвищеною міцністю та різним вмістом об'єму 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
ПЦТПв1	9,4	13,5	0,26
ПЦТПв2	9,3	14,1	0,29
ПЦТПв3	9,1	12,8	0,32

Отримані результати свідчать, що бетон з об'ємом втягнутого повітря 7,2% має підвищену стиранистію (табл. 4.10). Найменшою стиранистію (0,26 г/см²) характеризується бетон ПЦТПв1 з об'ємом втягнутого повітря 4,3%.

Як видно з рис. 4.27, бетон з полідисперсним цеолітовим туфом та пластифікуюче-повітровтягувальними добавками з об'ємом втягнутого повітря 4,3% має дещо нижчу міцність на стиск через 28 діб тверднення. Проте з часом тверднення міцність поступово вирівнюється, а через 90 діб навіть дещо перевищує міцність бетону контрольного складу К. При збільшенні вмісту в бетонних сумішах втягнутого повітря до 4,3; 6,5; 7,2% спостерігається зниження міцності через 28 діб тверднення на 8,6; 27,0 та 38,1%, а через 7 діб на 14,3; 22,7 та 32,7% відповідно. Слід відзначити, що для усіх складів бетонів кінетика набору міцності при стиску протягом 28 діб корелює з об'ємом втягнутого бетонними сумішами повітря, але через 3 роки найвищою міцністю характеризується бетон ПЦТПв1 (рис. 4.27).

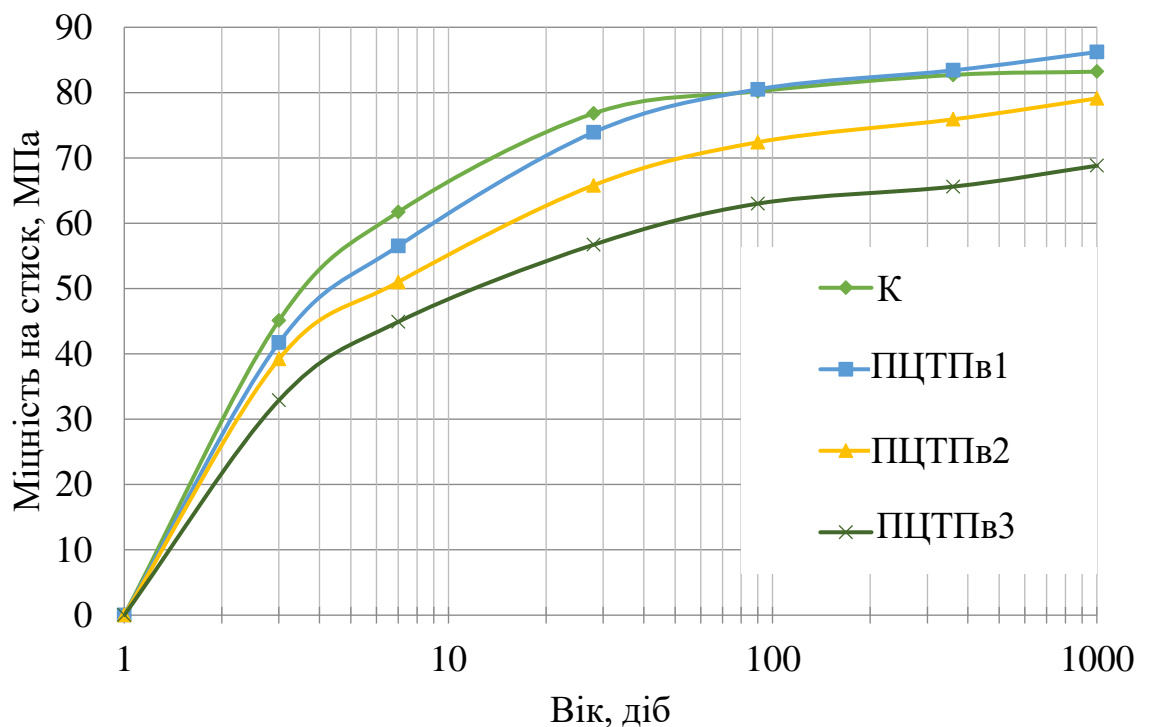


Рисунок 4.27 - Міцність на стиск бетонів з різним вмістом втягнутого повітря

Повні діаграми стану бетонів з підвищеною міцністю побудовані за отриманими результатами випробувань зразків-призм з ініційованою тріщиною

(рис. 4.28).

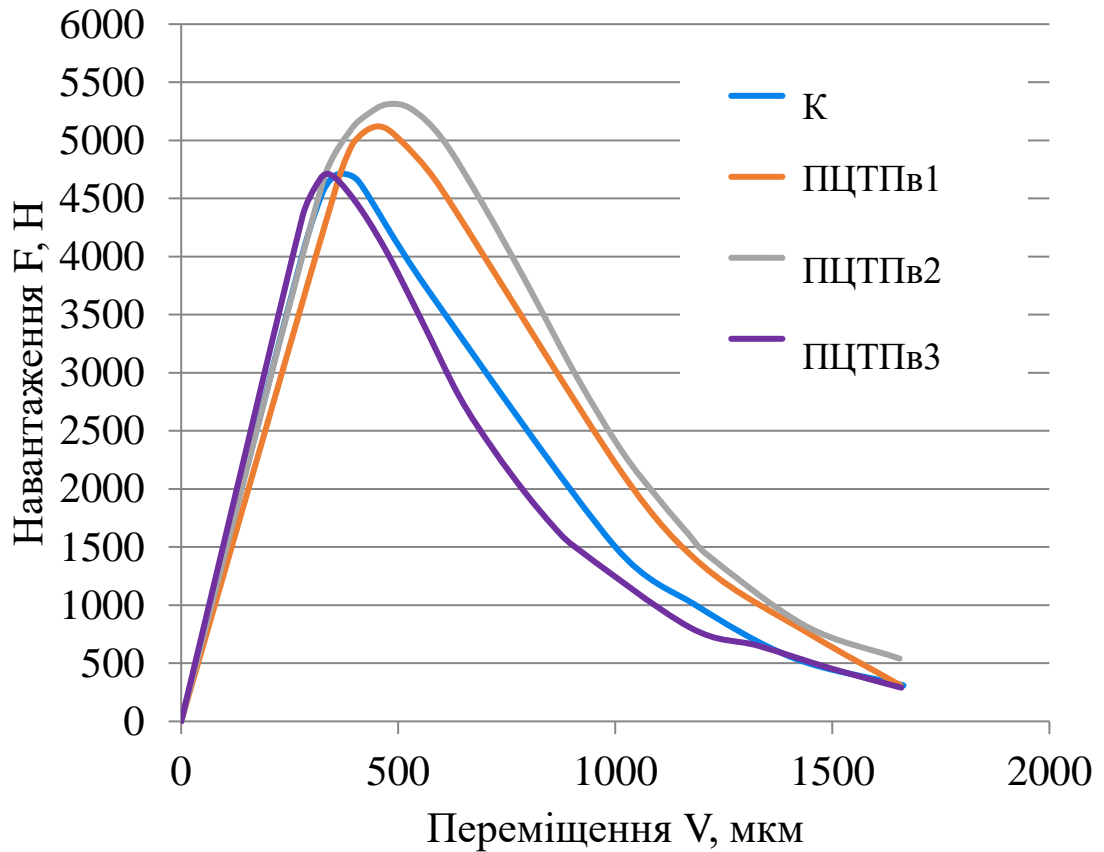


Рисунок 4.28 - Повні діаграми стану бетонів з підвищеною міцністю

Аналіз цих повних діаграм стану свідчить, що макротріщина в бетоні ПЦТПв2 починає поширюватися при максимальному навантаженні 5310 Н, а конфігурація діаграми стану цього складу є загалом найкращою серед досліджених. Для бетону без полідисперсного цеолітового туфу К та ПЦТПв3 характерне невисоке значення навантаження 4710 Н, при якому відбувається досить різкий злам діаграми, але більш повною є конфігурація спадної гілки діаграми для бетону К порівняно з ПЦТПв3.

В табл. 4.11 представлені розраховані силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю. Як видно з результатів досліджень, бетони ПЦТПв1 та ПЦТПв2 характеризуються на 37 та 51% відповідно вищими значеннями показника G_1 ніж контрольний склад бетон К. При цьому бетон з вмістом 0,25 мас.% повітровтягувальної добавки (ПЦТПв3) має найнижчі параметри тріщиностійкості.

Таблиця 4.11 - Силіві та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів

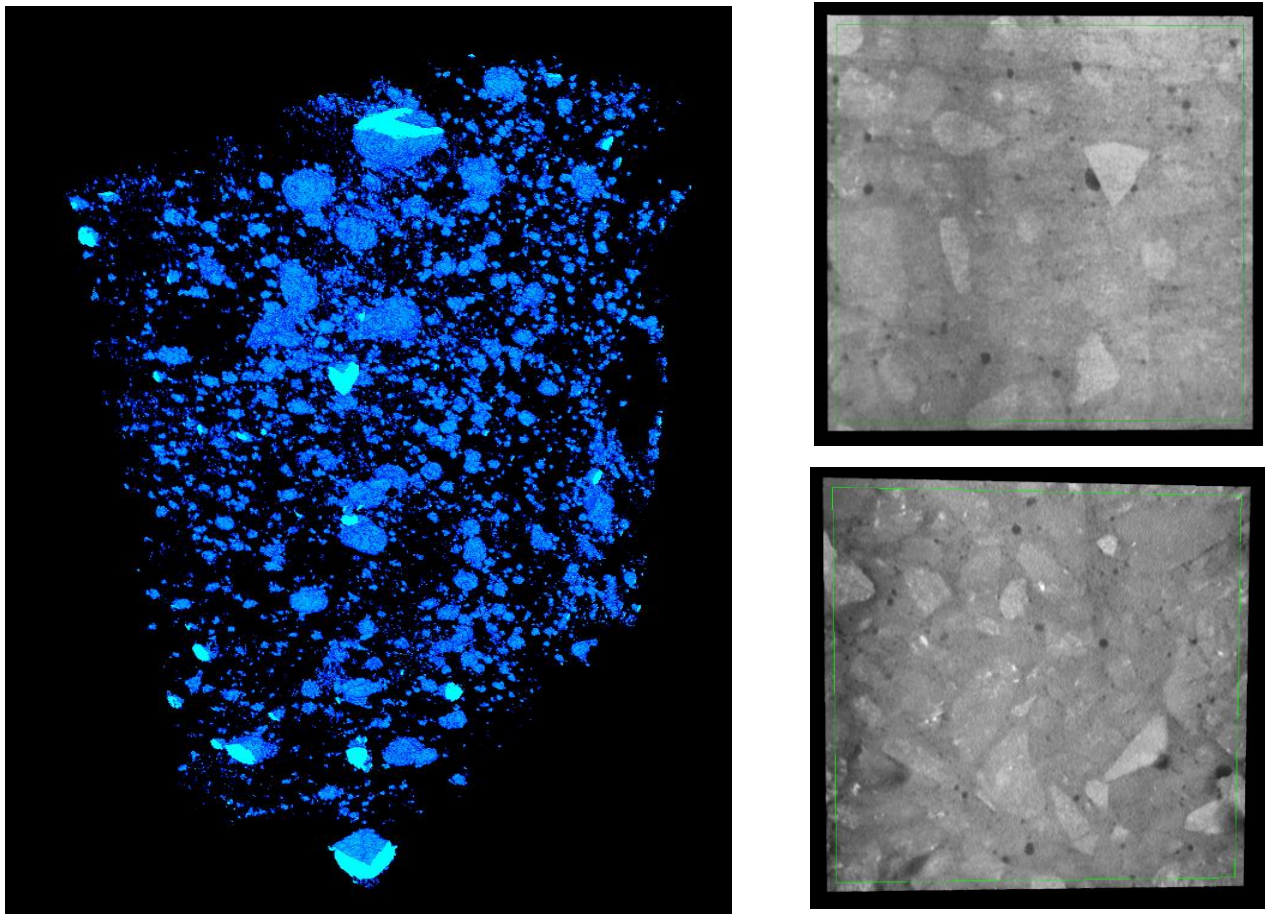
Умовне позначення бетону	G_i , Дж/м ²	G_l , Дж/м ²	G_F , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	Міцність на розтяг при згині, R_{tb} , МПа	Критерій крихкості, $\chi_{tb} \times 10^{-3}$, м
К	163,83	403,13	535,58	0,81	9,8	109
ПЦТПв1	224,45	435,25	625,82	0,83	11,0	170
ПЦТПв2	247,44	492,28	657,37	0,99	11,6	206
ПЦТПв3	147,30	381,92	500,76	0,80	9,8	218

Як видно з результатів досліджень, показники тріщиностійкості досліджених бетонів з підвищеною міцністю корелюють з їх значеннями міцності на розтяг при згині, але значення границі міцності на розтяг при згині коливаються в меншому діапазоні (18%), ніж питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (29%). Нижчі показники критерію крихкості свідчать про більш крихкий характер руйнування бетонів ПЦТПв1 та К.

Показники бетону з підвищеною міцністю та об'ємом втягнутого повітря 6,5% (ПЦТПв2) за значеннями питомих енерговитрат на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини $G_i=247,44$ Дж/м², питомими енерговитратами на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини $G_l=492,28$ Дж/м², питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування $G_F=657,37$ Дж/м² та в'язкістю руйнування $K_i=0,99$ переважають інші досліджувані бетони. Це пояснюється оптимальним вмістом втягнутого повітря та рівномірним розподілом дрібних бульбашок повітря, які, виступаючи демпферами напружень, ефективно сприяють гальмуванню процесів мікротріщиноутворення як на докритичній, так і сповільнюють в закритичній стадії рух магістральної тріщини [100, 192].

За допомогою комп'ютерної мікротомографії отримано результати аналізу пор

в структурі бетону ПЦТПв2 (рис. 4.29). Реконструкція 3D моделі, що має роздільну здатність 5 мкм/voxel свідчить, що вміст пор з ефективними діаметрами 50-200 мкм становить 4,2% загального об'єму досліджуваного діапазону (табл. 4.12).



а

б

Рисунок 4.29 - 3D модель (а) та поперечні перерізи (б) зразка бетону ПЦТПв2

Таблиця 4.12 - Розподіл пор за розміром в бетоні ПЦТПв2

Діаметр пор, мкм	Вміст пор, %
>1000	0,9
500-1000	0,1
200-500	0,5
100-200	1,4
50-100	2,8
<50	0,9
Σ	6,6

Із зростанням об'єму втягнутого повітря до 6,5% в бетонній суміші (рис. 4.30), стійкість бетонів до попереминого заморожування-відтаювання зростає ($\Delta f_c=5,3\%$). В той же час, при введенні повітровтягувальної добавки в кількості 0,25 мас.% спостерігається зменшення міцності і Δf_c становить 8,9%.

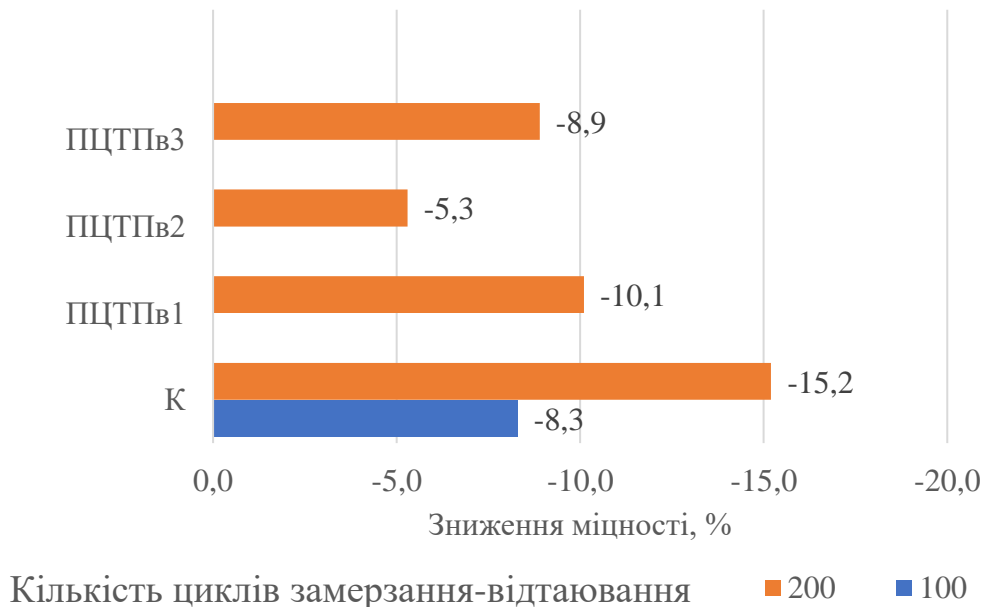


Рисунок 4.30 - Зниження міцності бетонів, що містять різний об'єм втягнутого повітря після 100 та 200 циклів заморожування-відтавання

Корозійна стійкість бетонів, особливо транспортного призначення, також є однією з важливих характеристик бетонів. Більшість мостів, шляхопроводів та дорожніх покриттів можуть поступово руйнуватися внаслідок застосування антикригових реагентів, а також викидів вуглекислого газу, оксидів азоту, сірчанних та інших газів в атмосферу двигунами внутрішнього згорання автотранспорту та промисловими підприємствами. Так, результати досліджень стійкості бетону до корозії (табл. 4.13) свідчать, що коефіцієнти корозійної стійкості на згин дрібнозернистих бетонів з полідисперсним цеолітовим туфом становлять 0,8 та 1,23 в магнезіальному та сульфатному середовищах відповідно, що приблизно на 10-20% вище бетону без мінеральних добавок.

Таблиця 4.13 - Корозійна стійкість дрібнозернистих бетонів у магнезійному та сульфатному середовищах

Середовище	Без добавок			10 мас.% ПЦТ		
	вода	Na ₂ SO ₄ [SO ₄ ²⁻]= 30 г/л	MgCl ₂ [Mg ²⁺]= 30 г/л	вода	Na ₂ SO ₄ [SO ₄ ²⁻]= 30 г/л	MgCl ₂ [Mg ²⁺]= 30 г/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 _{с_{стиск}}	-	0,96	0,71	-	1,03	0,72
K _{с_{згин}}	-	1,04	0,72	-	1,23	0,80

Через 3 роки витримування зразків бетону у повітряному середовищі глибина карбонізації (рис. 4.31) становить 9; 6 та 2 мм для бетонів без мінеральних добавок, з добавкою полідисперсного цеолітового туфу та бетону ПЦТПв1 відповідно.



а

б

в

Рисунок 4.31 - Глибина карбонізації бетонів К (а), ПЦТ (б) та ПЦТПв1 (в), які витримували 3 роки у повітряному середовищі

Отже, отриманими результатами досліджень експлуатаційних властивостей розроблених бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю підтверджується доцільність та ефективність використання в їх складі полідисперсного цеолітового туфу разом з суперпластифікуючою та повітровтягувальною добавками.

Висновки до розділу

1. Встановлено, що введення полідисперсних компонентів цеолітового туфу та спученого перліту з максимумами на диференційних кривих розподілу частинок в інтервалі 100-400 та 100-300 мкм відповідно дає змогу заповнити нестачу цих фракцій у діапазоні між частинками портландцементу (0,1-60 мкм) та піску (>160 мкм) в бетонах та призводить до формування більш компактної мезоструктури бетону з підвищеною міцністю та впорядкування його порового простору.

2. Пористі полідисперсні компоненти можуть використовуватися для формування в тілі бетону внутрішнього резерву води. Ця вода з часом може компенсувати нестачу вологи для гідратації портландцементу через її поступову втрату з капілярів в умовах низької відносної вологості, забезпечуючи протікання процесів гідратації. Показано, що через 14 діб тверднення при температурі $40\pm 3^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості повітря $40\pm 3\%$ внутрішня відносна вологість бетону з добавкою полідисперсного цеолітового туфу на 10 % вища порівняно з контрольним складом. Використання полідисперсних компонентів в складі бетону призводить до підвищення опору згинаючим навантаженням приблизно на 10-30% як в повітряно-сухих, так і нормальних температурно-вологісних умовах тверднення без суттєвих вологовтрат та зниження міцності на стиск.

3. При введенні повітровтягувальної добавки (0,75 мас.%) в розчинову суміш (мезоструктура бетону) і її сталій консистенції В/Ц відношення залежить від номінального складу суміші та збільшується зі зменшенням співвідношення портландцемент:заповнювач майже в 1,7 і 2,3 рази для розчинів із співвідношенням портландцемент:заповнювач 1:3 і 1:4 відповідно порівняно з складом 1:2. Кореляція між об'ємом втягнутого повітря та густиною суміші не є строгою. Густина також залежить від номінального складу бетонної суміші. Міцність на стиск розчинів, що містять повітровтягувальні добавки, залежить від

номінального складу суміші. Збільшення міцності на стиск на 13,9 % для складу портландцемент:заповнювач=1:2, що містить 11,4 % втягнутого повітря, спостерігається навіть порівняно з еталонним розчином через 28 діб тверднення.

4. При сталому водоцементному відношенні ($V/C=0,5$) розплив конуса розчинової суміші зростає на 12-80%, а густина зменшується на 11-16% для номінального складу портландцемент:заповнювач 1:2 і 1:3 порівняно з еталонним розчином і навіть збільшується на 4% для 1:4 порівняно з бетоном із співвідношенням портландцементу до заповнювача 1:3. Таким чином, отримані значення залежать від номінального складу розчину. Показано, що об'єм втягнутого повітря залежить не тільки від вмісту добавки, але й від номінального складу суміші. При зміні співвідношення портландцементу і заповнювача від 1:4 до 1:2 відбувається зростання об'єму втягнутого повітря майже в 2 рази. Найбільший об'єм втягнутого повітря (14,5%) досягається в суміші з найбільшим вмістом в'язучого компоненту (співвідношення портландцементу до заповнювача 1:2). Слід відзначити, що міцність залежить як від вмісту втягнутого повітря, так і від номінального складу суміші. Найбільш значне зниження міцності на стиск (на 65,9%) порівняно з еталонним складом через 28 діб тверднення спостерігається для складу $C:P=1:2$. Додавання повітровтягувальної добавки покращує стійкість бетону на мезоструктурному рівні до попереминого заморожування та відтаювання і підвищує довговічність.

5. Показано, що заміна 10 мас.% портландцементу полідисперсним цеолітовим туфом, введення 1,64 мас. % суперпластифікатора та 0,3 мас.% повітровтягувальної добавки при виготовленні бетонної суміші (номінальний склад за масою 1:1,9:3,3, $C=350$ кг/м³, $V/C=0,5$, марка бетонної суміші за осадкою конуса S4) призводить до деякого зниження міцності бетону протягом 90 діб тверднення, але через 180 діб міцність на стиск бетонів, що містять цей пуцолановий матеріал, перевищує міцність бетону без цеолітового туфу. Введення в бетон полідисперсного цеолітового туфу та пластифікуюче-повітровтягувальних добавок дозволяє модифікувати фазовий склад продуктів гідратації цементу з утворенням додаткової кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію,

гідрогеленіту та еtringіту, а також покращити структуру бетону на мікро- та мезорівні. Підвищується водонепроникність (глибина penetрації води=3,5мм), морозостійкість бетону з добавками (спад міцності через 150 циклів зменшується на 39%) та знижуються усадочні деформації в 5,4 рази порівняно з бетоном без полідисперсного цеолітового туфу. Коефіцієнт корозійної стійкості зростає при використанні добавок в бетоні як в розчині Na_2SO_4 , так і MgCl_2 . Бетони з підвищеною міцністю, що містять 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу 1 мас.% суперпластифікатора та 0,1 мас.% добавки повітровтягувальної дії, одержані з марки бетонної суміші за осадкою конуса S3 (об'єм втягнутого повітря 3,9%) характеризуються підвищеною тріщиностійкістю як на докритичній, так і закритичній стадіях руйнування. Питомі енерговитрати на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини $G_i=163,56$ Дж/м² і питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини $G_l=367,87$ Дж/м², а також критерій крихкості $\chi_F=175$ мм переважають на 27; 5 та 94% ці показники для контрольного складу бетону.

6. Збільшення вмісту втягнутого повітря до 4,3; 6,5 та 7,2% у бетонних сумішах (марка бетонної суміші за осадкою конуса S1, номінальний склад за масою Ц:П:Щ=1:1,65:2,88) призводить до закономірного зниження міцності на стиск бетонів з підвищеною міцністю ($\Delta f_{cm}=5-26$ %), але суттєво не впливає на міцність на розтяг при згині ($f_{ctb}=9,1-9,4$ МПа). Бетон з добавкою полідисперсного цеолітового туфу в комплексі з 0,15 мас.% повітровтягувальної добавки при вмісті повітря 6,5% характеризується замкнутою рівномірно розподіленою мікропористою структурою, яка зумовлює підвищення морозостійкості бетону у 1,5 рази та дисипацію енергії мікротріщиноутворення як на докритичній ($G_i=247,44$ Дж/м²), так і сповільнення руху магістральної тріщини в закритичній ($G_l=492,28$ Дж/м²) стадіях. Критерій крихкості становить 206 мм, що свідчить про підвищену тріщиностійкість такого бетону. Глибина карбонізації бетону з 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу, 1,0 мас.% суперпластифікатора та 0,1 мас.% повітровтягувальної добавки порівняно з контрольним складом зменшується з 9 до 2 мм.

РОЗДІЛ 5. ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ, АРМОВАНІ ДИСПЕРСНИМИ ВОЛОКНАМИ

5.1. Вплив дисперсного армування базальтовою фіброю на силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетону

Фібра дає змогу регулювати механічні характеристики бетону. Властивості дисперсноармованих бетонів залежать від її витрати. Для досліджень використовували номінальний склад бетонних сумішей Ц:П:Щ=1:2,23:3,19. Витрата портландцементу – 350 кг/м³. Водоцементне відношення становило 0,44, марка бетонної суміші за осадкою конуса – S1 (ОК=1,8-4,5 см).

До бетону базової серії додавали певну кількість базальтової фібри типу ФБ2 та ФБ1 (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 - Витрата базальтової фібри в цементобетонних сумішах

Позначення серії бетонів	Витрата базальтової фібри, кг/м ³ бетонної суміші	
	ФБ2	ФБ1
БФ	-	-
ФБ2 5	5,0	-
ФБ2 7,5	7,5	-
ФБ2 10	10,0	-
ФБ1 2%	-	7,0
ФБ1 4%	-	14,0
ФБ1 6%	-	21,0

Повні діаграми стану цементобетону, дисперсноармованого базальтовою

фіброю типу ФБ2, представлені на рис. 5.1.

За результатами випробувань шляхом розрахунку за характерними точками діаграм стану визначено показники міцності і деформативності дисперсноармованих цементобетонів через 28 діб (табл. 5.2).

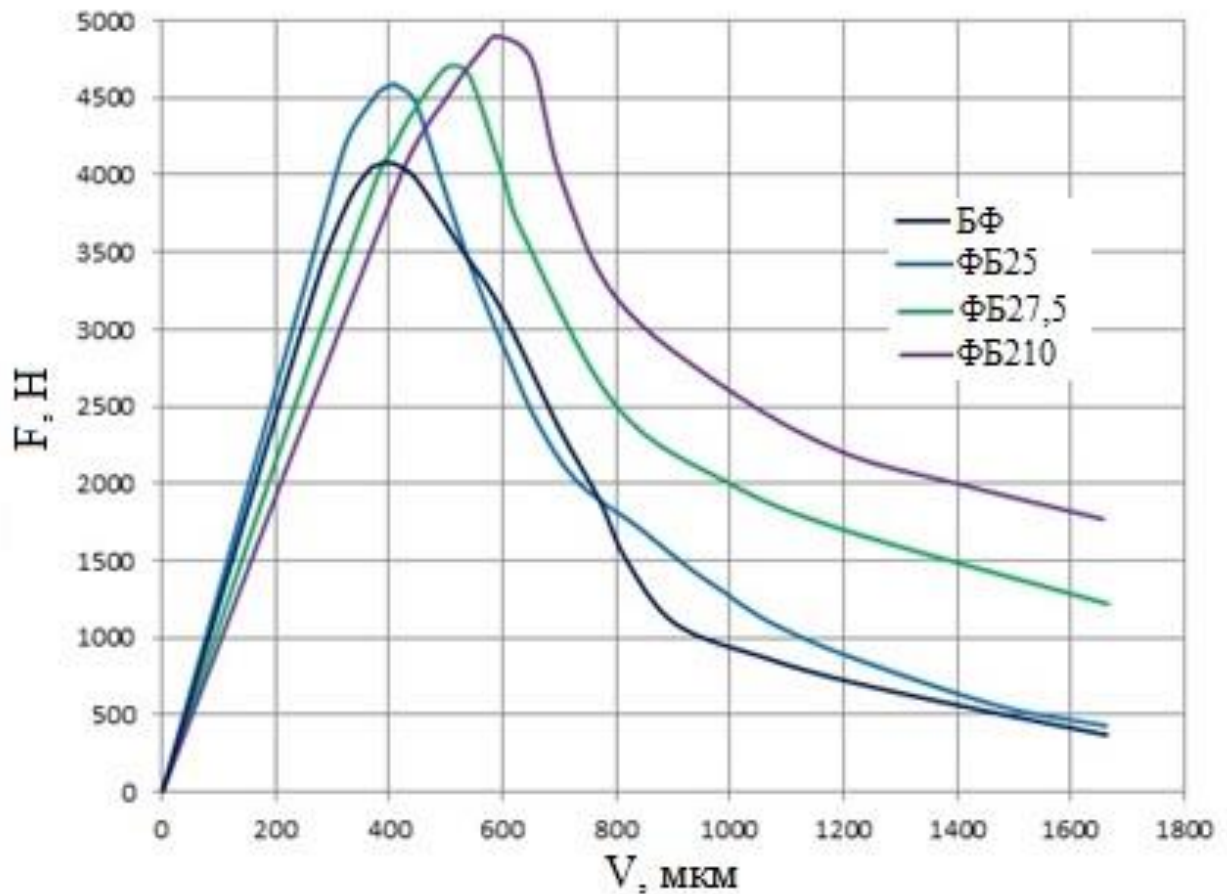


Рисунок 5.1 - Повні діаграми стану цементобетонів, неармованого та дисперсноармованих базальтовою фіброю типу ФБ2

Спостерігається позитивний вплив дисперсного армування базальтовою фіброю типу ФБ2 в кількості 5 та 10 кг на показники міцностей на стиск та на розтяг при згині. Так, зростання міцності на стиск становить 16 і 31%, а на розтяг при згині 12 і 20% відповідно порівняно з неармованим бетоном. Дисперсноармовані бетони руйнуються за менш крихким характером, що підтверджується як даними критерію крихкості (табл. 5.2), так і візуальним збереженням повнішої форми зразків-кубів після випробувань порівняно з неармованими зразками.

За конфігурацією діаграми стану і координатами її характерних точок розраховували комплекс силових та енергетичних характеристик досліджуваних бетонів (табл. 5.3).

Ефективність роботи бетону в докритичній стадії оцінюється питомими енерговитратами на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i). Всі дисперсноармовані бетони за показником G_i переважають неармований бетон базової серії, який зростає із збільшенням витрати базальтової фібри типу ФБ2. Максимальне значення ($G_i = 268,60$ Дж/м²) спостерігаються при максимальній витраті даного типу фібри, а саме 10 кг/м³ бетонної суміші.

Таблиця 5.2 - Показники міцності і деформативності цементобетонів, неармованого та дисперсноармованих базальтовою фіброю типу ФБ2

Серія бетонів	Міцність на стиск $f_{c, cube}$, МПа	Міцність на розтяг при згині f_{ctfm} , МПа	Статичний розрахунковий модуль пружності бетону E_b , МПа	Критерій крихкості $X_{tb} \cdot 10^{-3}$, м
БФ	47,8	8,63	3371	193
ФБ2 5	55,2	9,70	3623	179
ФБ2 7,5	58,4	9,94	2916	177
ФБ2 10	62,7	10,36	2638	167

Ефективність армування в закритичній стадії деформування бетону визначається питомими енерговитратами на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (G_i). Позитивний ефект дисперсного армування проявляється як і в попередньому випадку. Екстремум (469,29 Дж/м²) також досягається при витраті фібри 10 кг/м³.

Загальна робота деформування бетону характеризується питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування (G_F), які зростають також із збільшенням витрати фібри.

Отже, введення базальтової фібри типу ФБ2 в кількості 5; 7,5 та 10 кг/м³ покращує показники міцності на стиск і розтяг при згині бетону (табл. 5.2).

Збільшення витрати фібри понад 5 кг/м³ зменшує статичний розрахунковий модуль пружності бетону (зменшується деформативність), що відображено на діаграмах стану бетону серій ФБ2 7,5 і ФБ2 10 зменшенням кута нахилу висхідної гілки діаграми до осі абсцис. Проте це не впливає негативно на роботу конструкції з фібробазальтобетону.

Таблиця 5.3 - Силлові та енергетичні характеристики тріщиностійкості цементобетонів неармованого та дисперсноармованих базальтовою фіброю типу ФБ2

Серія бетонів	$W_m \cdot 10^2$, Н·м (S _{0TCA})	$W_e \cdot 10^2$, Н·м (S _{ACh})	$W_I \cdot 10^2$, Н·м (S _{0TCH})	$W_{II} \cdot 10^2$, Н·м (S _{HCCK})	$W_{III} \cdot 10^2$, Н·м (S _{0CuM})	$W_{CE} \cdot 10^2$, Н·м (S _{0TCHO})	G_i , Дж/м ²	G_I , Дж/м ²	G_F , Дж/м ²	J_i , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	K_c , МПа·м ^{1/2}
БФ	24	68	93	187	34	53	154,53	311,51	425,50	98	0,72	0,54
ФБ2 5	25	81	106	199	40	53	176,09	330,86	465,09	110	0,80	0,57
ФБ2 7,5	24	105	129	255	52	73	215,21	425,31	600,19	129	0,79	0,59
ФБ2 10	35	126	161	282	62	100	268,60	469,29	679,38	164	0,84	0,66

Конфігурація і площа під повною діаграмою стану бетонів свідчить, що дисперсне армування базальтовою фіброю істотно збільшує роботу руйнування бетону, що працює на згин із тріщиною нормального відриву (рис. 5.1), а відтак збільшує довговічність конструкції. Так, G_F – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування зростають від 425,50 Дж/м² для базової (неармованої) серії до

679,38 Дж/м² для серії ФБ2 10, що свідчить про зростання енергії руйнування дисперсноармованого бетону в 1,6 рази.

Фібробетон, армований базальтовою фіброю типу ФБ2, краще працює на докритичній стадії деформування (до моменту початку руху макротріщини) і на закритичній стадії деформування в процесі поширення макротріщини. Так, W_L – енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини зростають від 187×10^{-2} Н·м для базової (неармованої) серії до 282×10^{-2} Н·м для серії ФБ2 10, що свідчить про зростання роботи руйнування дисперсноармованого бетону в закритичній стадії в 1,5 рази.

Силовий критерій тріщиностійкості - статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (в'язкість руйнування) зростає від 0,72 для базової (неармованої) серії до $0,84 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ - для серії ФБ2 10.

Оскільки згин характеризується максимальною локалізацією процесу руйнування, доцільно збільшувати витрату фібри для конструкцій, які працюють на розтяг при згині, з метою насичення робочого перерізу фіброю і стримування процесу поширення макротріщини.

Повні діаграми стану бетону, дисперсноармованого базальтовою фіброю типу БФ1, представлені на рис. 5.2.

Показники міцності і деформативності дисперсноармованих цементобетонів визначали за результатами проведених випробувань шляхом розрахунків за характерними точками на діаграмах стану (табл. 5.4).

Вплив дисперсного армування базальтовою фіброю типу ФБ1 на показники міцності на стиск незначний (зростання становить приблизно 7% при максимальній витраті фібри). Міцність на розтяг при згині зростає порівняно з неармованим бетоном на 7-19%. Більш крихкий характер руйнування спостерігається в неармованих та дисперсноармованих бетонах з підвищеною витратою фібри (4-6 мас.%), що підтверджується значеннями критерію крихкості (табл. 5.4).

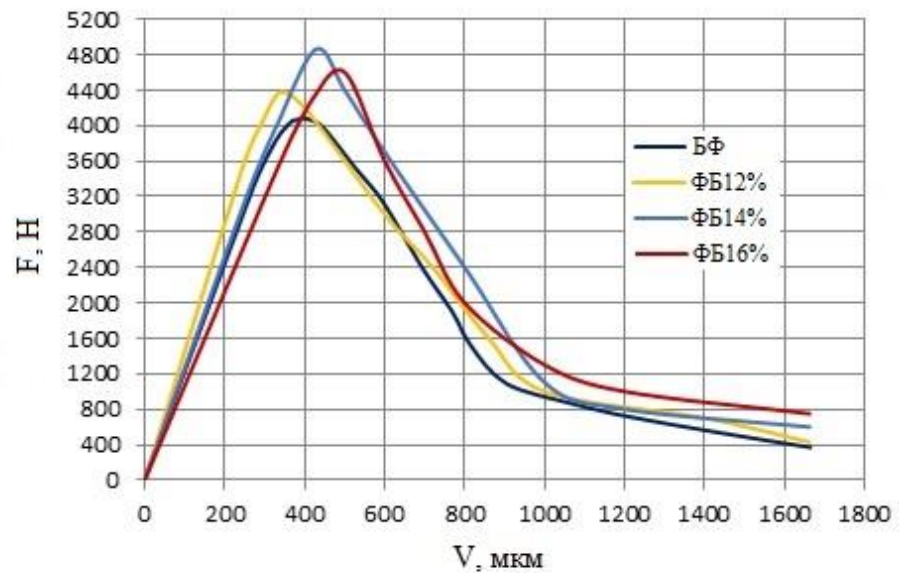


Рисунок 5.2 - Повні діаграми стану цементобетонів неармованих та дисперсноармованих базальтовою фіброю типу ФБ1

За конфігурацією діаграм стану і координатами їх характерних точок розраховано комплекс силових та енергетичних характеристик досліджуваних бетонів (табл. 5.5).

Таблиця 5.4 - Показники міцності і деформативності неармованих цементобетонів та дисперсноармованих базальтовою фіброю типу ФБ1

Серія бетонів	Міцність на стиск $f_{c, cube}$, МПа	Міцність на розтяг при згині f_{ctfm} , МПа	Статичний розрахунковий модуль пружності бетону E_b , МПа	Критерій крихкості $X_{tb} \cdot 10^{-3}$, м
БФ	47,8	8,63	3371	193
ФБ1 2%	46,2	9,26	3989	224
ФБ1 4%	50,5	10,28	3476	177
ФБ1 6%	51,3	9,73	2933	150

Ефективна робота бетону в докритичній стадії спостерігається за дисперсного армування бетону базальтовою фіброю на рівні 4 та 6 мас.% цементу і сягає 21 та 39% відповідно (за показниками питомих енерговитрат на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини G_i). При вмісті фібри 2 мас.% показник G_i знизився порівняно з неармованим бетоном базової серії на 12%.

Ефективність застосування армування в закритичній стадії деформування бетону (за питомими енерговитратами на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_i) спостерігається у всіх бетонах, дисперсноармованих базальтовою фіброю типу ФБ1. Така ж тенденція зберігається і з загальною роботою деформування бетону. Питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування (G_F) зростають із збільшенням витрати фібри.

Статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (в'язкість руйнування), що характеризує ефективність роботи бетону до моменту початку руху макротріщини, внаслідок армування базальтовою фіброю зростає від 0,72 для базової (неармованої) серії до 0,81 МПа·м^{1/2} - для серії ФБ1 4%.

Таблиця 5.5 - Силкові та енергетичні характеристики тріщиностійкості цементобетону, неармованого та дисперсноармованих базальтовою фіброю типу ФБ1

Серія бетонів	$W_m \cdot 10^2$, Н·м (SOTCA)	$W_e \cdot 10^2$, Н·м (SACH)	$W_i \cdot 10^2$, Н·м (SOTCH)	$W_L \cdot 10^2$, Н·м (SHCDK)	$W_{ui} \cdot 10^2$, Н·м (SocUM)	$W_{CE} \cdot 10^2$, Н·м (SOTCXO)	G_i , Дж/м ²	G_L , Дж/м ²	G_F , Дж/м ²	J_i , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	K_c , МПа·м ^{1/2}
БФ	24	68	93	187	34	53	154,53	311,51	425,50	98	0,72	0,54
ФБ1 2%	15	67	81	222	33	30	135,55	370,35	481,37	80,56	0,74	0,45
ФБ1 4%	18	94	112	229	47	40	186,98	382,07	538,92	109,31	0,81	0,48
ФБ1 6%	29	100	129	191	49	35	214,98	318,09	484,63	132,50	0,79	0,41

Загалом дисперсне армування бетонів базальтовою фіброю типу ФБ1 ефективно при її витраті 4 та 6 мас.%, за якої досліджувані характеристики досягають максимальних значень.

Для порівняння ефективності дисперсного армування базальтовими фібрами типів ФБ2 та ФБ1 було побудовано повні діаграми стану досліджуваних бетонів на рис. 5.3, наведено показники міцності і деформативності в табл. 5.6, комплекс силових та енергетичних характеристик досліджуваних бетонів в табл. 5.7 для серій бетонів з найвищими показниками, а саме ФБ2 10 та ФБ1 4%.

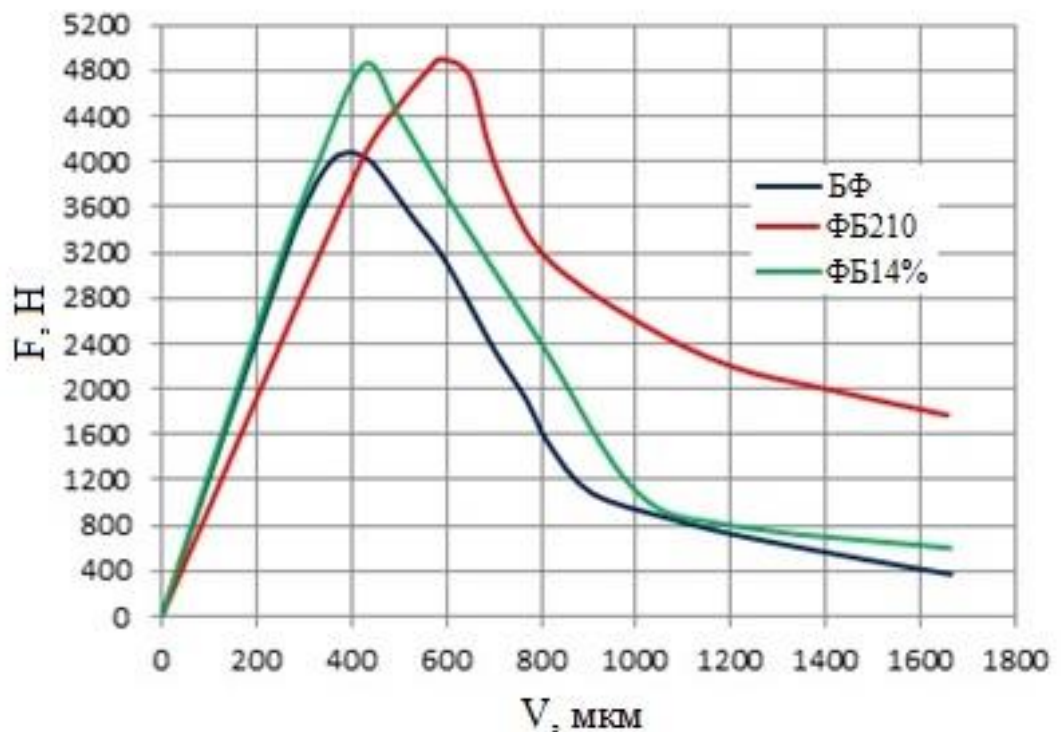


Рисунок 5.3 - Повні діаграми стану бетонів серій БФ, ФБ1 10 та ФБ1 4%

Аналіз конфігурації повної діаграми стану, показників міцності і деформативності, енергетичних та силових характеристик тріщиностійкості свідчить, що дисперсне армування цементобетону більш ефективно при використанні базальтової фібри типу ФБ2 при витраті фібри 10 кг/м³, порівняно з фіброю типу ФБ1 (витрата 4 кг/м³).

Таблиця 5.6 - Показники міцності і деформативності цементобетонів серій БФ, ФБ1 10 та ФБ1 4%

Серія бетонів	Міцність на стиск $f_{c.cube}$, МПа	Міцність на розтяг при згині f_{ctfm} , МПа	Статичний розрахунковий модуль пружності бетону E_b , МПа	Критерій крихкості $X_{tb} \cdot 10^{-3}$, м
БФ	47,8	8,63	3371	193
ФБ2 10	62,7	10,36	2638	167
ФБ1 4%	50,5	10,28	3476	177

Таблиця 5.7 - Силкові та енергетичні характеристики тріщиностійкості цементобетонів серій БФ, ФБ2 10 та ФБ1 4%

Серія бетонів	$W_m \cdot 10^{-2}$, Н·м (SOTCA)	$W_e \cdot 10^{-2}$, Н·м (SACH)	$W_i \cdot 10^{-2}$, Н·м (SOTCH)	$W_L \cdot 10^{-2}$, Н·м (SHCDK)	$W_{un} \cdot 10^{-2}$, Н·м (SOCIUM)	$W_{CE} \cdot 10^{-2}$, Н·м (SOTC' X' O)	G_i , Дж/м ²	G_l , Дж/м ²	G_F , Дж/м ²	J_i , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	K_c , МПа·м ^{1/2}
БФ	24	68	93	187	34	53	154,53	311,51	425,50	98	0,72	0,54
ФБ2 10	35	126	161	282	62	100	268,60	469,29	679,38	164	0,84	0,66
ФБ1 4%	18	94	112	229	47	40	186,98	382,07	538,92	109	0,81	0,48

Отже, дисперсне армування базальтовою фіброю двох типів є ефективне, оскільки в обох випадках відбувається підвищення характеристик міцності та тріщиностійкості.

5.2. Властивості бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, армовані поліпропіленовими волокнами з деформованою поверхнею

Для визначення оптимального складу бетону та вмісту поліпропіленової фібри з деформованою поверхнею використали метод експериментально-статистичного моделювання, застосовуючи трирівневий трифакторний план експерименту. Як впливаючі технологічні фактори використали: X_1 – витрата поліпропіленової фібри ФПДП2 - 7 ± 3 кг на 1 м^3 бетонної суміші; X_2 – відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача – $2,25 \pm 0,75$; X_3 – коефіцієнт розсування зерен крупного заповнювача ($1,4 \pm 0,3$).

Запроектвані склади бетонів наведено в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 - Склади бетонів, дисперсноармованих фіброю ФПДП2

Серії бетонів	Витрата матеріалів, кг/м ³ бетонної суміші									
	Цемент	Вода	Пластифікатор	Полі-пропіленова фібра типу ФПДП2	Дрібний заповнювач		Фракції крупного заповнювача, мм			
					пісок фр. 0-1,25 мм	ПВДГП фр. 1,25-5,0 мм	5-15	5-20	5-30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	350	154	2,45	10	549	323	1060	-	-	
2					367	215	1335	-	-	
3					518	305	-	-	1124	
4					335	196	-	-	1405	
5				4	549	323	1335	-	-	
6					367	215	1060	-	-	
7					518	305	-	-	1124	
8					335	196	-	-	1405	
9					10	435	255	-	1247	-
10					4					

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11				10	549	323	1060	-	-
12				7	437	256	-	-	1249
13					517	303	-	1123	-
14					333	195	-	1403	-
15					435	255	-	1247	-
16									
17									

Аналіз побудованих повних діаграм стану за отриманими результатами досліджень дисперсноармованих бетонів (рис. 5.4) вказує, що найвищі характеристики тріщиностійкості, а саме питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування (G_F), статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (K_i) має серія 4 (витрата поліпропіленової фібри типу ФПДП2 становить 10 кг/м^3 , мінімальне відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача 1,5 та коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача становить 1,1).

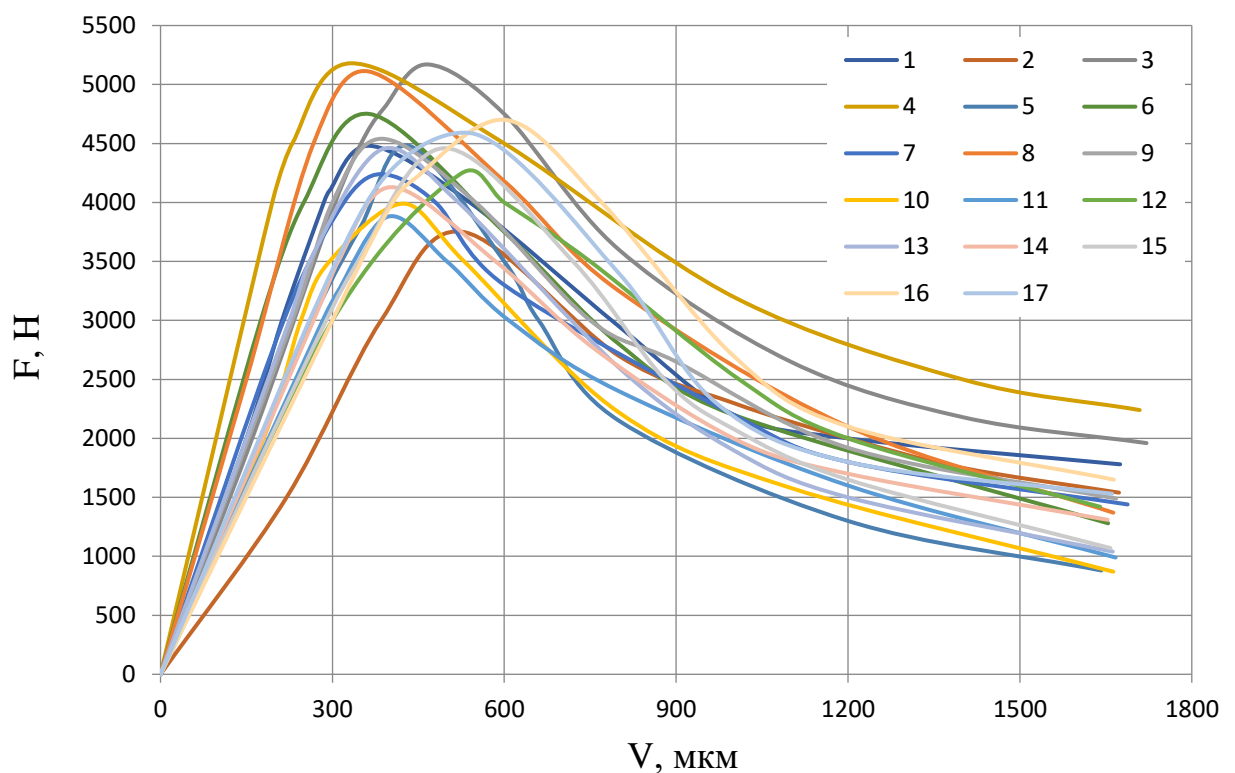


Рисунок 5.4 – Повні діаграми стану бетонів, дисперсноармованих поліпропіленовою фіброю типу ФПДП2

Як видно з рис. 5.5, бетон, армований фіброю типу ФПДП2 (10 кг/м³), серії 4 характеризується найвищою міцністю на розтяг при згині 10,95 МПа і перевищує на 38% міцність бетону серії 2 ($f_{ctfm}=7,93$ МПа), яка є найнижчою.

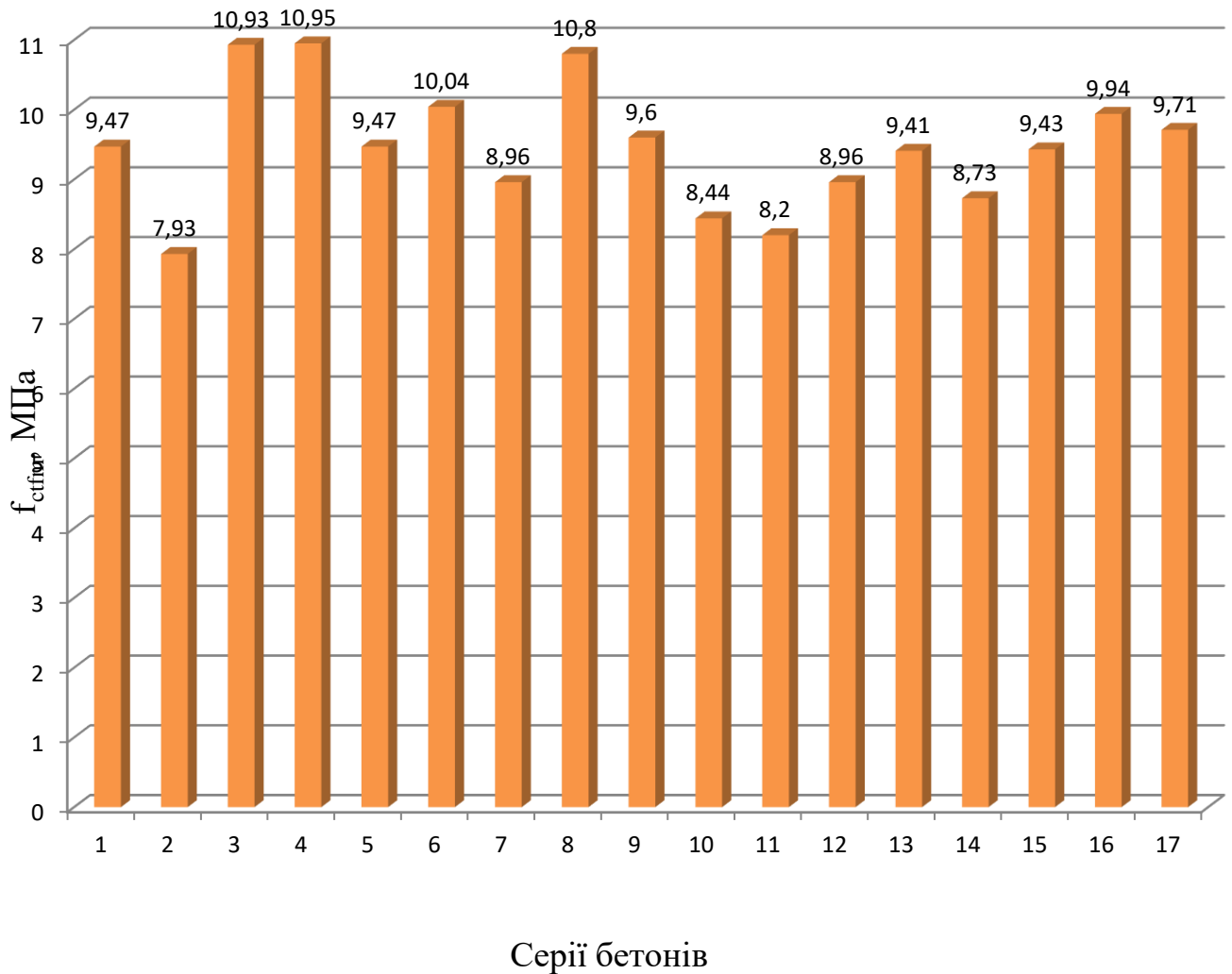


Рисунок 5.5 – Міцність на розтяг при згині бетонів,
дисперсноармованих фіброю типу ФПДП2

Бетону серії 4 також відповідають найвищі питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (G_1 , рис. 5.6) та статичний критичний коефіцієнт (K_i) інтенсивності напружень.

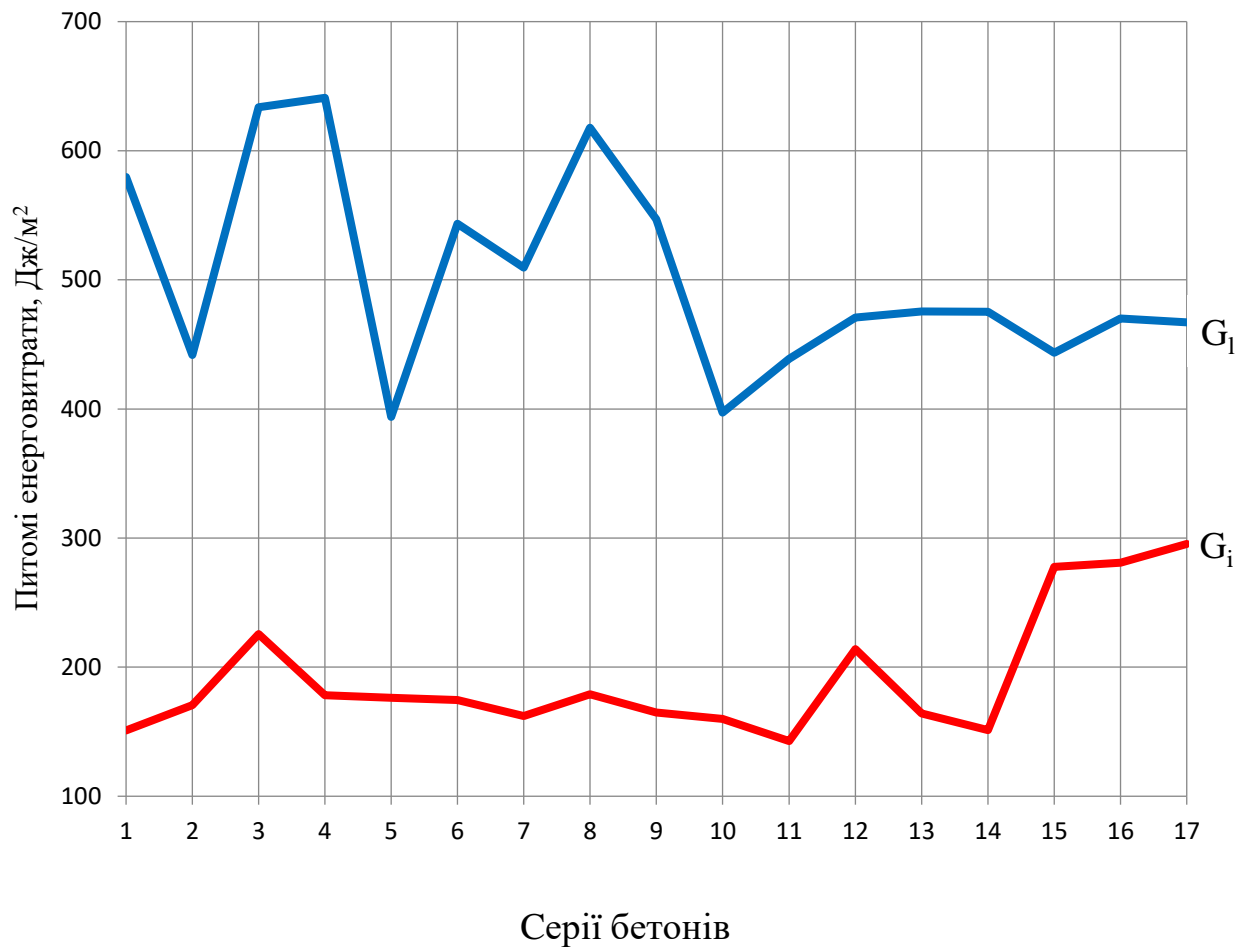


Рисунок 5.6 – Характеристики тріщиностійкості бетонів, дисперсноармованих фіброю типу ФПДП2

Ці результати корелюють з отриманою міцністю на розтяг при згині (рис. 5.7). Слід відзначити, що питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i) в бетонах серій 15; 16; 17, дисперсноармованих поліпропіленовою фіброю типу ФПДП2 вищі (рис. 5.6). Це зумовлено тим, що ці бетони характеризуються більшим коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача ($\alpha=1,4$) порівняно з серією 4 ($\alpha=1,1$). Зростання вмісту розчинової частини в складах таких бетонних сумішей призводить до покращення легкоукладальності, роблячи її більш придатною в будівельних технологіях.

У зв'язку з цим, в подальших дослідженнях використовували склад бетону з технологічними факторами, які варіюються на середньому рівні, а саме щебінь з

найбільшим розміром зерен 30 мм та коефіцієнт розсуву зерен крупного заповнювача 1,1.

Результати досліджень свідчать, що витрата фібри та коефіцієнт розсунення практично не впливають на міцнісні характеристики фібробетону на відміну від розміру крупного заповнювача (рис. 5.8). Так, максимальна міцність на стиск (57,9 МПа) для бетону серії 3 та на розтяг при згині (10,95 МПа) для серії 4 досягаються при використанні щебеню розміром 30 мм. Зменшення розміру

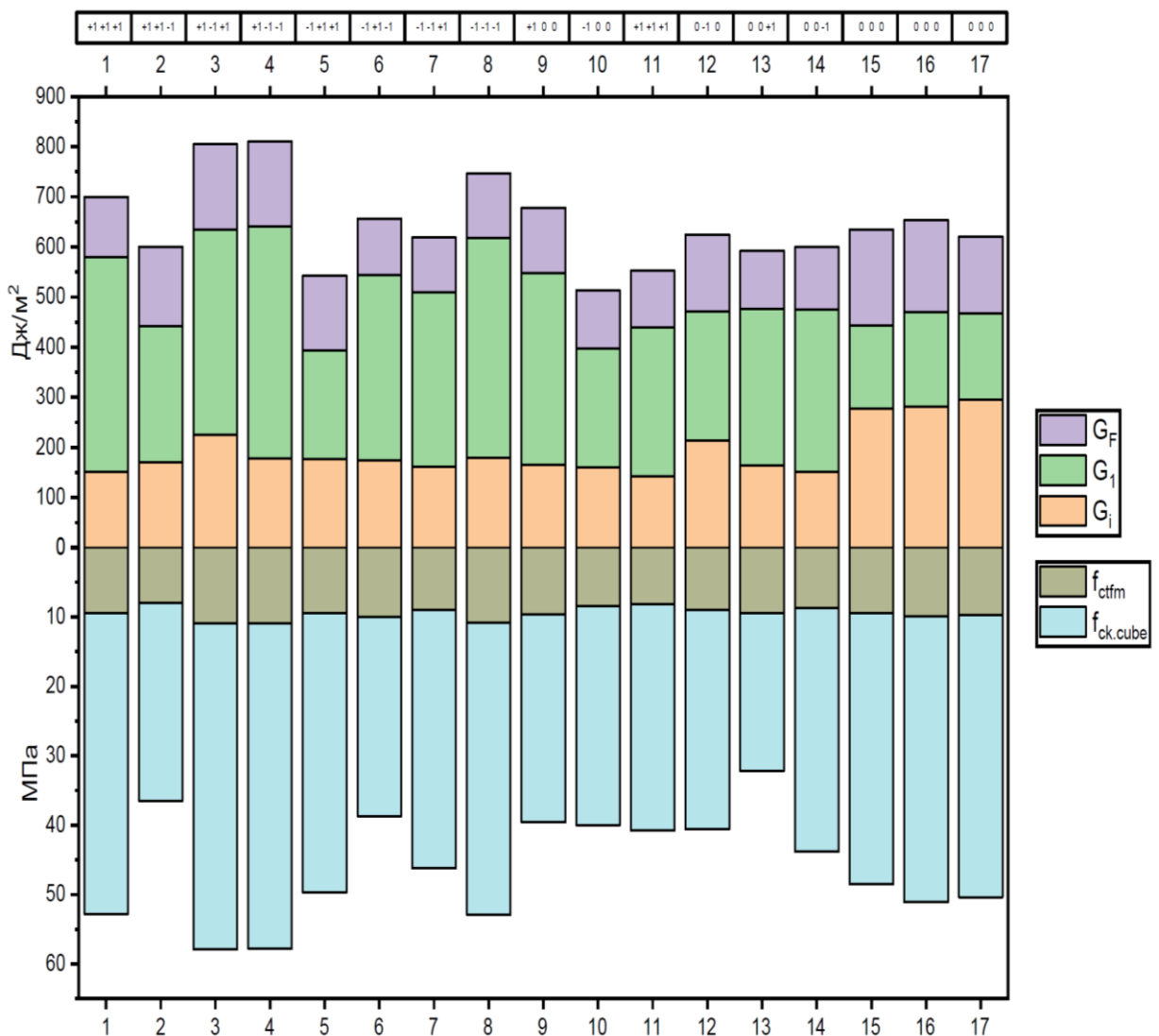
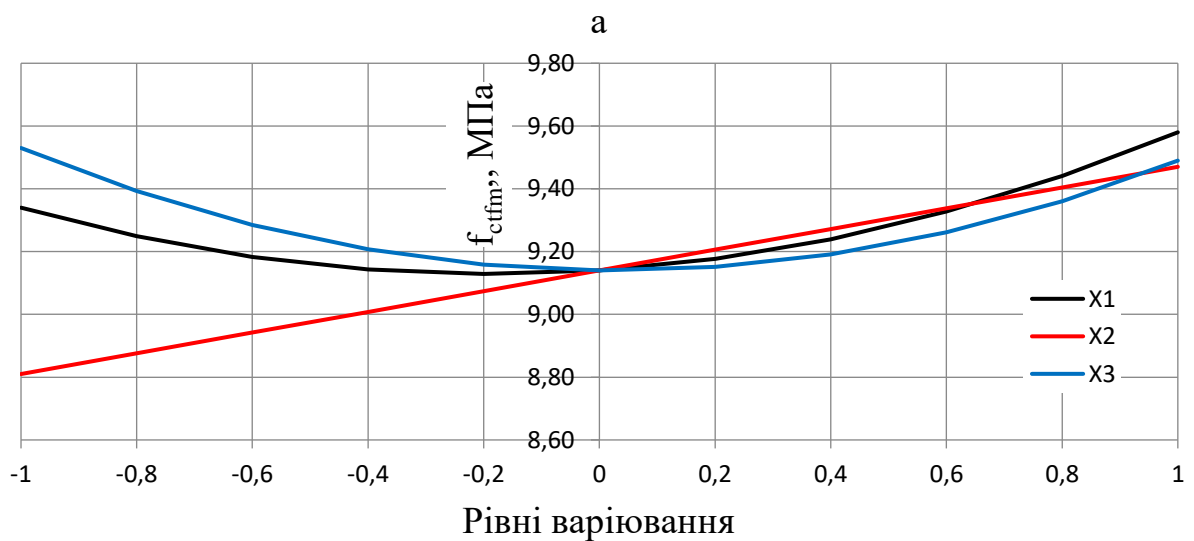
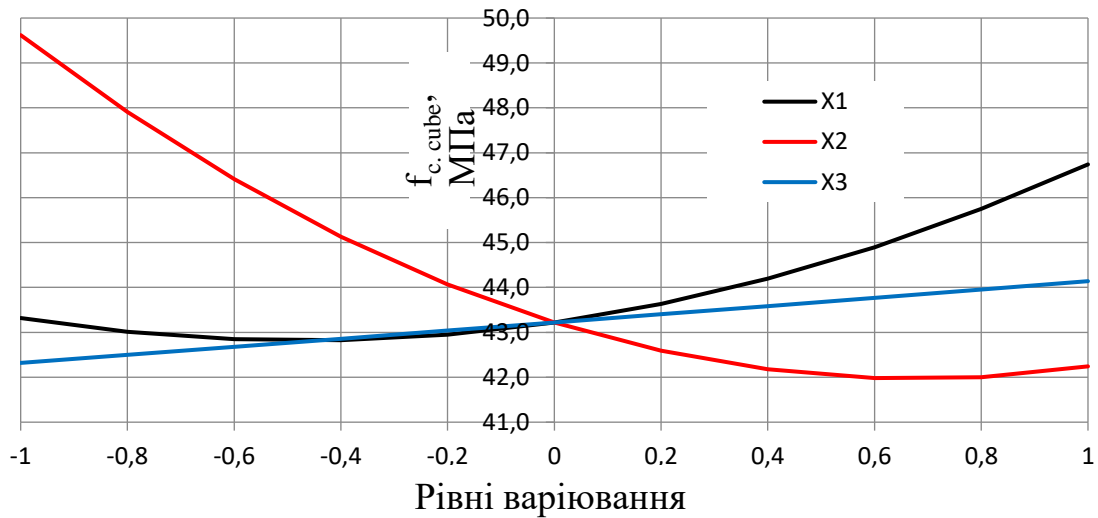


Рисунок 5.7 - Характеристики міцності та тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленою фіброю з деформованою поверхнею



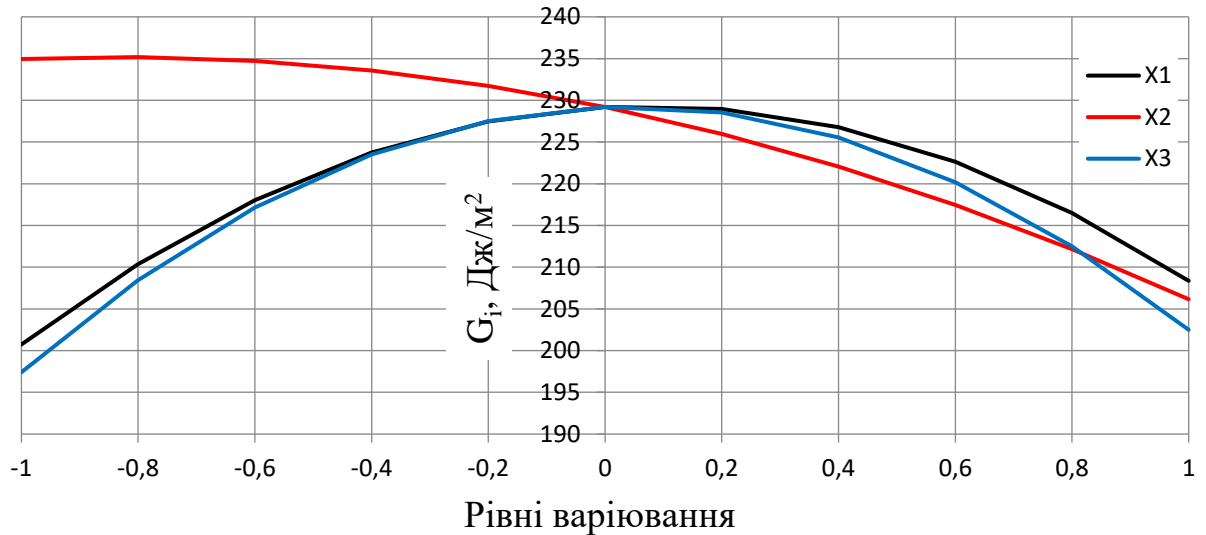
б

Рисунок 5.8 – Міцнісні характеристики бетонів, дисперсноармованих поліпропіленою фіброю типу ФПДП2: а – міцність на стиск; б – міцність на розтяг при згині

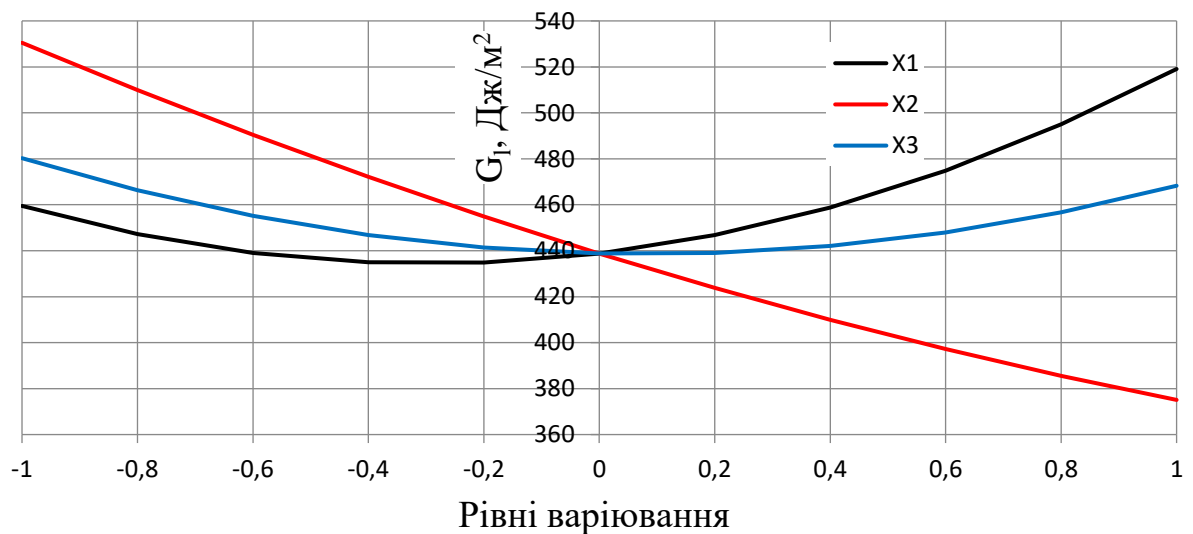
щебеню з 30 до 15 мм призводить до спаду міцності на стиск бетону серії 2 на 59% та міцності на розтяг при згині на 38%. Повні діаграми стану використовувалися для розрахунку міцності на розтяг при згині по значеннях ординати точки зламу при рівноважних випробуваннях за триточковим згином.

Питомі енерговитрати на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i) визначають ефективність роботи бетону в докритичній стадії. Як видно з рис. 5.9, а, залежність показника G_i від витрати фібри та

коефіцієнта розсунення має параболічний характер і екстремум ($G_i=229 \text{ Дж/м}^2$) досягається коли впливаючі фактори ϵ на середньому рівні. В той же час, спад спостерігається при мінімальних і максимальних значеннях X_2 та X_3 . Бетони з максимальною крупністю заповнювача 30 і 20 мм працюють краще до моменту зрушення макротріщини порівняно з дрібнозернистими бетонами.



а



б

Рисунок 5.9 – Енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів, дисперсноармованих поліпропіленовою фіброю типу ФПДП2: а – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини G_i ; б – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_i

Питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини визначають ефективність деформування в закритичній стадії (рис. 5.9, б). При вмісті фібри більше 7 кг/м^3 починає проявлятися ефект дисперсного армування і досягається максимум 519 Дж/м^2 при кількості фібри 10 кг/м^3 бетонної суміші. Спостерігається практично лінійна залежність G_1 від розміру крупного заповнювача, а при зменшенні розміру крупного заповнювача від 30 до 15 мм відбувається падіння G_1 на 29%. Коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача має незначний вплив.

Питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування характеризують загальну “роботу” бетону (рис. 5.10). Із збільшенням витрати фібри та розміру крупного заповнювача вони зростають, але спостерігається падіння показника G_F при зростанні коефіцієнта розсунення зерен крупного заповнювача.

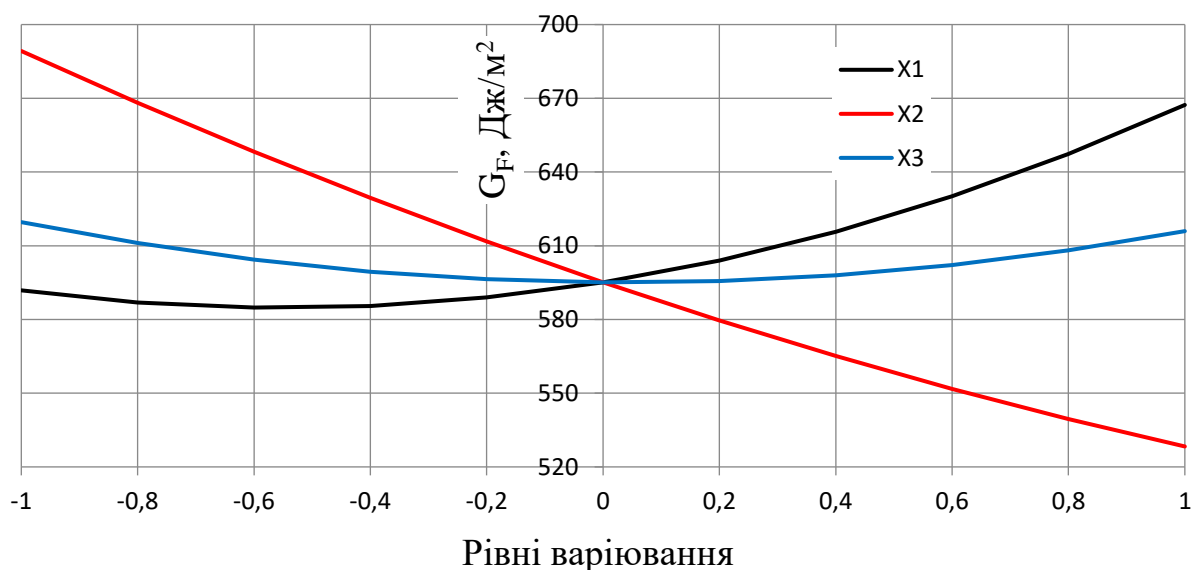


Рисунок 5.10 – Залежність питомих ефективних енерговитрат на статичне руйнування G_F досліджуваних енергетичних характеристик тріщиностійкості дисперсноармованих бетонів поліпропіленовою фіброю типу ФПДП2 від обраних технологічних факторів

Отже, бетон, армований поліпропіленовою фіброю типу ФПДП2 (10 кг/м^3) та з

мінімальним відношенням довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача 1,5 (найбільший розмір зерна щебеню 30 мм), а також коефіцієнтом розсунення зерен крупного заповнювача 1,1 має найвищі показники міцності на стиск (57,8 МПа), розтяг при згині (10,95 МПа) та характеристики тріщиностійкості ($G_i=178,17$ Дж/м², $G_l=640,97$ Дж/м², $G_F=810,15$ Дж/м²).

5.3. Вплив прямих поліпропіленових волокон на параметри тріщиностійкості бетонів

Для дослідження впливу поліпропіленової фібри на міцність і тріщиностійкість бетонів та оптимізації її вмісту в розроблених складах використовували такі впливаючі технологічні фактори: X_1 – витрата фібри типу ФПП1 - $1,35\pm 0,45$ кг/м³ бетонної суміші; X_2 – відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача – $0,6\pm 0,2$; X_3 – коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача ($1,4\pm 0,3$).

Склади досліджуваних бетонів представлено в табл. 5.9. Усі суміші готувалися при однаковому водоцементному відношенні, яке становило 0,44. Марка бетонної суміші за осадкою конуса S1.

Аналіз повних діаграм стану (рис. 5.11) та характеристик міцності, а також тріщиностійкості досліджуваних бетонів через 28 діб тверднення (рис. 5.12) свідчить, що серія 32 (бетон, армований поліпропіленовою фіброю типу ФПП1 (витрата фібри $1,35$ кг/м³, відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача $0,6$, що відповідає фракції щебеню з максимальним розміром зерна 20 мм, коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача $1,4$) характеризується найвищими показниками тріщиностійкості, а саме питомими енерговитратами на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i), питомими ефективними енерговитратами на статичне

Таблиця 5.9 - Склади бетонів, дисперсноармованих поліпропіленою фіброю типу ФПП1

Серії бетонів	Витрата матеріалів кг/м ³ бетонної суміші								
	Цемент	Вода	Пластифікатор	Поліпропіленова фібра типу ФПП1	Дрібні й заповнювач		Фракції крупного заповнювача, мм		
					Пісок фр. 0-1,25 мм	ПВДГП фр. 1,25-5,0 мм	5-15	5-20	5-30
18	350	154	2,45	1,8	549	323	1060	-	-
19					367	215	1335	-	-
20					518	305	-	-	1124
21					335	196	-	-	1405
22				0,9	549	323	1335	-	-
23					367	215	1060	-	-
24					518	305	-	-	1124
25					335	196	-	-	1405
26				1,8	435	255	-	1247	-
27					0,9				
28				1,8	549	323	1060	-	-
29				1,35	437	256	-	-	1249
30					517	303	-	1123	-
31					333	195	-	1403	-
32					435	255	-	1247	-
33									
34									

руйнування (G_f) та статичним критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень (K_i). Незначно нижчі енергетичні характеристики тріщиностійкості в бетоні серії 21, який містить на 23% менший вміст розчинової частини і вищий на 13% вміст щебеню фракції 5-30 мм. При цьому вміст поліпропіленої фібри типу ФПП1

вищий на 33% порівняно з бетоном серії 32 і становить $1,8 \text{ кг/м}^3$ бетонної суміші. В той же час, міцність на стиск та розтяг при згині нижча на 5,3 та 13,4% відповідно.

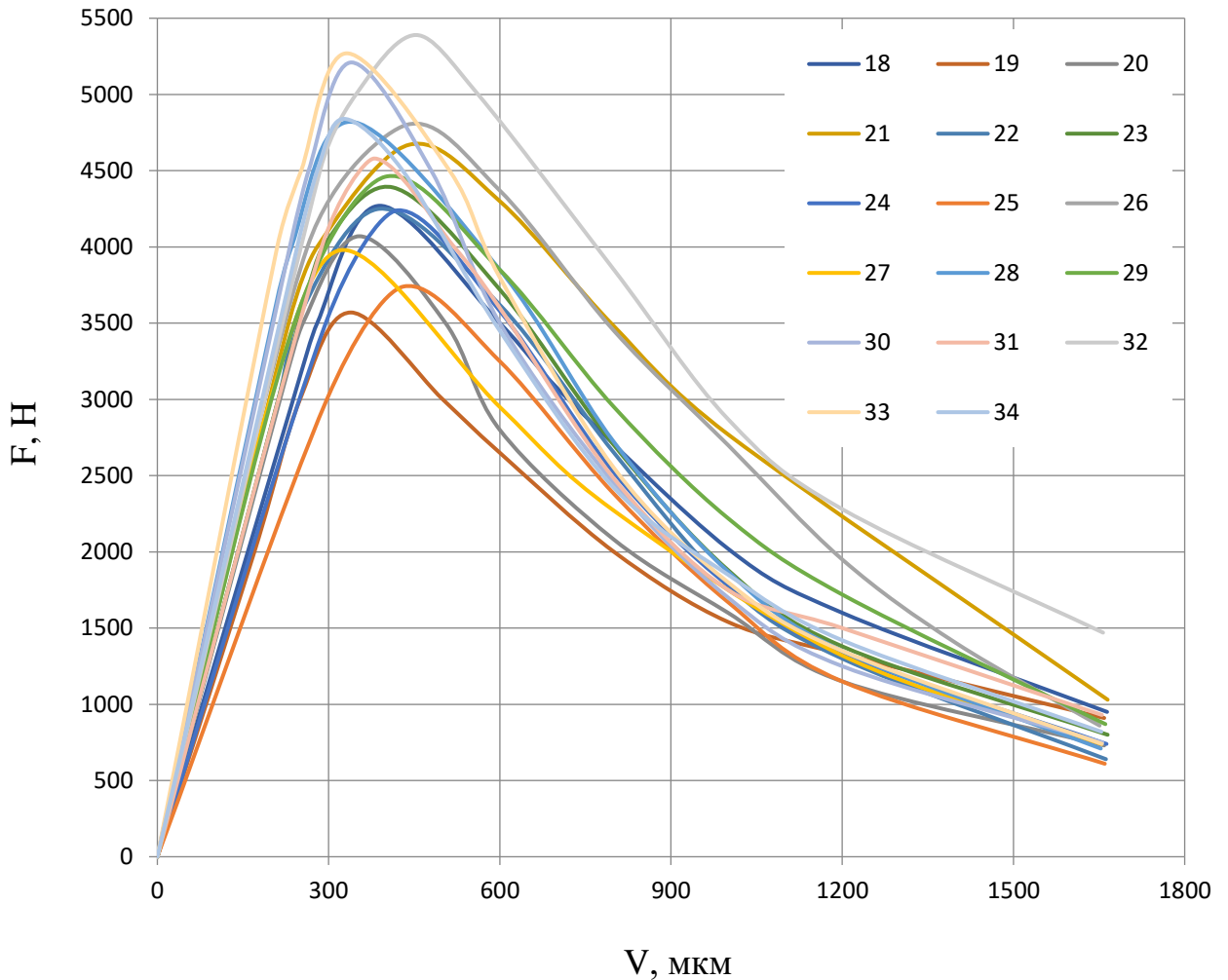


Рисунок 5.11 – Повні діаграми стану бетонів, дисперсноармованих поліпропіленою фіброю типу ФПП1

На рис. 5.13-16 представлені залежності міцнісних та енергетичних характеристик тріщиностійкості досліджуваних фібробетонів від зміни одного з трьох технологічних факторів (інші два знаходяться на середньому рівні).

Як видно з рис. 5.13, міцність на стиск бетонів, дисперсноармованих поліпропіленою фіброю типу ФПП1, в більшій мірі залежить від розміру крупного заповнювача при середній витраті фібри ($1,35 \text{ кг/м}^3$). В той час як міцність на розтяг при згині досліджуваних бетонів залежить від коефіцієнта розсунення, із

зростанням якого, спостерігається збільшення міцності (рис. 5.14). Найвищі питомі енерговитрати на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини спостерігаються в бетонах, дисперсноармованих поліпропіленою фіброю типу ФПП1, оптимальний вміст якої знаходиться в центрі плану ортогонального композиційного планування експерименту (рис. 5.15, а). Така ж закономірність спостерігається і для питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (рис. 5.15, б) та питомих ефективних енерговитрат на статичне руйнування досліджуваних бетонів (рис. 5.16).

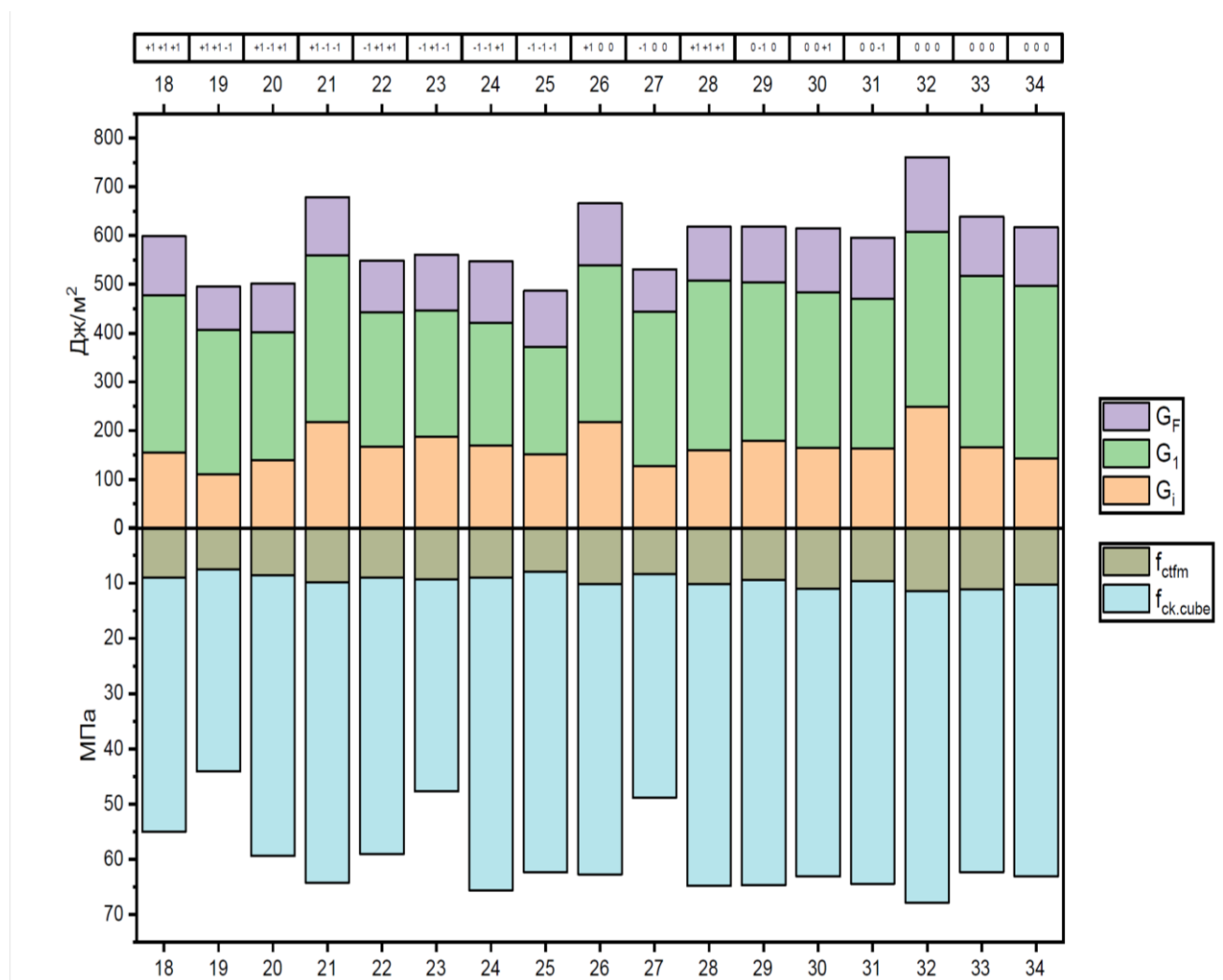


Рисунок 5.12 - Показники міцності та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленою фіброю типу ФПП1

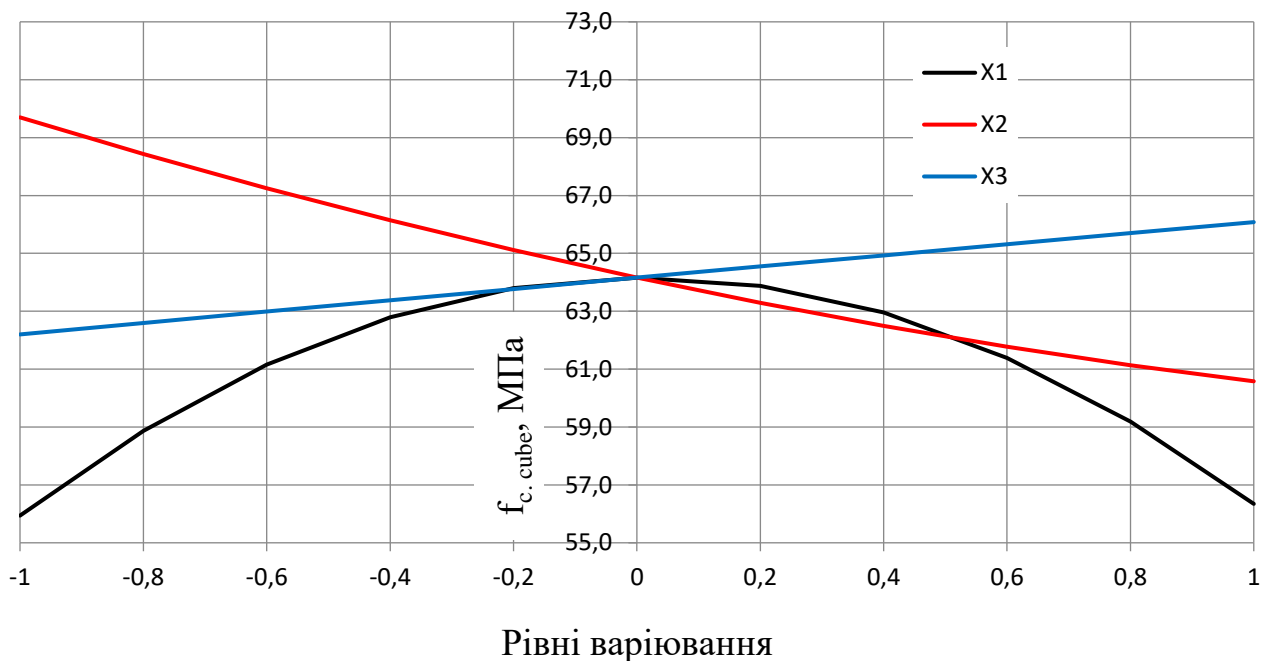


Рисунок 5.13 – Міцність на стиск бетонів, дисперсноармованих поліпропіленою фіброю типу ФПП1, залежно від варіювання технологічних факторів

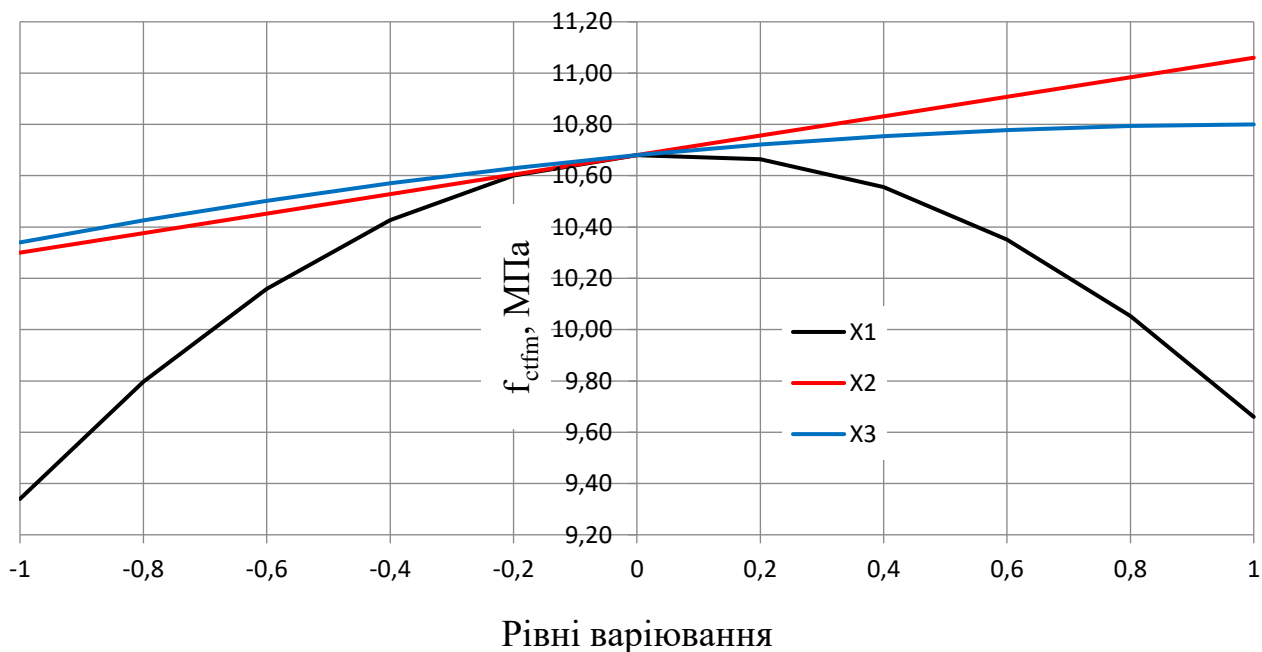
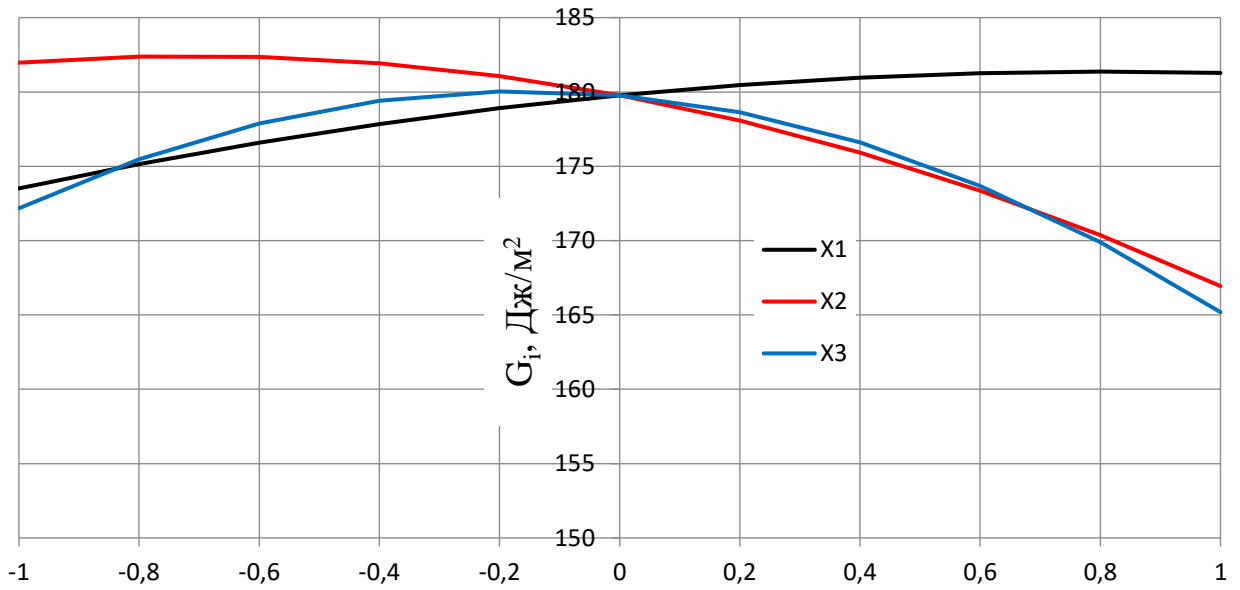
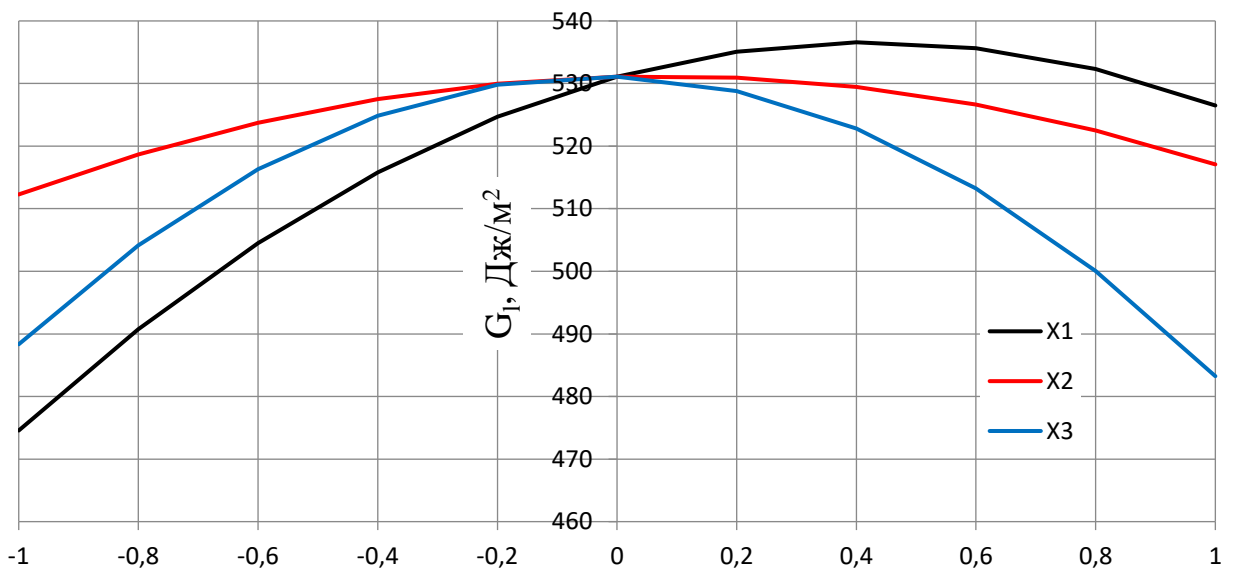


Рисунок 5.14 – Міцність на розтяг при згині бетонів, дисперсноармованих поліпропіленою фіброю типу ФПП1, залежно від варіювання технологічних факторів



Рівні варіювання

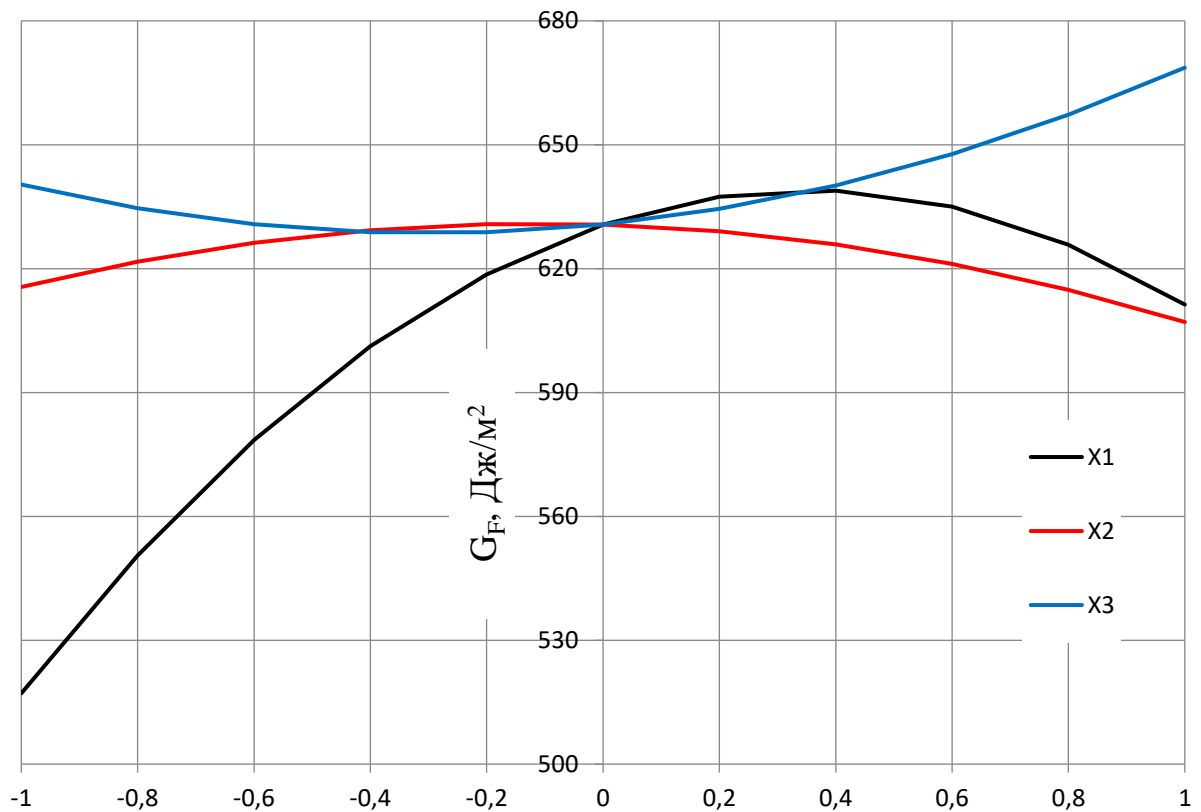
а



Рівні варіювання

б

Рисунок 5.15 – Питомі енерговитрати на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (а) та питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (б) бетонів, дисперсноармованих поліпропіленовою фіброю типу ФПП1, залежно від варіювання технологічних факторів



Рівні варіювання

Рисунок 5.16 – Питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування бетонів, дисперсноармованих поліпропіленовою фіброю типу ФПП1, залежно від варіювання технологічних факторів

Одержані результати свідчать, що відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача та витрата фібри мають суттєвий вплив на міцнісні характеристики (рис. 5.13, 5.14). Максимальна міцність на стиск та на розтяг при згині досягаються при вмісті фібри (середній рівень) в бетонах 1,3 – 1,4 $\text{кг}/\text{м}^3$. Максимальне значення міцності на розтяг при згині досягається на середньому рівні при $l_f/D_{\max}=0,6$ ($D_{\max}=20$ мм) та витраті фібри 1,35 $\text{кг}/\text{м}^3$ бетонної суміші. Слід відзначити, що зниження на 14 % міцності на стиск спостерігається при зростанні відношення довжини фібри до максимального діаметра частинок

крупного заповнювача від $l_f/D_{\max}=0,4$ до $l_f/D_{\max}=0,8$. Зниження міцності відбувається при збільшенні та зменшенні витрати фібри. Незначне підвищення міцності фіброармованих бетонів відбувається із зростанням коефіцієнта розсуву частинок крупного заповнювача.

Питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини визначають ефективність “роботи” бетону в докритичній стадії (рис. 5.15, а). На даному етапі стримування формування та поширення тріщин забезпечується при відношенні довжини фібри до максимальної крупності щебеню, що використовується, на рівні 0,4 – 0,6 (середній та мінімальний рівень – 20 - 30 мм) та різко падає, якщо значення досягає 0,8 (розмір зерен крупного заповнювача 15 мм). Енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини характеризують “роботу” бетону в закритичній стадії (рис. 5.15, б), максимальне значення якої при відношенні довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача 0,6 (щебінь з $D_{\max} = 20$ мм), а коефіцієнт розсуву частинок крупного заповнювача $\alpha=1,4$ становить 531 Дж. При збільшенні вмісту фібри з 0,9 до 1,6 кг/м³ відбувається зростання на 21% питомих енерговитрат на статичне руйнування. Питомі енерговитрати ($G_1=537$ Дж/м²) на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (рис. 5.15, б), що характеризують тріщиностійкість, максимальні при вмісті фібри 1,6 кг/м³ та середніх значеннях $l_f/D_{\max}=0,6$ і $\alpha=1,4$.

Як видно з отриманих результатів досліджень (рис. 5.17), максимальними питомими енерговитрати на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_1), питомими ефективними енерговитрати на статичне руйнування (G_F) та найвищим статичним критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень (K_i) характеризується бетон серії 32. Найбільші питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (G_1) має також бетон серії 32. Ці результати корелюють з одержаною міцністю на розтяг при згині.

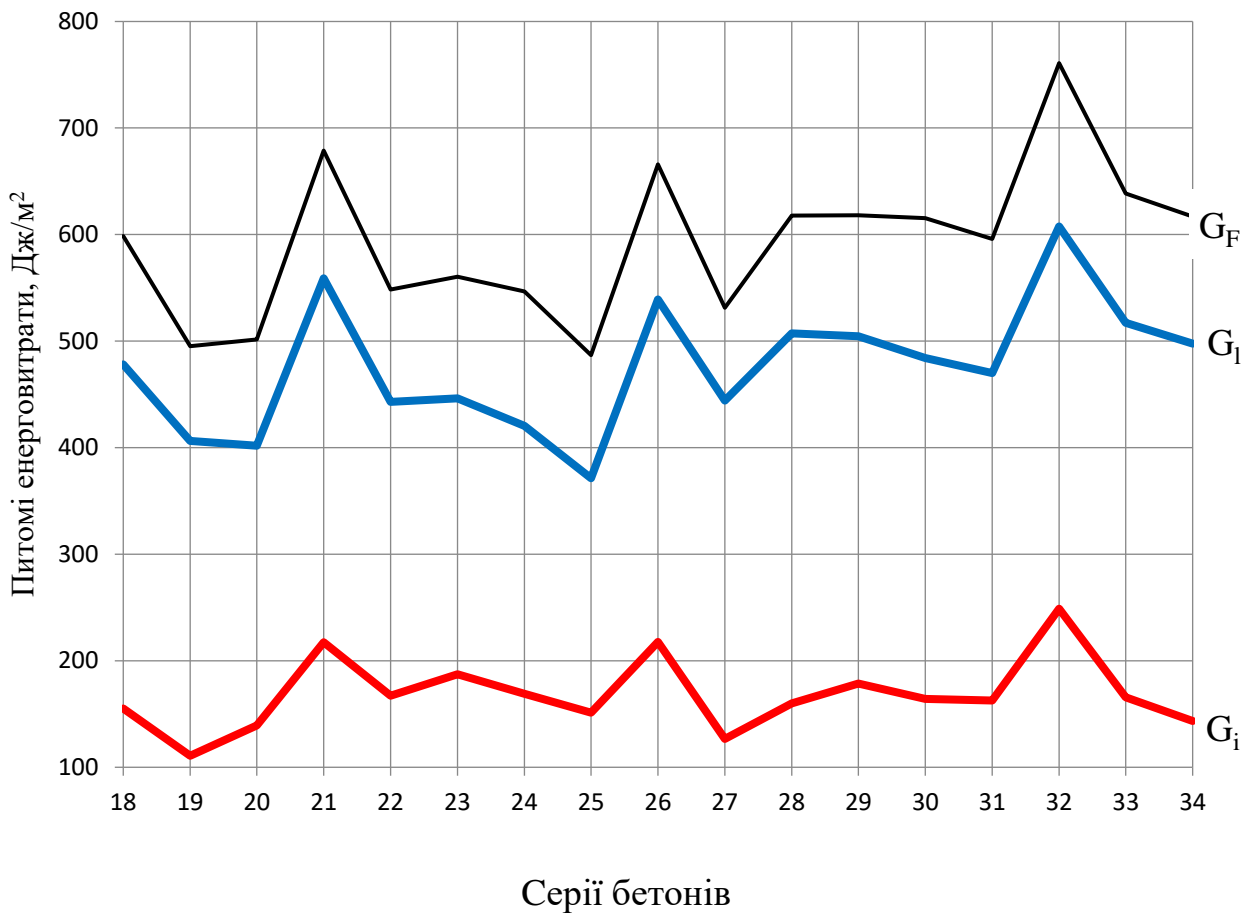


Рисунок 5.17 – Характеристики тріщиностійкості бетонів, дисперсноармованих поліпропіленою фіброю типу ФПП1

Отже, бетон, армований поліпропіленою фіброю типу ФПП1 (витрата фібри 1,35 кг/м³), зі середнім відношенням $l_f/D_{max}=0,6$ (довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача), що відповідає щебеню з $D_{max}=20$ мм та коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача 1,4 характеризується найвищими міцностями на стиск $f_{cm.cube}=67,8$ МПа, на розтяг при згині $f_{ctfm}=11,4$ МПа та характеристиками тріщиностійкості $G_i=248,82$ Дж/м², $G_1=607,58$ Дж/м², $G_F=760,88$ Дж/м².

Отримані результати досліджень вказують на необхідність оптимізації вмісту поліпропіленої фібри типу ФПДП2 і ФПП1в бетонах для забезпечення найкращих показників міцності та характеристик тріщиностійкості.

5.4. Вплив полідисперсного армування на властивості бетонів з підвищеною тріщиностійкістю

Комплексне поєднання фібри ФПДП2 та ФПП1 дає змогу забезпечити неперервне армування бетону, охопивши мезо- та макроструктуру. Оптимальний вміст поліпропіленової фібри типу ФПДП2 та ФПП1 визначали, використовуючи математичне планування експерименту, а саме трирівневий двофакторний план експерименту [80]. Як впливаючі фактори прийнято витрати поліпропіленової фібри різного типу: X_1 (ФПДП2) – 10 ± 2 кг/м³, X_2 (ФПП1) – $1,05 \pm 0,35$ кг/м³ бетонної суміші (табл. 5.10).

Таблиця 5.10 – Впливаючі фактори та інтервали варіювання

№ фактора	Впливаючі фактори		Вміст, кг/м ³ бетонної суміші			
	Натуральний вигляд	Кодований вигляд	нижній рівень “-1”	середній рівень “0”	верхній рівень “+1”	інтервал варіювання
1	Витрата фібри типу ФПДП2	X_1	8,0	10,0	12,0	2,0
2	Витрата фібри типу ФПП1	X_2	0,7	1,05	1,4	0,35

В технології бетонів найчастіше використовують трирівневий план, який за властивостями близький до Д-оптимального.

Матриця планування трирівневого двофакторного експерименту наведена в табл. 5.11.

Таблиця 5.11 - Матриця планування трирівневого двофакторного експерименту

Точки плану N		Матриця планування			
		Кодований вигляд		Натуральний вигляд	
		X_1	X_2	Вміст фібри, кг/м ³ бетонної суміші	
				тип ФПДП2	тип ФПП1
N_1	1	+1	+1	12	1,4
	2	+1	-1	12	0,7
	3	-1	+1	8	1,4
	4	-1	-1	8	0,7
N_α	5	+1	0	12	1,05
	6	-1	0	8	1,05
	7	0	+1	10	1,4
	8	0	-1	10	0,7
N_0	9	0	0	10	1,05

Розрахунок коефіцієнтів регресії для отриманих результатів проведений за формулами 3.3-3.10. У результаті статистичної обробки експериментальних результатів отримані рівняння регресії 2-го порядку, які пов'язують критерії оптимізації з обраними технологічними факторами впливу.

Як критерії оптимізації обрано параметри через 28 діб тверднення:

Y_1 – міцність на стиск, МПа;

Y_2 – міцність на розтяг при згині, МПа;

Y_3 – енерговитрати на мікропластичне і пружне деформування W_i , Н·м·10⁻²;

Y_4 – енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини W_1 , Н·м·10⁻²;

Y_5 – питомі енерговитрати на статичне деформування до моменту руху

магістральної тріщини G_i , Дж/м²;

Y_6 – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування G_F , Дж/м²;

Y_7 – статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, K_i , МПа·м^{1/2}.

За отриманими результатами побудовано повні діаграми стану, які представлені на рис. 5.18. Фізико-механічні, силові та енергетичні характеристики бетонів, неармованих та з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 і ФПП1 наведені в табл. 5.12 та 5.13.

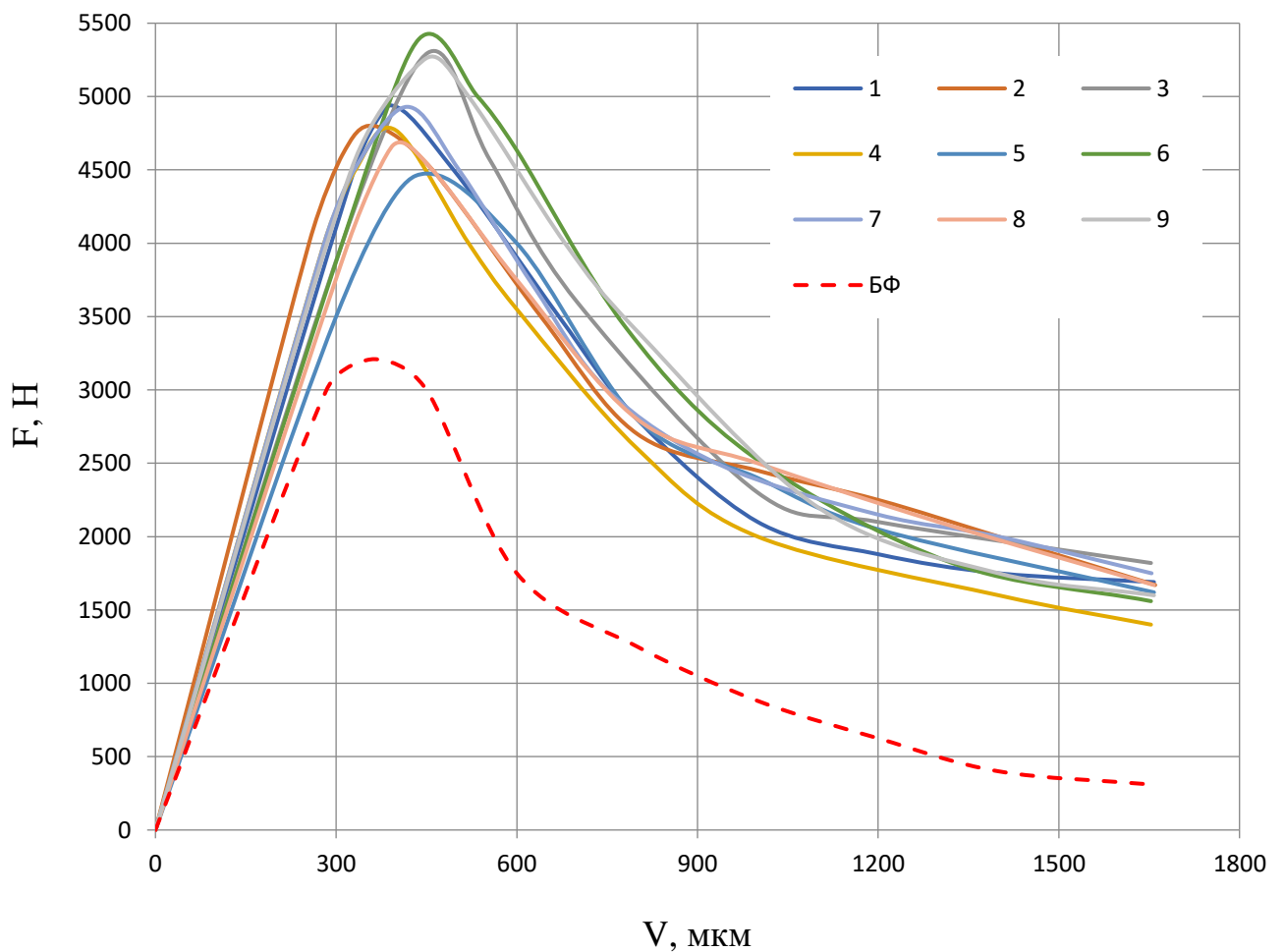


Рисунок 5.18 – Повні діаграми стану бетонів, неармованих, а також з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими волокнами типу ФПДП2 і ФПП1

Побудовані повні діаграми стану бетонів (рис. 5.18) дають можливість

вивчити вплив поєднання поліпропіленових фібр двох різних типів на досліджуванні властивості бетонів. Неармований бетон використано для порівняння впливу полідисперсного армування на властивості досліджуваних бетонів. Слід відзначити, що поєднання двох видів фібр є досить ефективним та дозволяє покращити як міцнісні, так і енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів. Як видно з рис. 5.18, бетони з полідисперсним армуванням фібрами типу ФПДП2 та ФПП1 за характеристиками тріщиностійкості значно переважають бетон без фібри.

Таблиця 5.12 - Фізико-механічні характеристики бетонів, неармованих та з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 і ФПП1 [368]

№ точки плану	Міцність на стиск f_{cmcube} , МПа, у віці, діб			Міцність на розтяг при згині f_{ctfm} , МПа	Статичний розрахунковий модуль пружності бетону E_b , МПа	Критерій крихкості $X_{tb} \cdot 10^{-3}$, м
	3	7	28			
1	34,8	46,8	67,1	10,44	3774	241
2	35,5	51,1	67,0	10,15	4354	302
3	27,9	49,1	65,5	11,21	3573	207
4	30,7	47,9	65,1	10,08	3954	245
5	31,4	50,1	61,5	9,43	3232	244
6	34,3	46,8	69,5	11,90	3577	209
7	31,5	45,7	52,1	10,42	3959	254
8	30,0	47,3	62,1	9,87	3456	253
9	31,5	48,5	62,4	11,12	3835	225
Базова	26,8	45,4	51,1	6,79	2927	208

Високі значення міцності на розтяг при згині та покращені характеристики тріщиностійкості зумовлені “Bridge” ефектом, що створюється фіброволокном, яке сповільнює поширення макротріщини в докритичній стадії та збільшує опір дефрагментації в закритичній стадії руйнування фіброармованих бетонів.

Таблиця 5.13 - Силві та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів, неармованих та з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 і ФПП1 [368]

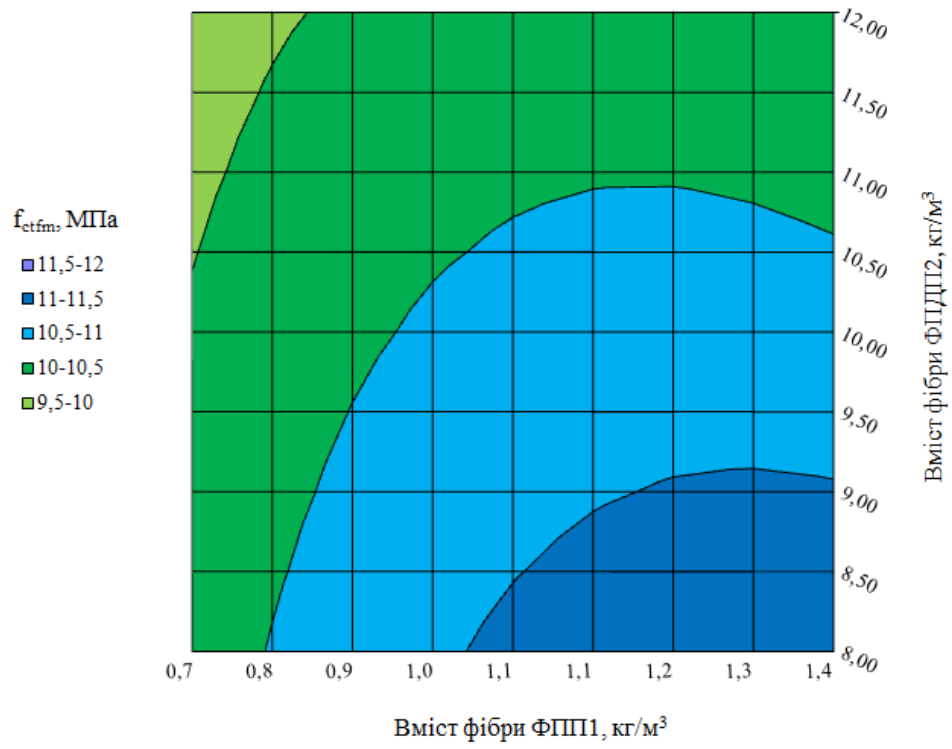
№ точки плану	$W_m \cdot 10^{-2}$, Н·м (SOTCA)	$W_e \cdot 10^{-2}$, Н·м (SACH)	$W_i \cdot 10^{-2}$, Н·м (SOTCH)	$W_L \cdot 10^{-2}$, Н·м (SHCDK)	G_i , Дж/м ²	G_l , Дж/м ²	G_F , Дж/м ²	J_i , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	K_c , МПа·м ^{1/2}
1	12,8	89,6	102,3	329,2	170,56	548,64	697,90	97	0,80	0,68
2	26,60	73,28	99,88	354,88	166,47	591,47	713,61	106	0,85	0,80
3	22,51	108,88	131,39	328,11	218,99	546,85	728,32	129	0,88	0,65
4	29,82	79,69	109,51	298,93	182,51	498,21	631,02	117	0,85	0,75
5	21,05	85,25	106,30	318,19	177,16	530,32	672,41	107	0,76	0,48
6	11,93	112,47	124,40	343,25	207,34	660,19	840,44	115	0,86	0,72
7	34,32	85,04	119,36	332,74	198,93	554,57	696,29	129	0,89	0,87
8	9,76	87,39	97,15	341,33	161,92	568,89	714,54	90	0,75	0,79
9	35,10	99,91	135,00	336,35	225,01	560,58	727,09	143	0,93	0,76
Базова	18,22	48,76	66,98	147,26	111,64	245,43	326,70	71	0,57	0,32

Одержані коефіцієнти рівнянь регресії представлені в табл. 5.14. У результаті планування експерименту визначено оптимальні кількості поліпропіленових фібр типу ФПДП2 і ФПП1. Отримані результати, використано для побудови поверхонь відгуків та ізоліній характеристик міцності та тріщиностійкості бетонів (рис. 5.19-20). За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні діаграми. Аналіз математичних залежностей, а також їх графічна інтерпретація дозволяють визначити оптимальний вміст поліпропіленової фібри типу ФПДП2 і ФПП1, що забезпечує найкращі характеристики розроблених фіброармованих бетонів з підвищеною міцністю.

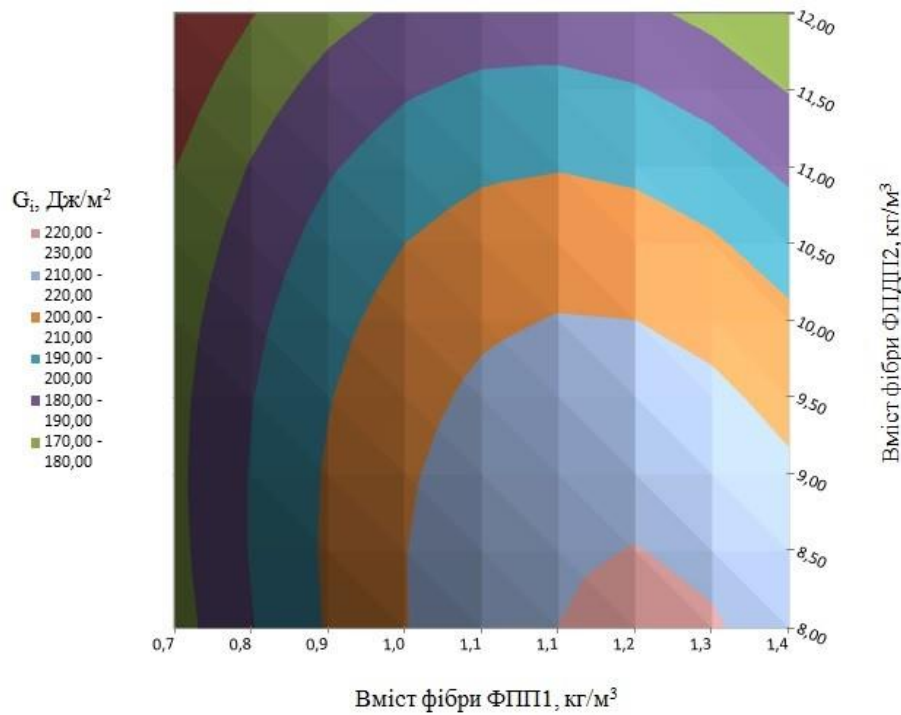
Таблиця 5.14 - Коефіцієнти рівнянь регресії

Функції відгуку Y	Коефіцієнти регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
Y_1	59,7	-0,8	-1,6	7,1	-1,7	-0,1
Y_2	10,7	-0,5	0,3	-0,1	-0,3	-0,2
Y_3	125,2	-9,5	7,8	-4,9	-12,0	-4,9
Y_4	338,0	5,3	-0,9	-8,1	-1,7	-13,7
Y_5	208,4	-15,8	13,0	-8,2	-19,7	-7,8
Y_6	727,8	-5,8	10,3	-12,2	-22,7	-28,3

Аналіз побудованих поверхонь відгуків (рис. 5.19-20) дає можливість встановити області оптимальних значень впливаючих технологічних факторів, які дозволяють отримати покращені показники функцій відгуку, а саме найвищу міцність на розтяг при згині (11,9 МПа), питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування (840,44 Дж/м²) та високі питомі енерговитрати на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (207,34 Дж/м²) і статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (0,86 МПа·м^{1/2}) досягаються при використанні 8 кг/м³ поліпропіленової фібри типу ФПДП2 та 1,05 кг/м³ ФПП1.



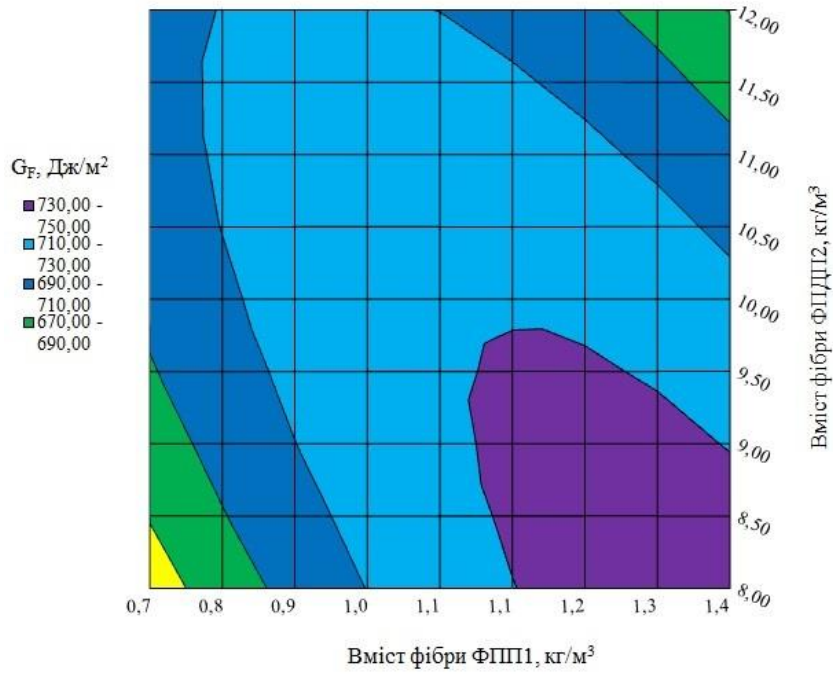
а



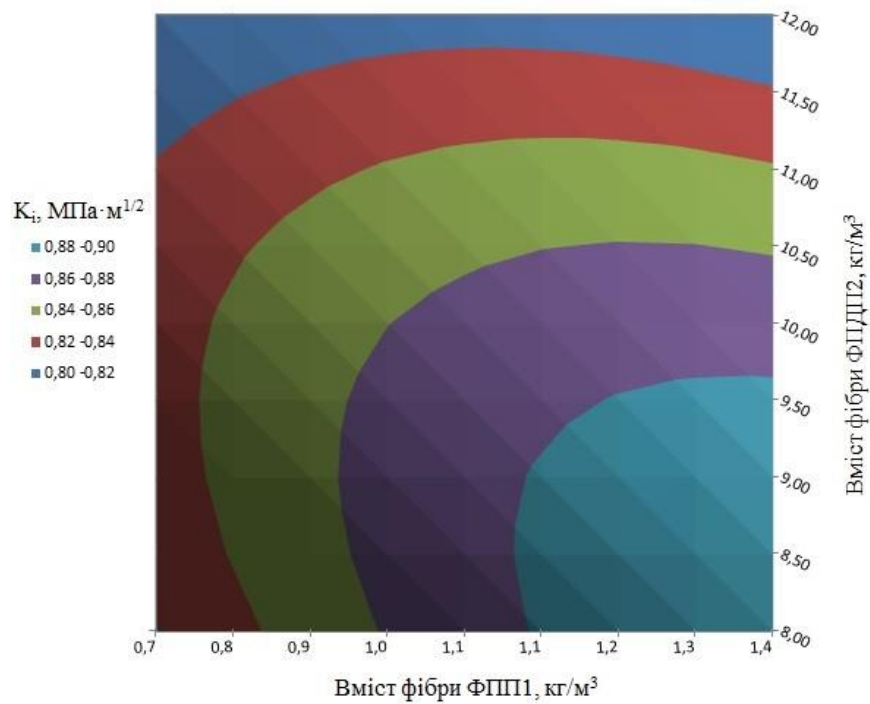
б

Рисунок 5.19 – Поверхні відгуку та ізолінії характеристик бетонів з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1:

а – міцність на розтяг при згині; б – питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини



а



б

Рисунок 5.20 – Поверхні відгуку та ізолінії характеристик бетонів з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1:

а – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування; б – статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень

Отримані значення міцності на розтяг при згині, питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини, питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування та статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень вищі за відповідні характеристики для базового неармованого бетону в 1,8; 1,9; 2,6 та 1,5 рази відповідно.

Розрахований коефіцієнт ефективності дисперсного армування (рис. 5.21) у всіх бетонах, армованих поліпропіленовими волокнами типу ФПДП2 та ФПП1, вищий порівняно з неармованим. Слід відзначити, що коефіцієнт ефективності дисперсного армування розробленого бетону оптимального складу з композиційним полідисперсним армуванням вищий, ніж неармованого бетону на 32%.

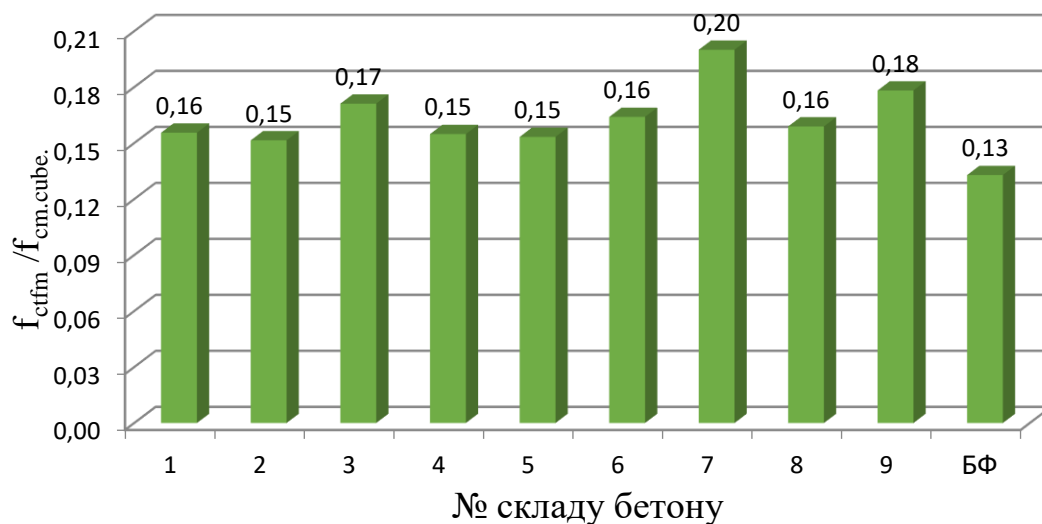


Рисунок 5.21 – Коефіцієнт ефективності композиційного дисперсного армування бетонів поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1

Застосування розроблених бетонів з композиційним дисперсним армуванням в технологіях будівництва визначається в більшій мірі їх будівельно-технічними та експлуатаційними властивостями, вивчення яких представляє незаперечний практичний інтерес.

Досліджені будівельно-технічні властивості бетону з полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами ФПДП2 і ФПП1 та неармованого бетону

представлені в табл. 5.15.

Таблиця 5.15 - Будівельно-технічні властивості бетону з полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами ФПДП2 та ФПП1 та неармованого бетону

Показники	Одиниці вимірювання	Значення показника бетону	
		неармованого	з полідисперсним армуванням
Міцність на стиск у віці 28 діб	МПа	51,1	69,5
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб	МПа	6,79	11,90
Водопоглинання, W_m	%	2,1	2,3
Зниження міцності після 400 циклів заморожування/відтавання	%	12,3	9,8
Стираність	г/см ²	0,27	0,22
Питомі енерговитрати на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини, G_1	Дж/м ²	111,64	207,34
Питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини, G_1	Дж/м ²	245,43	660,19
Загальні питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування, G_F	Дж/м ²	326,70	840,44
В'язкість руйнування, K_1	МПа·м ^{1/2}	0,57	0,86

Як видно з табл. 5.15 міцність на стиск та на розтяг при згині розробленого бетону з композиційним полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1 перевищує значення для неармованого бетону на 36 та 75 %

відповідно.

Масове водопоглинання не відрізняється суттєво. Зниження міцності після 400 циклів заморожування/відтавання для дисперсноармованого та неармованого бетонів становить відповідно 9,8 та 12,3%. Це є наслідком ефективної роботи фібрових волокон, які зменшують імовірність руйнування бетону внаслідок зростання внутрішніх напружень в бетоні при замерзанні рідкої фази. Стираність зменшується на 19% при композиційному полідисперсному армуванні та суттєво зростають енергетичних характеристик тріщиностійкості.

Серед властивостей бетону деформації усадки посідають важливе місце і можуть впливати на якість і довговічність бетонних конструкцій та споруд.

Результати досліджень усадочних деформацій бетонів з полідисперсним армуванням наведено на рис. 5.22 і свідчать, що деформації усадки розробленого бетону з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1 стабілізуються через 22 доби. В той час як для неармованого бетону – через 32 доби. При цьому відносні деформації зменшуються приблизно на 26%.

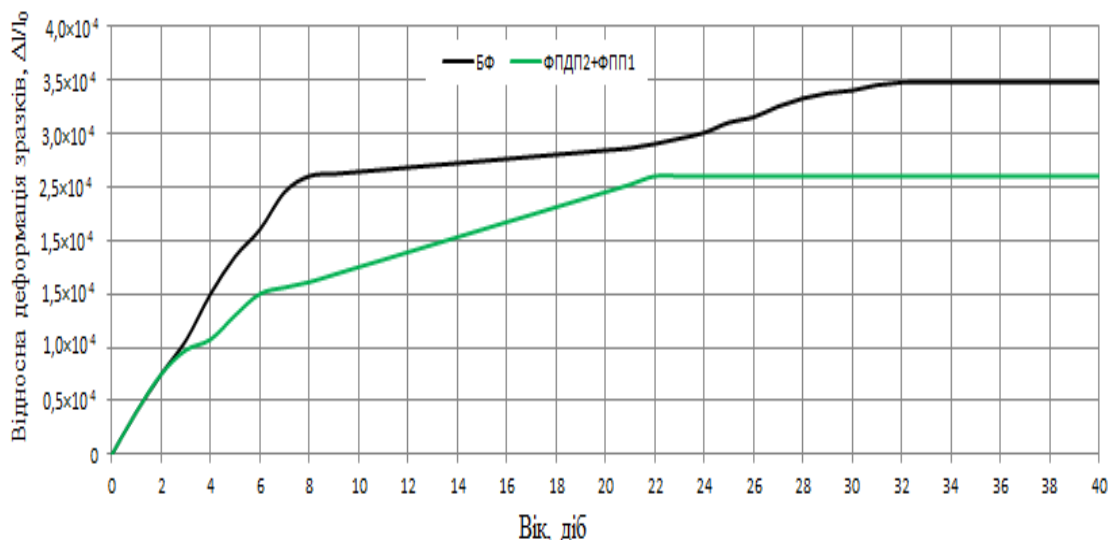


Рисунок 5.22 – Деформації усадки неармованого та розробленого бетону з полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1

Це свідчить про ефективність композиційного дисперсного армування бетонів різними видами фібри.

5.5. Структуроутворення бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, армованих дисперсними волокнами різних видів

Кінетика процесів гідrataції і тверднення, генезис мікроструктури цементного каменю представляють значний практичний інтерес для наукового прогнозування різних властивостей та довговічності бетонів з полідисперсним армуванням.

Електронна мікроскопія створює уявлення про формування мікроструктури бетону, в тому числі і дисперсноармованого поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1, а також дає можливість більш поглиблено вивчити процеси, що відбуваються при твердненні.

Рис. 5.23 свідчить, що мікроструктура бетону з оптимальною кількістю поліпропіленової фібри типу ФПДП2 та ФПП1 характеризується різноманітним кристалічним форм. Спостерігається скупчення в різних місцях значної кількості дрібних голчастих кристалів гідросилікатів кальцію (рис. 5.24).

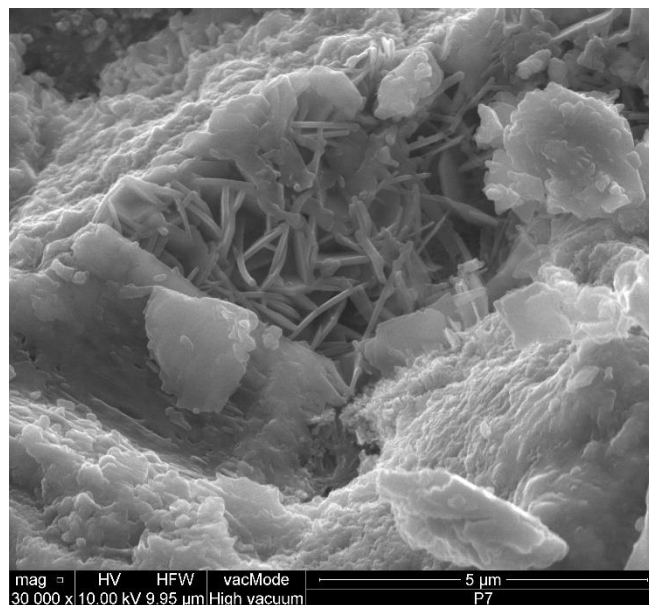


Рисунок 5.23 – Мікроструктура бетону з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1, що тверднули 28 діб в нормальних умовах

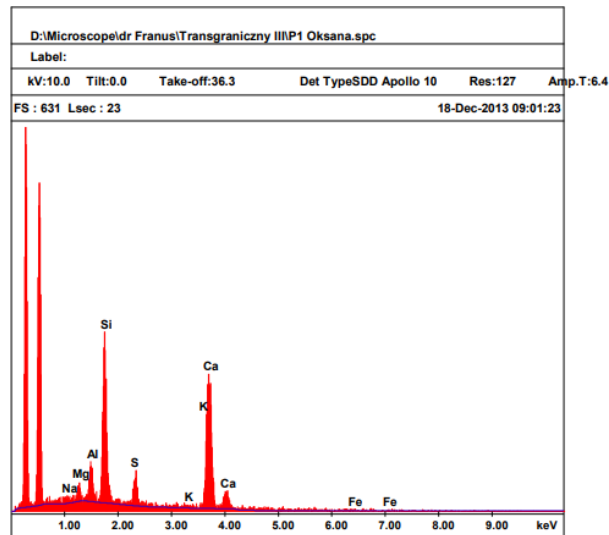


Рисунок 5.24 – Спектр рентгенівського характеристичного випромінювання цементної матриці бетону з полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1, гідратованої 28 діб в нормальних умовах

В деяких місцях мікроструктури бетону (рис. 5.25) чітко видно видовжені кристали гідросульфоалюмінату кальцію, що відносяться до AF_t - фази (рис. 5.26). Збільшення міцності такого бетону відбувається внаслідок ущільнення мікроструктури при твердненні і розвитку міцних кристалізаційних контактів між гідратними фазами, що утворилися.

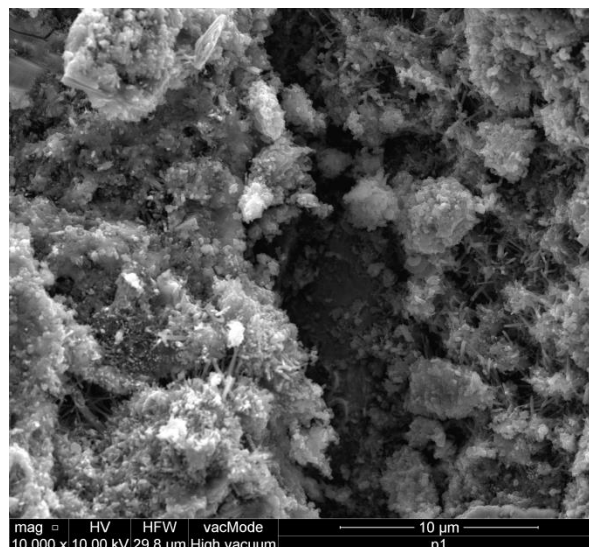


Рисунок 5.25 – Мікроструктура бетону з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1 через 28 діб тверднення в нормальних умовах

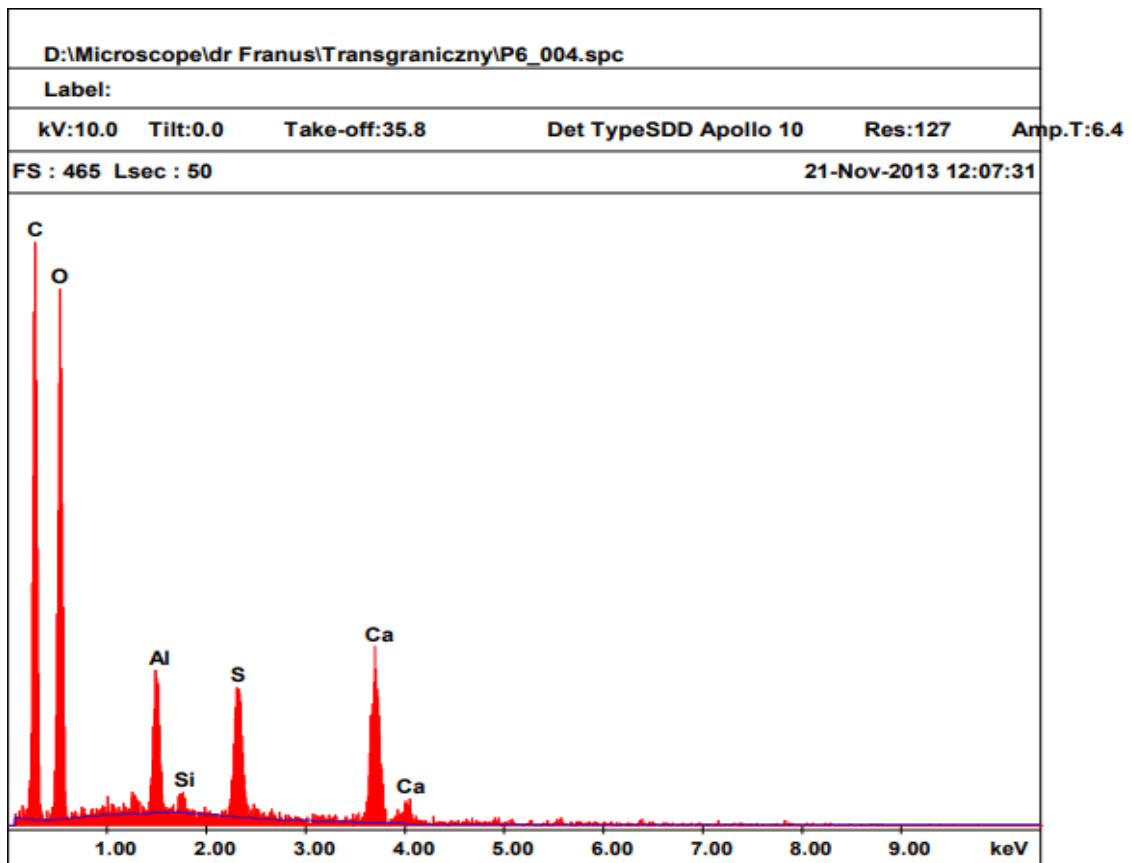


Рисунок 5.26 – Спектр рентгенівського характеристичного випромінювання цементної матриці бетону з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу ФПДП2 та ФПП1, що тверднув 28 діб в нормальних умовах

Проведений аналіз мікроструктури розробленого полідисперсноармованого бетону свідчить, що при використанні поліпропіленових фібр можна одержати “Bridge” ефект (рис. 5.27-28). Відбувається сповільнення розвитку макротріщини в докритичній стадії деформування та зростає опір дефрагментації в закритичній стадії руйнування бетонів з композиційним дисперсним армуванням. Це забезпечує підвищені показники міцності на розтяг при згині та характеристики тріщиностійкості [101, 273]. В зв’язку з цим, деструктивні процеси відбуваються в значно меншій мірі і такий бетон характеризується покращеними та більш стабільними експлуатаційними властивостями.

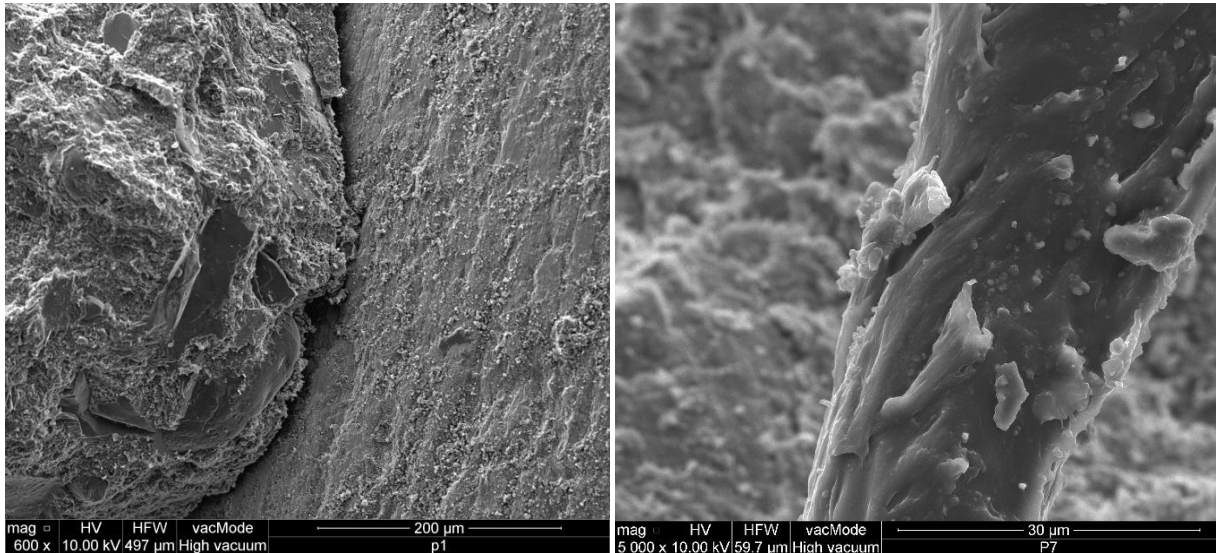


Рисунок 5.27 – Загальний вигляд поліпропіленових фібрових волокон типу ФДП2 в мікроструктурі полідисперсноармованих бетонів

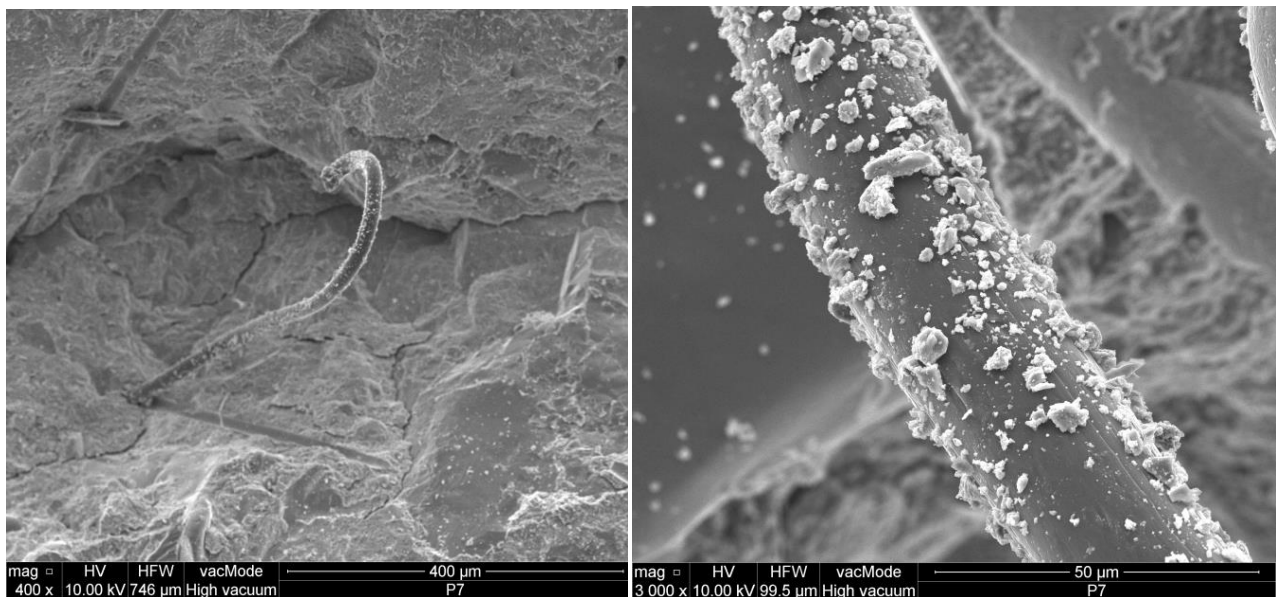


Рисунок 5.28 – Загальний вигляд поліпропіленових волокон типу ФПП1 в мікроструктурі полідисперсноармованих бетонів

Висновки до розділу

1. Найбільша ефективність армування дисперсною поліпропіленою фіброю ФПП1 на докритичній стадії деформування бетону досягається при

максимальному вмісті фібри – $1,8 \text{ кг/м}^3$, витраті щебеню з максимальним розміром 15 мм та коефіцієнті розсунення зерен крупного заповнювача $\alpha=1,7$. Питомі енерговитрати на статичне деформування при цьому зростають на 33% . В закритичній стадії руйнування значний ефект спостерігається при дисперсному армуванні поліпропіленовою фіброю ФПДП2. На цьому етапі неармований бетон із штучно сформованою макротріщиною має слабкий опір руйнуванню і саме цей тип фібрових волокон дисперсноармованого бетону починає включатися в “роботу”. При цьому питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини підвищуються на 51% при максимальному їх вмісті в кількості 10 кг/м^3 . Загальна тріщиностійкість бетону, дисперсноармованого фіброю ФПДП2, що характеризується питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування, підвищується на 44% , при зростанні вмісту фібри з 7 до 10 кг/м^3 .

2. Оптимізацією складів дисперсноармованих бетонів методом математичного планування експерименту встановлено, що при вмісті фібри типу ФПДП2 в кількості 8 кг/м^3 бетонної суміші та ФПП1 – $1,05 \text{ кг/м}^3$ в розроблених дисперсноармованих бетонах досягаються максимальні значення міцностей та характеристик тріщиностійкості. При цьому міцність на розтяг при згині, питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини, питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування та статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень перевищують відповідно в $1,8$; $1,9$; $2,6$ та $1,5$ рази ці показники для неармованого бетону. Таке композиційне дисперсне армування за енергетичними критеріями механіки руйнування значно збільшує опір руйнуванню бетону.

3. Високі показники міцності та характеристики тріщиностійкості розробленого бетону досягаються внаслідок якісних змін бетон на рівні макроструктури. Фіброві волокна при полідисперсному армуванні бетону формують “Bridge” ефект, який спричиняє сповільнення розвитку в докритичній стадії деформування макротріщини та чинить опір в подальшому дефрагментації полідисперсноармованих бетонів в закритичній стадії руйнування. При вмісті

фібри типів ФПП1 ($1,05 \text{ кг/м}^3$) та ФПДП2 (8 кг/м^3) досягаються найвища міцність на розтяг при згині $11,90 \text{ МПа}$.

4. Дослідженнями властивостей розроблених полідисперсноармованих бетонів встановлено, що ці бетони характеризуються вищими показниками міцності на стиск та розтяг при згині на 36 та 75% відповідно порівняно з неармованим. Через 400 циклів поперемінного заморожування та відтаювання спостерігається зниження міцності для армованого та неармованого бетонів відповідно на 9,8 та 12,3%. Значно покращуються характеристики тріщиностійкості та зменшується стираність на 19%, що свідчить про ефективність композиційного армування бетонів поліпропіленовими фібрами типів ФПДП2 та ФПП1, а також перспективність та можливість їх широкого використання в будівництві.

5. Деформації усадки розробленого бетону, армованого поліпропіленовими фібрами типів ФПДП2 та ФПП1, стабілізуються через 22 доби, в той час як для неармованого бетону – через 32 доби, а відносні деформації зменшуються на 26%.

РОЗДІЛ 6. ВЛАСТИВОСТІ, ПРАКТИКА ВИКОРИСТАННЯ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ

6.1. Властивості та тріщиностійкість бетонів, одержаних керуванням структуроутворенням на різних рівнях

Попередні випробування показали, що використання цеолітового туфу, дисперсного армування разом із хімічними добавками пластифікуюче-повітровтягувальної дії призводить до підвищення міцності, тріщиностійкості та експлуатаційних властивостей [84, 212]. Це зумовлено ущільненням мікроструктури бетону за рахунок пуцоланової реакції між полідисперсним цеолітовим туфом та кальцію гідроксидом, що призводить до утворення більшої кількості волокнистих гідросилікатів кальцію та ефекту самоармування, абсорбційним модифікуванням продуктів гідратації хімічними добавками, вдосконаленням порової структури та дисперсним армування на рівні мезо- та макроструктури.

Слід відзначити, що вплив кожного технологічного фактора окремо (вмісту цеолітового туфу, об'єму втягнутого повітря, використання армуючих волокон) достатньо повно вивчено в попередніх розділах, але є обмежена кількість інформація щодо їх спільної дії. Зміна цих факторів дає змогу регулювати параметри тріщиностійкості [105]. Тому для оцінки впливу оптимальної комбінації цеолітового туфу, двох типів дисперсних волокон і повітровтягувальної добавки на поведінку бетону під навантаженням використано метод роботи руйнування.

Відомо, що крихкий характер руйнування бетону зростає зі зростанням його міцності на стиск [197, 315]. Досліджено бетони з підвищеною міцністю, отримані

шляхом оптимізації технологічних факторів на різних конструктивних рівнях [276].

Склади запроєктованих бетонів наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Склади бетонів ($B/C = 0,36$, марка бетонної суміші за осадкою конуса - S4).

Позначення сумішей	R0	R	R+F	R+F+A	R+Z+F+A
Ц (ПЦ II/A-III-500P-H), кг/м ³	450	450	450	450	405
Цеоліт, кг/м ³	-	-	-	-	45
П, кг/м ³	400	400	400	300	300
П _{0.63-2} , кг/м ³	-	100	100	100	100
Щ _{5,0-10} , кг/м ³	400	370	370	370	370
Щ _{10,0-20} , кг/м ³	1000	930	930	930	930
Суперпластифікатор, мас.%	0,8	0,8	1,5	1,2	1,5
Повітровтягувальна добавка, мас.%	-	-	-	0,4	0,4
Фібра з деформованою поверхнею, кг/м ³	-	-	8	8	8
Пряма фібра, кг/м ³	-	-	1,05	1,05	1,05
Об'єм втягнутого повітря, %	1,5	1,5	2,0	6,0	6,0

Міцність на стиск бетону на основі портландцементу з добавкою шлаку ПЦ II/A-III-500P-H показана на рис. 6.1. Як видно з отриманих результатів, оптимізація зернового складу бетону призводить до зниження міцності на стиск еталонного бетону R на 13,3 % через 1 добу тверднення порівняно з бетоном з позначенням R0. Більш інтенсивна кінетика набору міцності бетону R спостерігається при подальшому його твердненні і через 28 діб міцність бетону R збільшується на 23,6%. Після оптимізації вмісту різних типів волокон [368] в бетоні відповідне дозування було використано при приготуванні бетону з різними типами фібри R+F. Результати свідчать, що міцність такого бетону на стиск підвищується на 27% через 1 добу та незначно в подальші терміни тверднення порівняно з бетоном R.

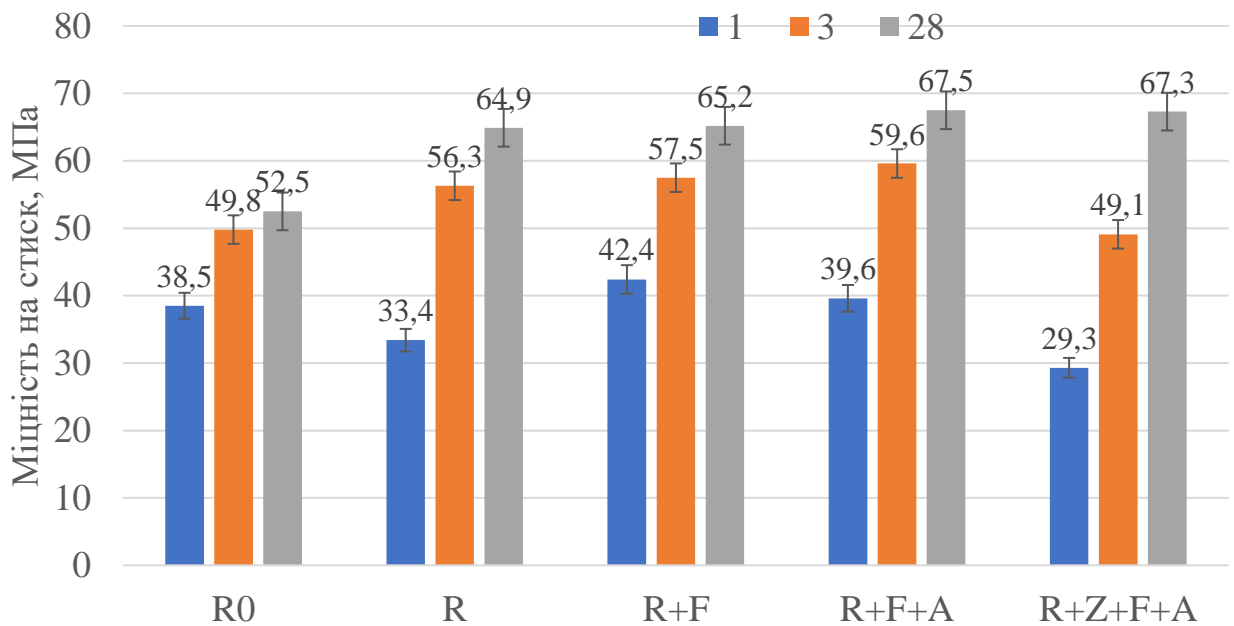


Рисунок 6.1 - Вплив різних технологічних факторів на міцність бетону на стиск

Smarzewski [329] стверджує, що поліпропіленові волокна не мають істотного впливу на міцність на стиск високофункціонального самоущільнюючого бетону через 28 діб тверднення, оскільки додані волокна негативно впливають на легкоукладальність бетонної суміші, і, як наслідок, в бетоні можуть утворюватися порожнечі, що зменшує імовірність збільшення міцності. Спостерігається деяке зростання міцності на стиск за рахунок уповільнення руйнування матриці, оскільки поліпропіленові волокна обмежують поширення тріщини. Broda [156] також показав, що незначний вплив на міцність при стиску спостерігається, коли в суміші використовуються волокна довжиною 5, 10 і 15 мм у кількості 0,25; 0,75 і 1%. Grabiec та ін. [226] досліджували також вплив різних дозувань (2 і 4%) поліпропіленових волокон довжиною 48 мм на міцність бетону на стиск і виявили позитивний ефект. Слід відзначити, що введення в бетон з різними типами фібри R+F+A повітровтягувальної добавки призводить до зниження ранньої міцності на 6,6 % і підвищення міцності через 3 і 28 діб на 3,7 і 3,5 % відповідно. Використання оптимальної кількості полідисперсного цеолітового туфу супроводжується незначним зниженням ранньої міцності бетону з добавкою полідисперсного

цеолітового туфу, пластифікуючою та повітровтягувальною добавками, різними типами фібри R+Z+F+A на 12,3 і 12,8% порівняно з еталонним бетоном R через 1 і 3 доби тверднення, відповідно, і на 3,7% підвищення міцності на стиск через 28 діб, що може свідчити про ефективність поєднання мінеральних добавок різної природи активності, пластифікуючої і повітровтягувальної добавок [276].

При дослідженні показників тріщиностійкості (рис. 6.2), поведінка бетонів, за винятком бетону R+Z+F+A, суттєво не відрізняється на стадії пружних деформацій, про що вказують висхідні гілки кривих навантаження-переміщення.

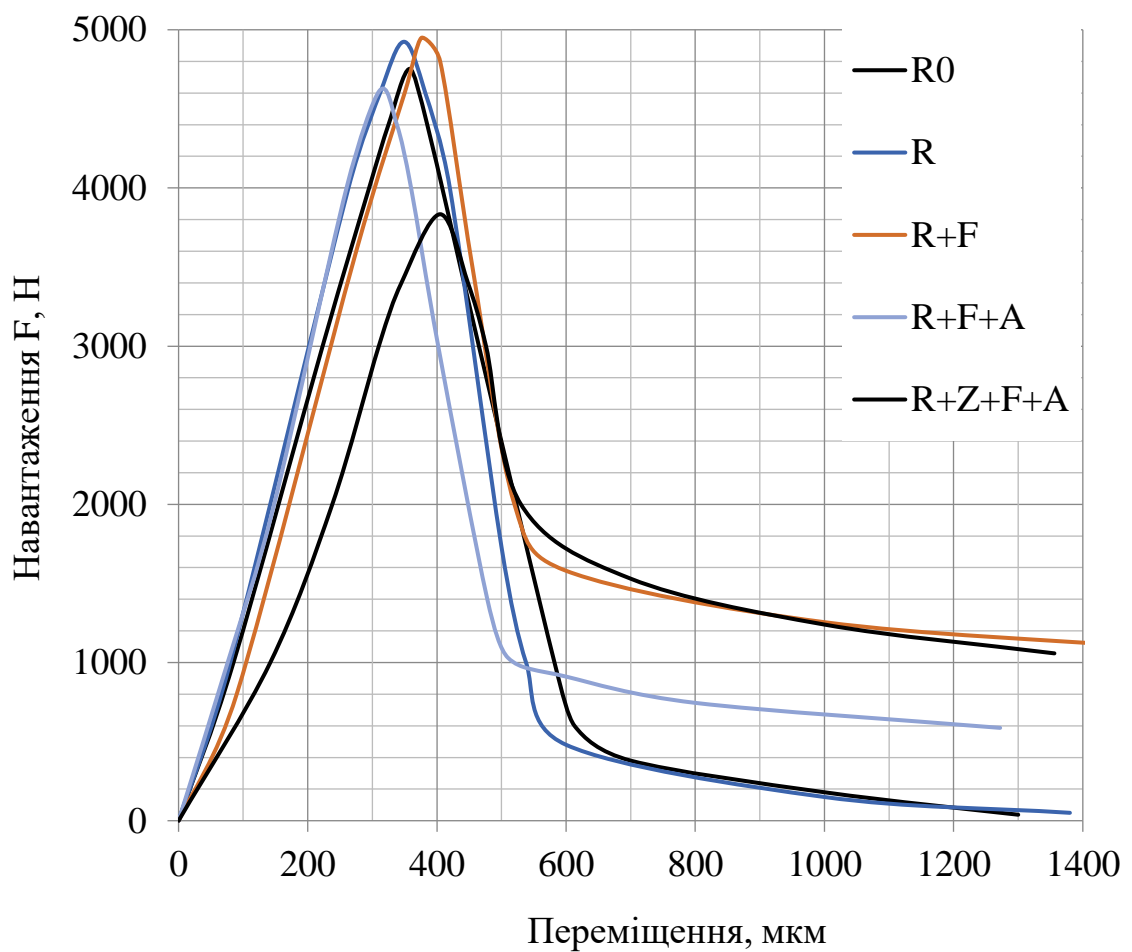


Рисунок 6.2 - Повні діаграми стану бетонів

Більш нахилена висхідна гілка кривої навантаження-переміщення на докритичній стадії демонструє підвищення в'язкості руйнування бетону R+Z+F+A. Результати також свідчать, що бетон R+Z+F+A має подібну поведінку і на

закритичній стадії деформування під навантаженням. Для інших бетонів помітна суттєва різниця на етапі після появи тріщини. Спадна частина кривої навантаження-переміщення досить крута для всіх серій бетону. Низхідна гілка коротка для бетонів R і R0. Використання оптимальної кількості обох фібр істотно збільшує об'єм під спадною гілкою бетону з різними типами фібри R+F. Це свідчить про те, що його тріщиностійкість підвищується порівняно з R0, незважаючи на вищий клас міцності на стиск. Rao and Prasad [315] встановили, що низхідна гілка буде довшою у випадку звичайних бетонів і коротшою у високоміцних. Додавання повітровтягувальної добавки до бетону, армованого полідисперсною фіброю, призводить до зменшення площі під кривою навантаження-переміщення і, як наслідок, зниження тріщиностійкості, яка перевищує тріщиностійкість контрольних бетонів R і R0. Після часткової заміни портландцементу в бетоні з пластифікуючою та повітровтягувальною добавками і різними типами фібри R+F+A на цеолітовий туф (10 мас.%) поведінка такого бетону під навантаженням подібна до бетону R+F. Однак цей бетон має кращу стійкість до циклів поперемінного заморожування та відтаювання і, як наслідок, підвищену довговічність, що відповідає стратегії сталого розвитку в будівництві.

Площа під повною діаграмою стану (рис. 6.2) представляє загальну енергію руйнування G_F . На рис. 6.3 показані питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування бетонів. Отримані результати свідчать про те, що відмінність в енергії руйнування бетону R0 і R незначна. Найбільше значення має енергія руйнування бетону, що містить різні типи волокон, і досягає 441,49 Дж/м². Додавання повітровтягувальних добавок призводить до зниження енергії руйнування на 32,9%. Енергія руйнування бетону R+Z+F+A збільшується на 35,1 % порівняно з еталонним бетоном R. Дослідження свідчать, що зміна технологічних факторів та параметрів проектування дає змогу одержувати бетони з регульованими і прогнозованими параметрами тріщиностійкості та експлуатаційних властивостей.

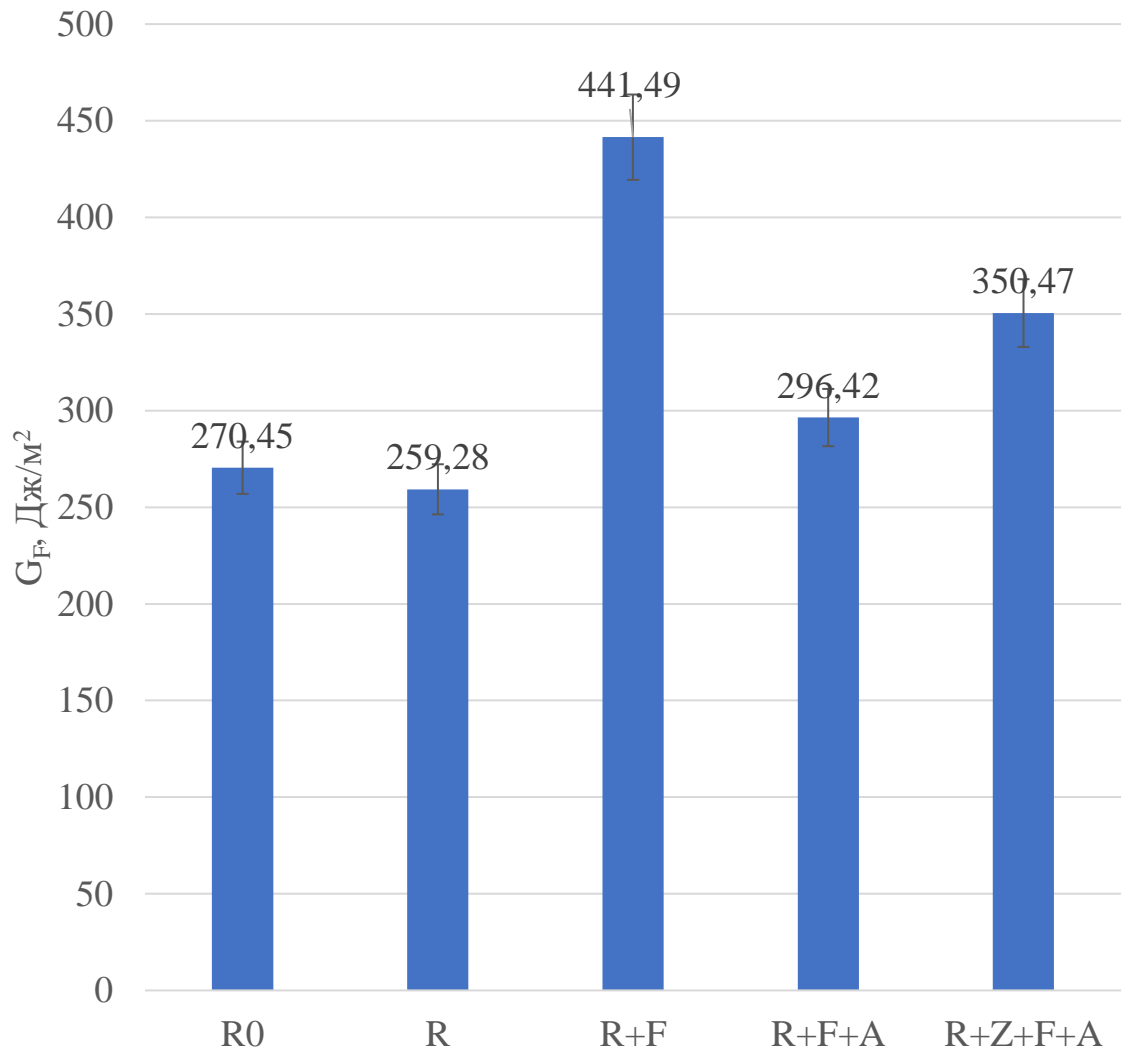


Рисунок 6.3 - Питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування

Подібну тенденцію можна спостерігати і для критерію крихкості досліджуваних бетонів. На рис. 6.4 показано, що при введенні до бетонної суміші поліпропіленових волокон, критерій крихкості бетону R+F збільшується на 55,0% порівняно з бетоном R. Втягнуті бульбашки повітря в серії R+F+A є дефектами цементної матриці, що підвищує крихку поведінку бетону. Це призводить до деякого зменшення на 16,6% критерія крихкості для такого композиту. Проте комплексне поєднання цеолітового туфу і повітровтягувальної добавки в бетоні, що містить різні типи волокон R+Z+F+A, покращує тріщиностійкість і характеристична довжина (критерій крихкості) становить 176 мм і є найбільшою серед випробуваних бетонів.

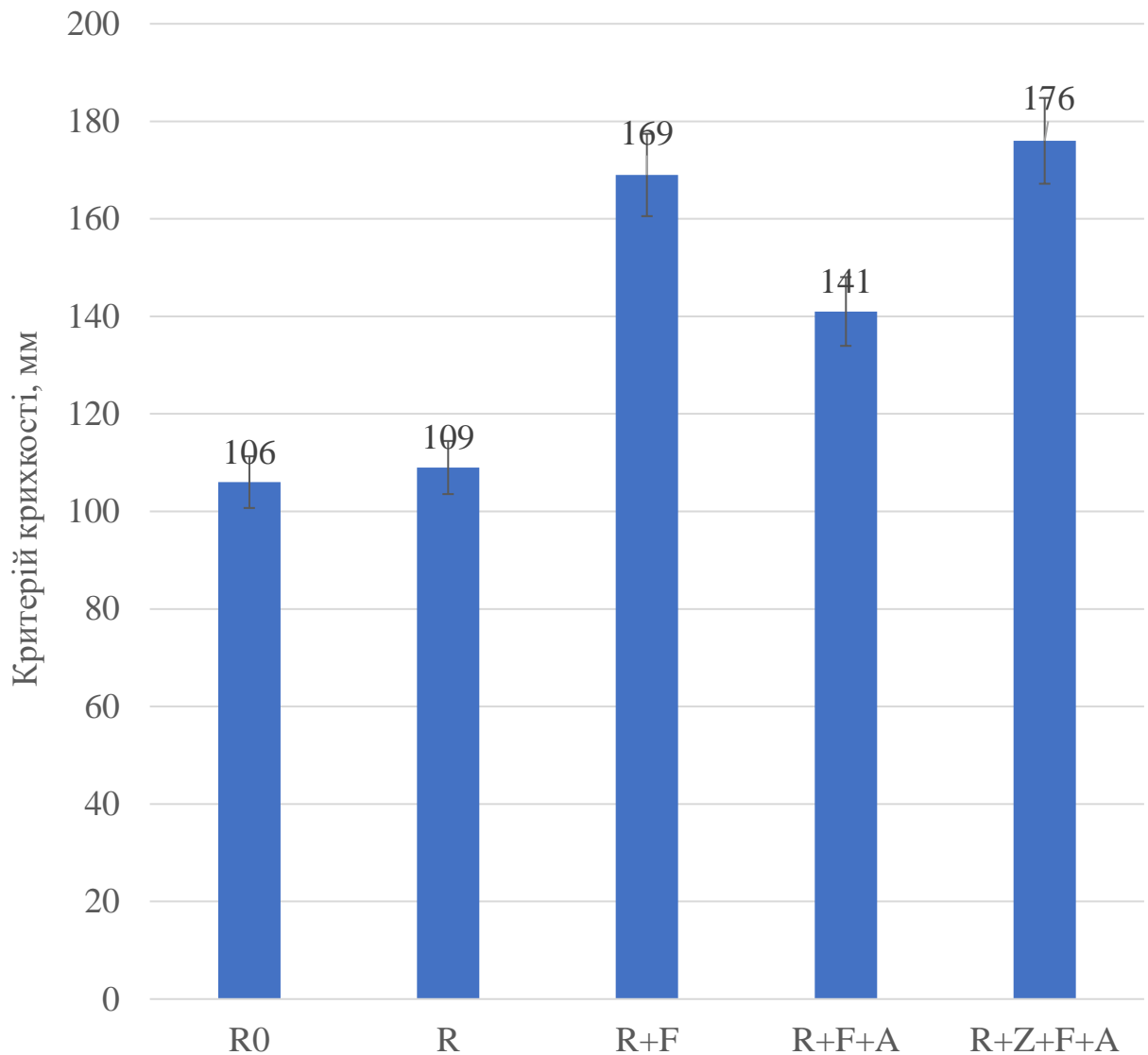


Рисунок 6.4 - Критерій крихкості

Експлуатаційні властивості розробленого бетону R+Z+F+A наведені в табл. 6.2. Як видно з результатів досліджень, бетон характеризується низьким водопоглинанням та стираністю, а також покращеними показниками довговічності, а саме підвищеною маркою за морозостійкістю та водонепроникністю.

Таблиця 6.2 - Експлуатаційні властивості бетону з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, одержаного керуванням структуроутворенням на різних рівнях

Показники	Одиниці вимірювання	Значення показника бетону
Марка за морозостійкістю		F300
Марка за водонепроникністю		W16
Водопоглинання, W_m	%	1,5
Стираність	г/см ²	0,20

Покращені властивості розроблених бетонів зумовлені також вдосконаленням його структури на мікро- та мезорівнях, внаслідок використання пуцоланових матеріалів різної природи активності в поєднанні з поверхнево-активними речовинами, що вимагає більш поглибленого вивчення їх структуроутворення.

6.2. Мікроструктура бетонів з підвищеною тріщиностійкістю

Використання природних і штучних мінеральних компонентів як пуцоланових добавок в бетоні замість найбільш дорогого і енергоємного портландцементу показали значну ефективність. Це не тільки дає змогу зменшити споживання енергії та викиди вуглекислого газу в промисловості будівельних матеріалів, але й можливо покращити їх властивості. Тому проведено дослідження структуроутворення цементної матриці бетону з пуцолановими матеріалами різної

природи активності, а саме цеолітового туфу та гранульованого доменного шлаку [355].

З використанням портландцементного клінкеру, доменного гранульованого шлаку та цеолітового туфу Сокирницького родовища Закарпатської області України виготовлено різні види в'язучих матеріалів. Склади в'язучих представлені в табл. 6.3. Тонина помелу одержаних в'язучих характеризується залишком на ситі № 008, який знаходиться в межах 1-4 мас. %.

Слід відзначити, що в'язучі системи на основі портландцементу є основними в різних будівельних матеріалах. Тому їх характеристики, особливо при експлуатації, суттєво залежать від властивостей цих в'язучих, таких як водовідділення, водопотреба, час тужавіння, об'ємне розширення та міцність на стиск. Відзначається, що водовідділення може мати численні негативні наслідки. Це може спричинити погане зчеплення між шарами залитого бетону та ускладнити перекачування суміші. Як показано на рис. 6.5, водовідділення в'язучих, які відповідають портландцементом СЕМ II/A-S і СЕМ II/B-S на 7 і 15% відповідно вище, ніж в'язучого без мінеральних добавок, яке можна віднести до СЕМ I. Композиційне в'язуче, що відповідає портландцементу СЕМ II/B-M, яке містить 10 мас. % цеоліту, характеризується нижчим водовідділенням, що приблизно відповідає СЕМ I.

Таблиця 6.3 - Склади в'язучих

Типи в'язучих	Вміст компонентів*, мас. %		
	Клінкер	Гранульований доменний шлак	Цеолітовий туф
СЕМ I	100	-	-
СЕМ II/A-S	80	20	-
СЕМ II/B-S	70	30	-
СЕМ II/B-M	70	20	10

* - 5 мас. % гіпсового каменю

На рис. 6.6 видно, що водопотреба в'яжучих, що містять 20 (СЕМ II/A-S) і 30 мас.% (СЕМ II/B-S) гранульованого доменного шлаку, становить 29 % і на 3 % нижче порівняно з бездобавочним в'яжучим СЕМ I. Введення цеолітового туфу призводить до збільшення водопотреби майже на 7% через взаємозв'язані мікропори різного розміру, які утворилися в тривимірному структурному скелеті.

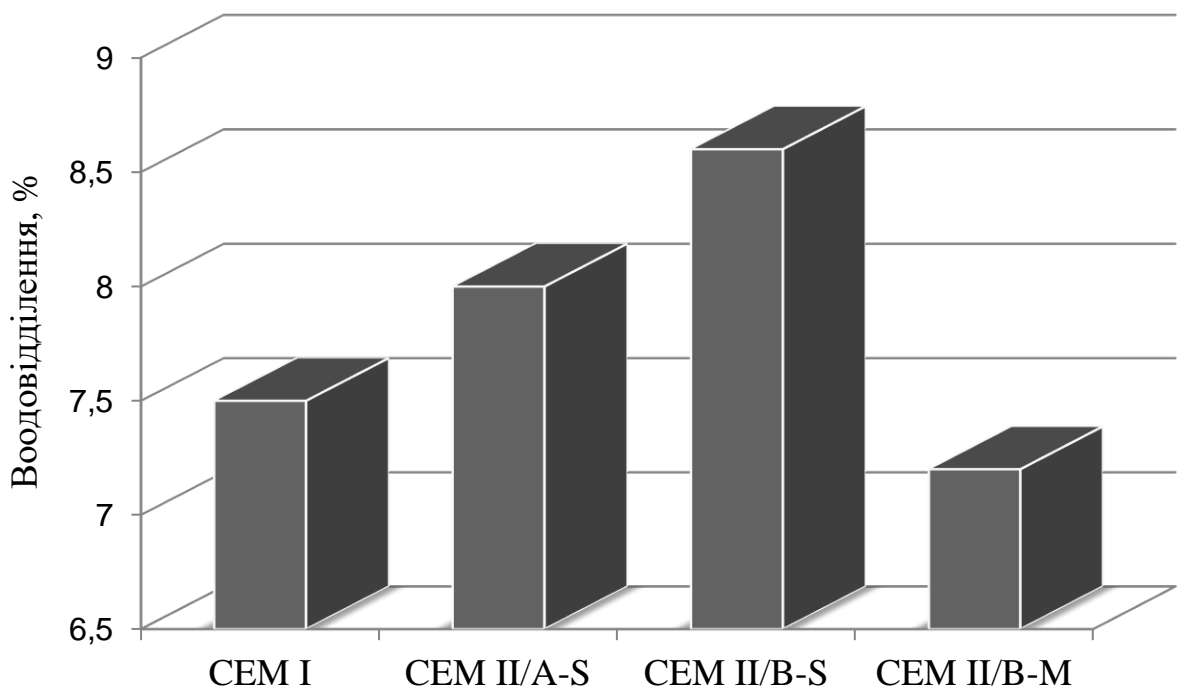


Рисунок 6.5 - Водовідділення в'яжучих

Надмірна кількість вільних MgO та CaO у в'яжучих може призводити до розширення цементної маси, розтріскування та її пошкодження. Тому проведено випробування рівномірності зміни об'єму методом Ле-Шательє.

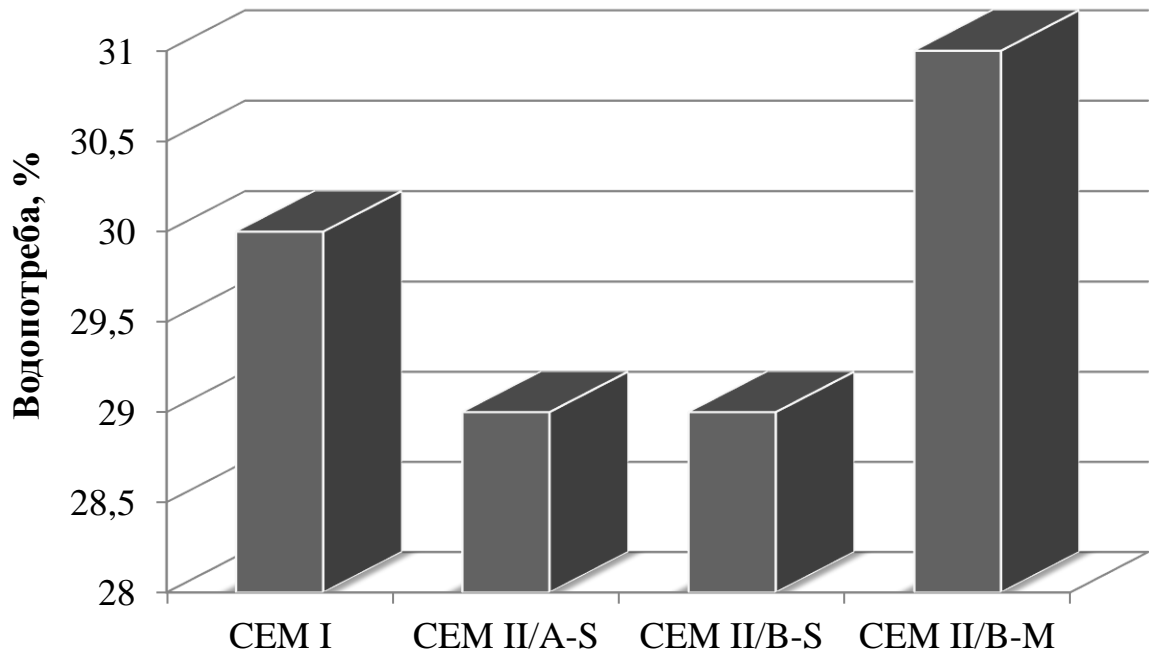


Рисунок 6.6 - Водопотреба в'яжучих

Об'ємне розширення в'яжучих систем з пуцолановими матеріалами було меншим, ніж у звичайного портландцементу (0,9 мм) через менший вміст вільного СаО та MgO. Результати показали, що значення об'ємного розширення змінювалися між 0,5 і 0,9 мм. Тобто, всі значення були менші 10 мм, що відповідає європейським нормам.

Терміни тужавіння портландцементів з гранульованим доменним шлаком сповільнені порівняно з СЕМ I через меншу кількість клінкеру (рис. 6.7). Композиційне в'яжуче (СЕМ II/B-M), що містить цеолітовий туф, характеризується коротшим початком і кінцем тужавіння порівняно з в'яжучими з гранульованими доменними шлаками через швидке зниження пластичності тіста, спричинене безперервним поглинанням води частинками цеолітового туфу після приготування цементного тіста нормальної консистенції.

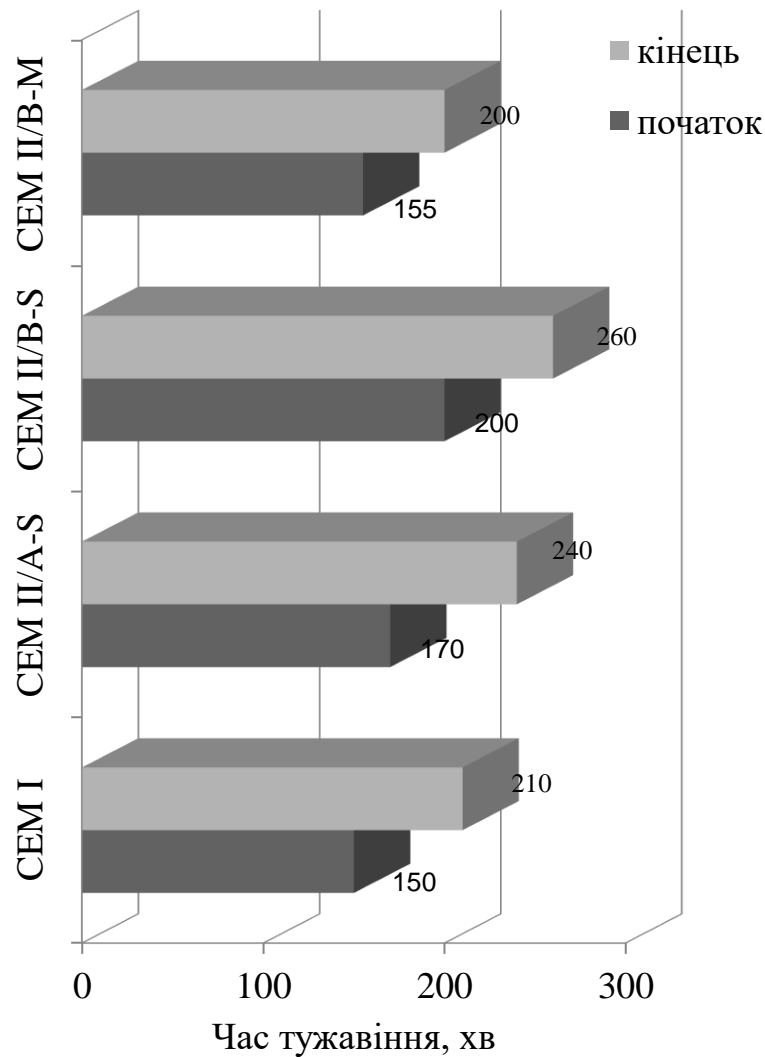


Рисунок 6.7 - Терміни тужавіння в'язучих

Середня міцність на стиск в'язучих у віці 2, 7, 28 та 56 діб представлена на рис. 6.8. Як видно з отриманих результатів, міцність на стиск портландцементів SEM II/A-S, SEM II/B-S, SEM II/B-S і SEM II/B-M, що містять пуцоланові матеріали, на 10-20% нижче, ніж SEM I. Слід відзначити, що композиційне в'язуче характеризується найбільшим зниженням міцності на стиск в ранньому віці. Однак через 28 діб міцність на стиск SEM II/A-S, SEM II/B-S і SEM II/B-M зменшується майже на 3, 4 і 5% відповідно порівняно з SEM I. Встановлено, що незалежно від ступеня заміни клінкеру мінеральними добавками, портландцементи з гранульованим доменним шлаком SEM II/A-S, SEM II/B-S мають приблизно

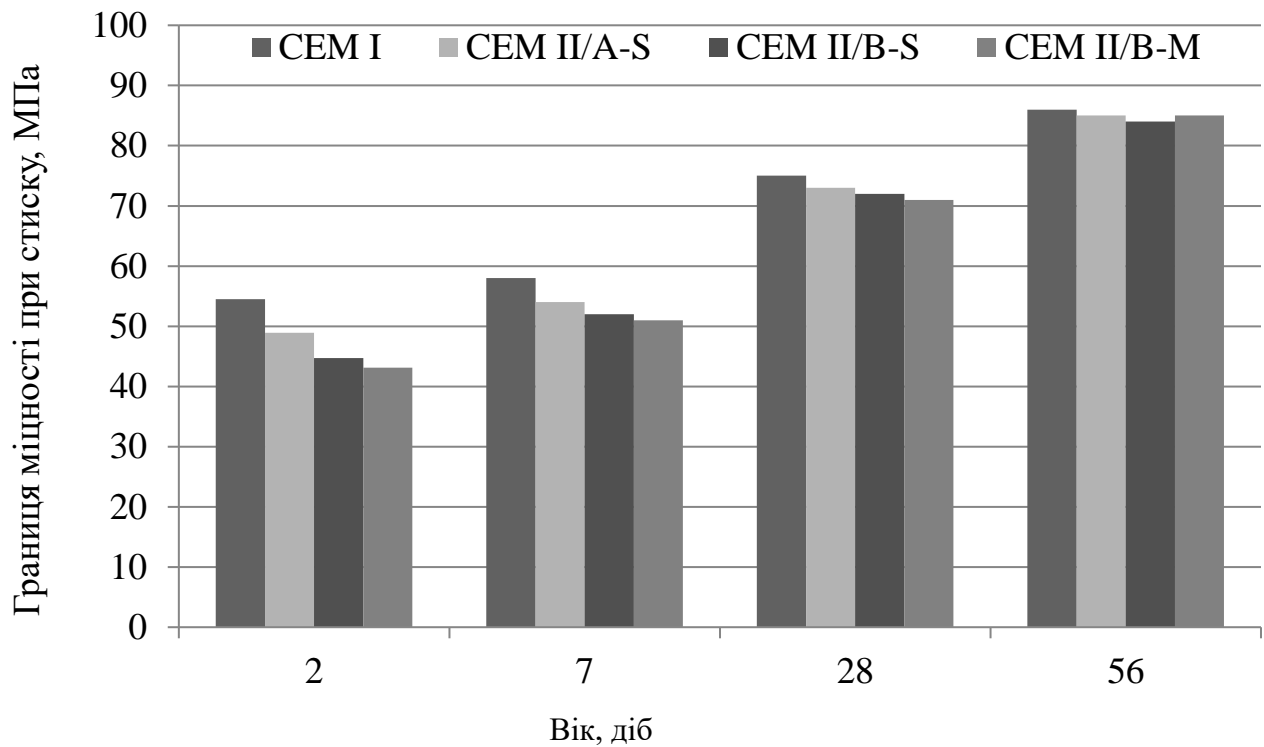


Рисунок 6.8 - Границя міцності при стиску в'язучих

однакові з контрольним в'язучим СЕМ I показники міцності на стиск через 56 діб твердіння, але міцність на стиск композиційного портландцементу СЕМ II/B-M навіть трохи перевищує міцність СЕМ I. Відповідно до отриманих даних, збільшення міцності композиційного портландцементу пов'язане в основному з пуцолановою реакцією. Оскільки цеолітовий туф має високу пуцоланову активність, він легко реагує з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ під час гідратації в'язучого та перетворюється на сполуки, що володіють цементуючими властивостями [78].

Методами фізико-хімічного аналізу досліджено особливості гідратації цеоліт- та шлаковмісних портландцементів. Процеси гідратації таких в'язучих більш складні порівняно з твердненням портландцементів без мінеральних добавок, оскільки в реакціях беруть участь матеріали різної природи активності.

Аналіз мікроструктури цементного каменю свідчить про інтенсивне протікання процесів гідратації, що в початковий період підтверджується великою кількістю дрібних голчастих або лускоподібних кристалів (рис. 6.9). У складі

гідратних утворень спостерігаються гідросилікати та гідросульфоалюмінати кальцію.

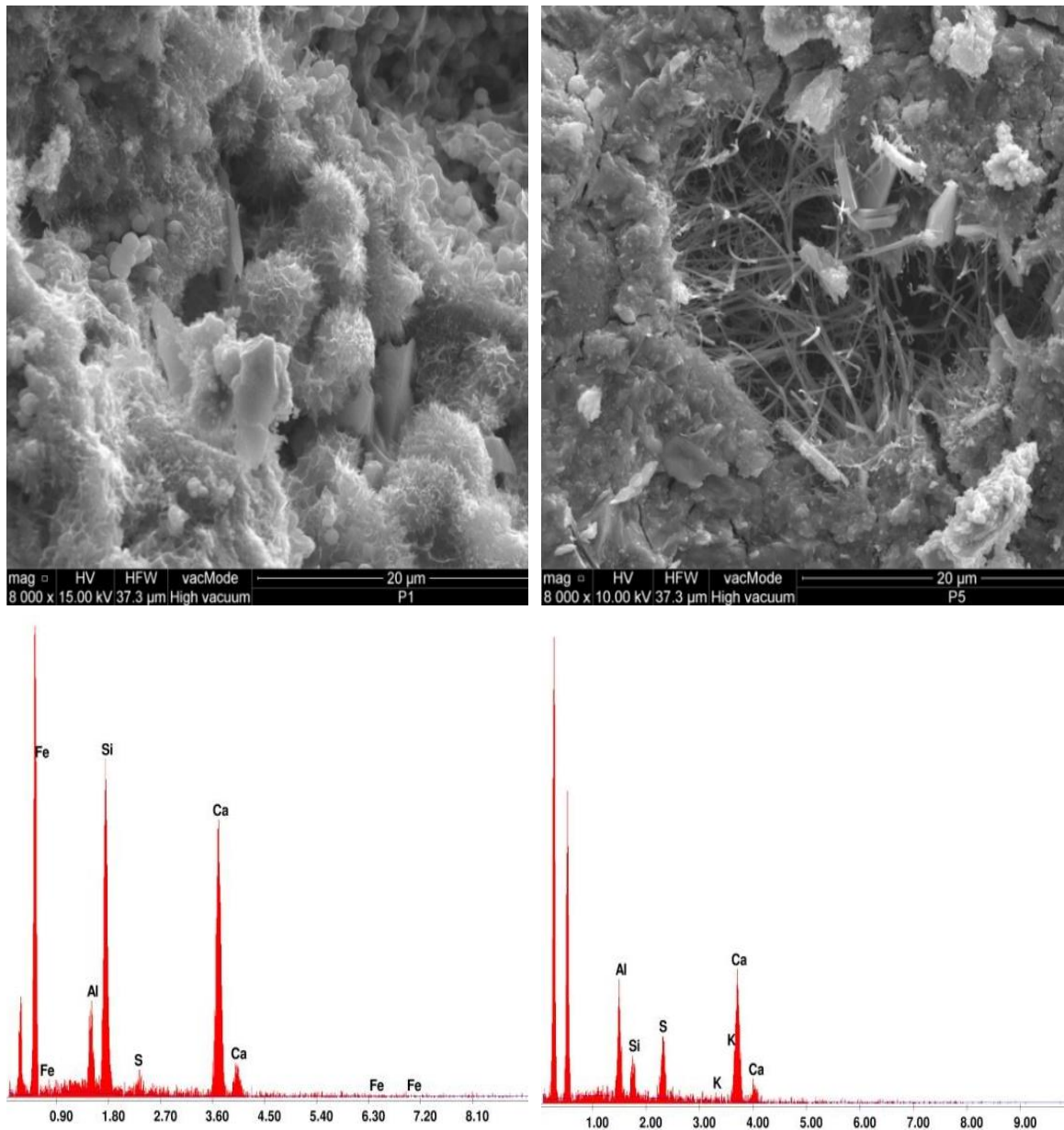
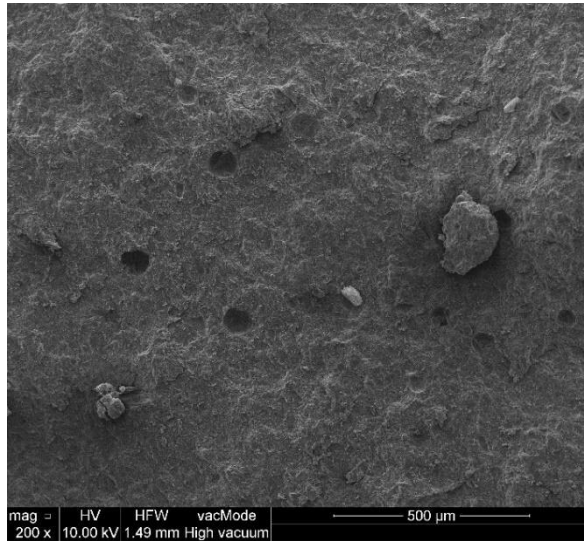


Рисунок 6.9 - Мікроструктура та мікрозондовий рентгеноспектральний аналіз композиційного в'язучого через 28 днів тверднення

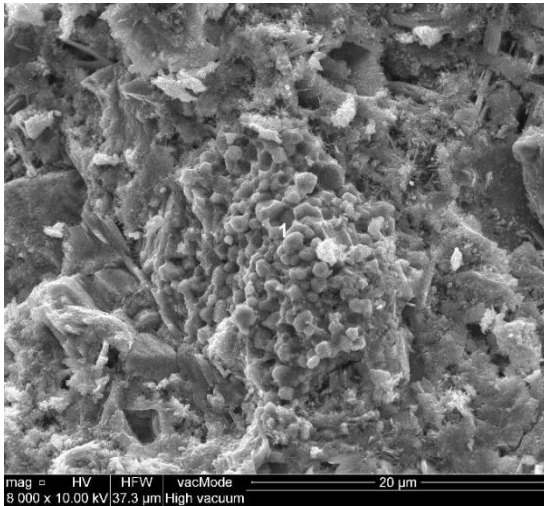
У цих портландцементях щільно упаковані гексагональні пластини кальцію гідроксиду майже не спостерігаються. Введення до складу тверднучої цементної системи шлаку і цеолітового туфу дозволяє не тільки покращити технологічні та технічні характеристики, а й змінити кінетику його структуроутворення.

Цеолітовий туф виступає не тільки пуцолановим компонентом, але й кристалоутворюючим активатором тверднення іншої мінеральної добавки - шлаку. Під час гідролізу та іонного обміну цеоліту в рідку фазу виділяються іони Na^+ , K^+ і OH^- . Це створює своєрідний імпульс у системі тверднення таких в'язучих, який порушує термодинамічно нестабільний стан шлакового скла з утворенням гідросилікатів та гідроалюмосилікатів кальцію. Крім того, цеолітовий туф є джерелом активного Al_2O_3 , що призводить до утворення додаткової кількості подовжених голчастих кристалів, які за даними мікрозондового аналізу можна віднести до гідросульфоалюмінату кальцію. Відбувається змішана сульфатно-лужна активація шлаку. Це призводить до утворення додаткової кількості гідратних фаз, які також забезпечують самоармування та зміцнення тверднучої цементної матриці бетонів [330].

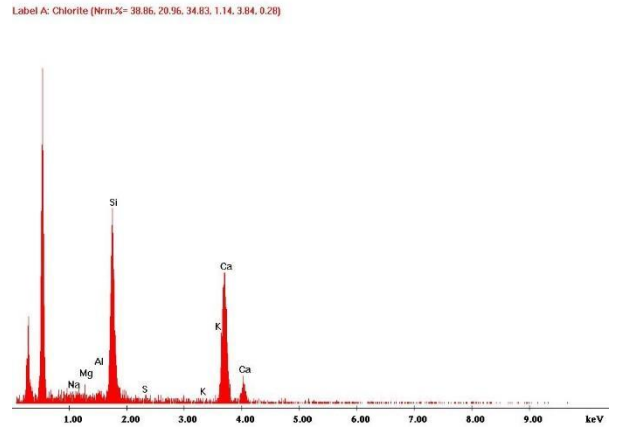
При введенні пластифікуючої та повітровтягувальної добавки такий бетон має структуру з рівномірно розподіленою дисперсною системою повітряних бульбашок (рис. 6.10, а), а мікроструктура характеризується підвищеною однорідністю (рис. 6.10, б) внаслідок модифікування та утворення щільних субмікроскопічних кластерів гідросилікатів і гідросульфоалюмінатів кальцію (рис. 6.10, в). Використання повітровтягувальних добавок, які в більшості випадків складається з амфіфільних молекул, що викликає адсорбцію дрібних частинок цементу на межі повітря/тісто призводить до утворення бульбашок повітря з оболонкою, сформованою цими частинками (рис. 6.10, г). Склад оболонки залежить від типу цементу і використовуваних мінеральних добавок. Як видно з рис. 6.10, д, завдяки використанню портландцементу з добавкою шлаку та цеолітового туфу гідросилікати кальцію в неклінкерній частині цементної матриці бетону утворюють щільну та міцну оболонку бульбашок повітря.



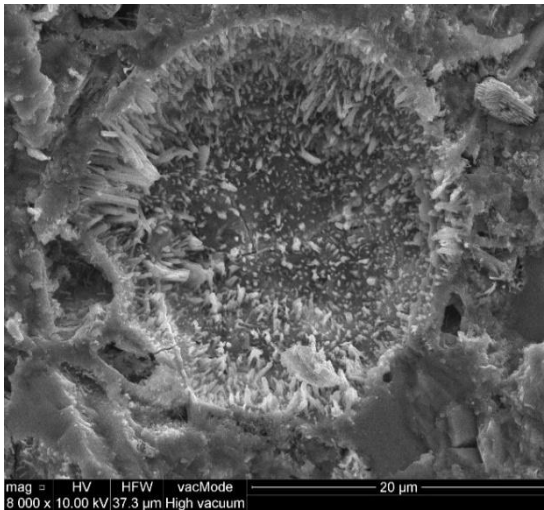
а



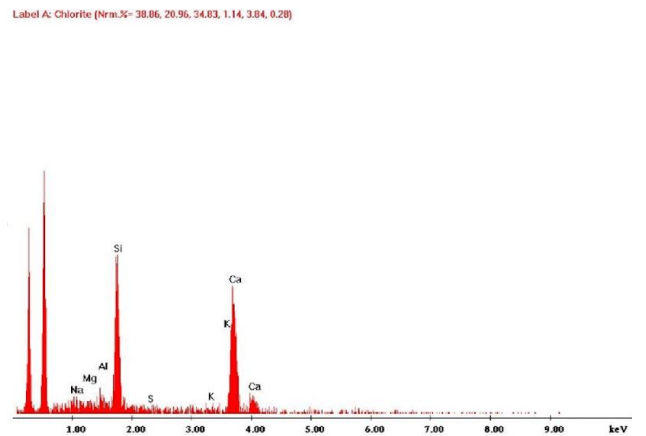
б



в



г



д

Рисунок 6.10 – Мікроструктура (а, б, г) і спектри рентгенівського випромінювання (в, д) цементної матриці бетону

Tunstall та ін. [367] підтверджують утворення оболонки і вказують на те, що оболонка бульбашок повітря покращує міцність і їх стабільність, зменшуючи коалесценцію. Слід відзначити, що коли навантаження прикладається до фіброармованого бетону з повітровтягувальною добавкою та цеолітовим туфом з впорядкованою поровою структурою з рівномірно розподіленими з армованою оболонкою бульбашками повітря на мезорівні відбувається дисипація енергії мікротріщиноутворення. Це призводить до підвищення міцнісних показників та тріщиностійкості такого бетону.

6.3. Промислово-дослідне впровадження та апробація бетонів з підвищеною тріщиностійкістю

Довговічність бетонних будівель та інфраструктури повинна розглядатися як з точки зору їх користі для суспільства, так і впливу на навколишнє середовище, пов'язаного з використанням бетону в будівництві. Слід відзначити, що бетон широко використовується завдяки його низькій вартості, простоті використання, накопиченому досвіду, універсальності, доступності компонентів та довговічності, яка для будівельних матеріалів є важливою і бетон часто вважається за своєю суттю довговічним матеріалом завдяки хімічній і фізичній стійкості при правильному проектуванні. Бетонні конструкції в основному не вимагають технічного обслуговування та забезпечують тривалий термін служби. В багатьох країнах визнається, що ніхто не може гарантувати довговічність цементного бетону в будь-яких умовах і серед найбільш поширених причин зниження довговічності - руйнування матеріалу. Підвищення довговічності бетону досягається шляхом зміни структури на різних рівнях як фізично, так і хімічно.

Будівлі, як правило, розраховані на термін експлуатації 50 років за умови мінімального обслуговування, яке може знадобитися для бетонних елементів. Бетонні мости мають більші вимоги до терміну служби, як правило, 100 років або більше. Однак багато будівель, в тому числі й інфраструктурні об'єкти зокрема, не досягають такого віку і тоді для їх обслуговування та ремонту необхідні додаткові ресурси.

Бетонні мости зазвичай розраховані з використанням моделей прогнозування довговічності на 100 років експлуатації. Прикладом проекту з таким терміном експлуатації є новий міст Тауранга в Новій Зеландії. Тоді як віадук Тінслі в Англії необхідне посилення через підвищені осьові навантаження, а прогнозовані витрати на затори під час закриття на реконструкцію були оцінені майже в п'ять разів вище, ніж будівництво нового мосту. Велику частину існуючої світової інфраструктури просто не можна вивести з експлуатації або замінити і показники довговічності стають критично важливою складовою сталого розвитку [255].

Експлуатаційна надійність та довговічність розроблених бетонів з підвищеною міцністю пов'язана з покращеною тріщиностійкістю при експлуатації. Важливою технологічною задачею при отриманні бетонів з необхідною тріщиностійкістю є забезпечення безперервного армування на мікро-, мезо- та макроструктурних рівнях бетонів за рахунок раціонального підбору мінеральних добавок різної природи активності з позитивним основним і додатковим ефектами, рівномірного об'ємного розподілення бульбашок втягнутого повітря для забезпечення необхідного чинника відстані (просторового фактору) та використання полідисперсних армуючих волокон. При виготовленні бетонних сумішей дозування всіх компонентів здійснювалося за масою. Хімічні добавки вводили з водою замішування.

На ТзОВ «Угринів Еко Ферм» в період жовтень-листопад 2022 р. проведено бетонування ванни тваринницького комплексу з використанням бетонів з підвищеною міцністю В30 (С25/30), корозійною стійкістю та тріщиностійкістю, одержаних оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях, в

кількості 200 м³ (Додаток Б). Бетони розроблено за алгоритмом багатопараметричного проектування з врахуванням оптимізації технологічних факторів на різних структурних рівнях і виготовлено на ПП “Застава” (рис. 6.11). Використання сучасних підходів при проектуванні складів дисперсноармованих бетонів з підвищеною міцністю, а саме використання мінеральних добавок з необхідними основним і додатковим ефектами та хімічних добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії дає змогу підвищити корозійну та тріщиностійкість бетонів як в докритичній, так і на закритичній стадіях, а також довговічність.



Рисунок 6.11 - Виготовлення розроблених бетонів (умовне позначення бетонної суміші БСГ В40Р4F200W10) з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю на ПП „Застава”

В період серпня-вересня 2023 р. при будівництві площадки на ПП «Застава» (рис. 6.12) для складування бетонних виробів використано бетон з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю на основі БСГ В40Р4F200W10 в кількості 30 м³ (Додаток В).

Для виготовлення бетону використовували портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-

500P-N ПрАТ «Івано-Франківськцемент», полідисперсний цеолітовий туф, кварцовий пісок ($M_k=1,8$) Жовківського родовища, гранітний щебінь фракції 5-20 мм. Для забезпечення проектної марки за легкоукладальністю бетонної суміші (марка за легкоукладальністю за показником рухомості P4 (OK=16-20 см)) та морозостійкості затверділого бетону (F200) використовували пластифікатор ТзОВ «Сіка Україна» MG 45, повітровтягувальну добавку Sika Mix Plus та поліпропіленову фібру для підвищення тріщиностійкості.

Бетонна суміш, яка поступала на будівельний майданчик мала марку за легкоукладальністю за показником рухомості P4 (OK=17-19 см), об'єм втягнутого повітря коливався в межах 5-6%, розшаровуваність бетонної суміші задовольняла вимоги ДСТУ Б В.2.7-96-2000 (водовідділення відсутнє, розчиновідділення важкого бетону $Pr=0,5\%$). Міцність при стиску через 28 діб тверднення в нормальних умовах становила 52,6 МПа.



Рисунок 6.12 – Площадка для складування бетонних виробів

За отриманими результатами одержаний важкий бетон характеризується класом за міцністю на стиск В40, марками за морозостійкістю F200 та водонепроникністю W10. Досліджені характеристики тріщиностійкості показали, що оптимізація технологічних факторів на різних структурних рівнях дозволяє одержати бетони з підвищеною тріщиностійкістю (питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування $G_F=373$ Н/м, критерій крихкості $\chi^c_F=185$ мм) та експлуатаційними властивостями.

При будівництві у вересні 2023 р. під'їзної дороги до складських приміщень у с. Малехів Львівської ОТГ використано бетон з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю БСГ С32/40 S4 F200 W10 в кількості 82 м³, виготовлений на ПП «Захід-Бетон-Буд» (Додаток Г). Для одержання бетону використовували портландцемент ПЦ П/А-Ш-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент», полідисперсний цеолітовий туф, кварцовий пісок ($M_k=1,6$) Розвадівського родовища, щебінь фракцій 5-10 та 10-20 мм виробництва ТОВ «Технобуд». Для забезпечення підвищеної рухливості і проектної марки за морозостійкістю використовували суперпластифікатор ТзОВ «Сіка Україна» SikaPlast 3050 R Plus і повітровтягувальну добавку Sika Mix Plus та поліпропіленову фібру різних типів (пряма і з деформованою поверхнею) для підвищення тріщиностійкості. На будівельному майданчику осадка конуса становила 180-200 мм. Не спостерігалось розшарування бетонних сумішей, а границя міцності при стиску затверділого бетону, що тверднув в нормальних умовах, становила 50,9 МПа. Результати досліджень свідчать, що оптимізація технологічних факторів на різних структурних рівнях дає змогу одержати бетони з підвищеними експлуатаційними властивостями та тріщиностійкістю ($G_F=350$ Н/м, $\chi^c_F=176$ мм).

Використано також розроблені суміші (БСГ В35Р4F200W6) на підприємстві «Дрог-Буд» Сп. з о.о. при будівництві мостового переходу в с. Корчів (рис. 6.13) в період червень-серпень 2023 р. в кількості 116 м³ (Додаток Д).



Рисунок 6.13 - Мостовий перехід в с. Корчів

Випробування бетону номінального складу Ц:П:Щ=1:1,36:2,67 при витраті цементу 450 кг свідчать, що комплексне поєднання раціонально підібраних органічно-мінеральних добавок з підвищеною ефективністю дозволяє одержувати бетонні суміші проектної марки за легкоукладальністю P4 і з нормованим розшаруванням за показниками водо- та розчиновідділення, а затверділий бетон характеризується швидким наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28} \geq 0,5$) та підвищеною тріщиностійкістю. За показниками міцності у проектному віці розроблений бетон відповідає класу B35 (C30/35).

Також розроблені бетонні суміші (БСГ В30P4F200W6 та БСГ В30P3F200W6) марок за легкоукладальністю P3 і P4 та бетони на їх основі і впроваджено на ТОВ «Автомагістраль-Південь» при бетонуванні у період листопад 2023 р. - січень 2024 р. монолітних стійок опор, ростверків, підферменників, ригелів, буронабивних паль при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 (рис. 6.17) в кількості 580 м³ (Додаток Е).

При проведенні бетонування, яке відбувалося в діапазоні температур (-10...+3 °С), не спостерігалось розшарування бетонної суміші. Для забезпечення проектної марки за морозостійкістю та підвищеної тріщиностійкості об'єм втягнутого повітря коливався в межах 4-6%. Результати випробувань (табл. 6.4) бетонів (марка за легкоукладальністю P3) свідчать, що середня міцність при стиску через 2 доби в нормальних умовах тверднення становить 25,1 МПа, а через 28 діб тверднення – 44,0 МПа.

Таблиця 6.4 - Результати випробувань бетону з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю

Найменування показника		Значення показника		
Марка за легкоукладальністю			P3	P4
Середня густина, кг/м ³			2360	2355
Об'єм втягнутого повітря, %			6	6
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	нормальні умови	2	25,1	23,3
		7	32,0	31,5
		28	44,0	44,1
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	температура -10...+3°C	2	7,8	7,3
		7	23,8	23,7
		28	34,4	38,6
Показник питомої міцності (наростання міцності)	нормальні умови		0,55 (швидке)	0,53 (швидке)

Забезпечена проектна марка за водонепроникністю W6 (рис. 6.14).



Рисунок 6.14 – Випробування бетону на водонепроникність

Згідно отриманих результатів, марка запроектованого бетону за морозостійкістю становить F200 (рис. 6.15).

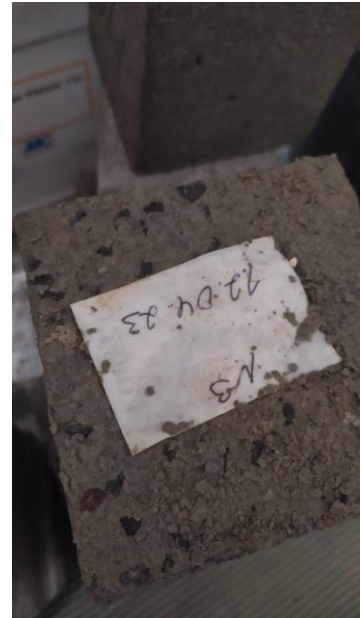


Рисунок 6.15 – Випробування бетону на морозостійкість

При випробуванні бетонів (марка за легкоукладальністю бетонної суміші P4) середня границя міцності при стиску через 2 та 28 діб відповідно становить 23,3 та 44,1 МПа. За міцністю через 28 діб тверднення в нормальних умовах бетони досягають класу B30 (C25/30). За показником питомої міцності запроектовані склади відносяться до бетонів з швидким наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28} \geq 0,5$). При знакозмінних температурах спостерігається закономірне зниження міцності у всі терміни тверднення.

Проведено також випуск самоущільнювальних бетонів, одержаних оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях, класу за міцністю на стиск B30 (C25/30), марки за морозостійкістю F200 та водонепроникністю W6 в грудні 2023 р. (Додаток Ж). Клас за розпливом конуса розробленої бетонної суміші - SF1 (рис. 6.16, а), а об'єм втягнутого повітря для забезпечення проектної марки за морозостійкістю та підвищеної тріщиностійкості становив 5% (рис. 6.16, б).



а



б

Рисунок 6.16 – Розплив конуса розробленої бетонної суміші (а)
та об'єм втягнутого повітря (б)

Такі бетонні суміші впровадженні на ТОВ «Автомагістраль-Південь» і використовувалися для бетонування монолітних складних за формою для вкладання бетонних сумішей стійок опор, в яких була утруднена можливість ущільнювати бетон способом вібрування із застосуванням глибинних вібраторів, при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 (рис. 6.17). Загальний об'єм виготовленого самоущільнювального бетону становив 4 м³.

Для виготовлення бетонних сумішей застосовували портландцемент ПЦ II/A-III-500P-N ПрАТ «Івано-Франківськцемент» з мінеральними добавками, повітровтягувальну та сильнопластифікуючу добавки з протиморозним ефектом. Як дрібний заповнювач використано кварцовий пісок Жовківського родовища ($M_{кр}=1,9$), а як крупний - гранітний щебінь фракції 5-10 мм.



Рис. 6.17 - Мостовий перехід через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693

Бетонування і тверднення таких бетонів також відбувалося в умовах знакозмінних температур в діапазоні $-10...+3^{\circ}\text{C}$. При проведенні бетонних робіт високопластичні суміші (розплив конуса становив 550-620 мм) зберігали однорідність і не спостерігалось розшарування. За таких температурних умов була досягнута необхідна мінімальна критична рання міцність (табл. 6.5). Середня міцність при стиску через 2 доби тверднення в нормальних умовах становила 13,8 МПа, а через 28 діб тверднення – 40,5 МПа (клас бетону за міцністю на стиск В30). За показником питомої міцності дані бетони відносяться до бетонів з середнім наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,35$).

Таблиця 6.5 - Результати випробувань самоущільнюльваного бетону з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю

Найменування показника	Значення показника	
Діаметр розпливу конуса, мм	550-620	
Середня густина, кг/м ³	2220-2250	
Міцність бетону на стиск в нормальних умовах тверднення, МПа, у віці, діб	2	13,8
	7	32,1
	28	40,5

Використання самоущільнювальних бетонів забезпечує одержання однорідних самоущільнювальних бетонних сумішей та затверділих бетонів заданого класу за міцністю на стиск В30. Застосування таких бетонів дозволяє досягнути високої якості бетонних робіт в умовах знакозмінних та від'ємних температур, а також створює можливість уникнення проведення додаткової технологічної, а саме операції механічного ущільнення.

6.4. Техніко-економічні показники бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, одержані керуванням структуроутворенням на різних рівнях

Доцільність впровадження бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, одержаних керуванням структуроутворенням на різних рівнях технології будівельного виробництва зумовлена їх економічною ефективністю.

При її розрахунку, як базовий варіант прийнято технологію, яка передбачає використання бетону класу за міцністю на стиск С20/25, який найбільш часто використовується при бетонуванні промислових площадок (додаток И). Новий варіант передбачає використання бетону з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, одержаного оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях класу за міцністю на стиск С32/40. Оцінка економічної ефективності при використанні таких бетонів проводилася з врахуванням зниження собівартості.

При розрахунку економічної ефективності з врахуванням вартості виробництва і вкладання бетонної суміші при влаштуванні промислової площадки товщиною 165 мм з використанням бетону з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, одержаного оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях, питомий економічний ефект становить 501,67 грн/м², а при використанні звичайного бетону класу за міцністю на стиск С20/25 при товщині бетонного шару площадки 190 мм – 591,72 грн/м². Використання бетонів з підвищеною міцністю дає змогу зменшити товщину площадки на 25 мм та відмовитися від використання топінга, який використовується для підвищення міцності та стираності верхнього шару при застосуванні звичайних бетонів класу С20/25. Розрахунок товщини проведений згідно з британськими рекомендаціями щодо влаштування цементобетонних промислових підлог (TR 34 «Concrete industrial ground floors»), що базується на стандарті Eurocode 2, та дає змогу розрахувати, в т.ч. плити з комбінованим дисперсним та стрижневим армуванням.

В розроблених бетонних сумішах внаслідок раціонального підбору та оптимізації компонентів і технологічних факторів відсутнє водовідділення, а затверділі бетони характеризуються підвищеною міцністю та тріщиностійкістю.

Результати випробувань показали, що використання таких бетонів, одержаних керуванням структуроутворенням на різних рівнях, забезпечує отримання пластичних бетонних сумішей з необхідним часом транспортування, а затверділі бетони характеризуються підвищеною морозостійкістю, тріщиностійкістю та довговічністю, що відповідає вимогам сучасних технологій

будівництва. Застосування високотехнологічних бетонних сумішей (марка за рухомістю P3–P4) пришвидшує та полегшує їх транспортування бетононасосами до місця вкладання, забезпечує якісне ущільнення при менших затратах, особливо при бетонуванні густоармованих конструкцій, елементів складної конфігурації і зменшує час використання будівельної техніки, тривалість будівельних робіт, витрати робочої сили, а також підвищує продуктивність праці та якість будівництва.

Розрахунок економічної ефективності від впровадження таких бетонів виконано за формулою:

$$E = (C1 - C2) \cdot A$$

де E - економічний ефект від впровадження нової технології, грн;

C1, C2 - собівартість виготовлення одиниці продукції за базовою та новою технологіями;

A – обсяг виробництва.

Собівартість компонентів бетонної суміші визначали, виходячи з діючих цін на матеріали станом на квітень 2024 р. Розрахунки вартості промислової площадки з використанням звичайної і розробленої бетонних сумішей наведені в додатку И.

Основні показники при використанні різних варіантів технологій при виготовленні промислової площадки наведені в табл. 6.6.

Базуючись на ринкових цінах і витратах компонентів бетону і топінгу, який використовується при виготовленні промислових площадок і підлог, проведено розрахунок вартості 1 м² промислової площадки з використанням старої і нової технологій. Досягнутий економічний ефект при використанні нової технології становить 90,05 грн/м² промислової площадки, а при площі 100 м² - E=9005 грн порівняно з традиційною.

Аналізуючи вартості виготовлення промислових підлог за новою та базовою технологіями, можна зробити висновок, що економія коштів відбувається внаслідок відмови від топінга та зменшення товщини підлоги за рахунок використання бетону з підвищеною міцністю.

Таблиця 6.6 - Порівняльний розрахунок собівартості 1 м² промислової площадки за базовою та новою технологіями

Матеріали	Базовий варіант			Новий варіант		
	Кількість на м ³ бетонної суміші, кг	Вартість одиниці, грн/кг	Вартість на м ³ бетонної суміші, грн	Кількість на м ³ бетонної суміші, кг	Вартість одиниці, грн	Вартість на м ³ бетонної суміші, грн
Портландцемент	309,00	4,60	1421,40	315,00	4,60	1449,00
Цеолітовий туф	-	4,15	-	35,00	4,15	145,25
Пісок	730,00	0,45	328,50	600,00	0,45	270,00
Щебінь	1200,00	0,60	720,00	1230,00	0,60	738,00
Пластифікуюча добавка	3,10	20,00	62,00	3,50	60,00	210,00
Повітровтягувальна добавка	-	58,00	-	0,35	58,00	20,30
Фібра звичайна	0,90	198,00	178,20	1,05	198,00	207,90
Вартість 1 м ³ бетону			2710,10			3040,45
Вартість 1 м ² площадки			514,92 (h=0,19 м)			501,67 (h=0,165 м)
Топінг	5,00*	15,36	76,80	-	15,36	-
Вартість 1 м ² промислової площадки			591,72 (h=0,19 м)			501,67 (h=0,165 м)

* - на 1 м² промислової площадки

Особливості підбору компонентів та проектування складів бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, наведені в дисертаційній роботі і використовуються в навчальному процесі при викладанні таких дисциплін «Технології моделювання інформації у будівельному виробництві», «Бетони та будівельні розчини. Заповнювачі для бетонів. Частина 1 і 2», «Будівельне

матеріалознавство», «Технологічний супровід виготовлення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій» для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія спеціалізації «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів» (додаток К).

6.5. Перспективи використання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю

У теперішніх складних умовах будівельна галузь має бути орієнтована на інноваційні підходи до технології виготовлення бетонів, які повинні відповідати підвищеним вимогам щодо довговічності будівель та споруд. Це задовольняє сучасним вимогам ресурсо- і енергоефективного виробництва. Запровадження цілком нової концепції при проектуванні складів бетонів, з врахуванням їх поведінки під навантаженням, створює прогресивні енергоощадні технології високоякісних бетонів з підвищеною тріщиностійкістю. Це набуває особливого значення при зростаючих вимогах до довговічності конструкцій з метою забезпечення сталого розвитку в будівництві. Концепція запропонованих змін в технології виготовлення таких бетонів полягає в оптимізації технологічних факторів на різних структурних рівнях для одержання необхідних міцнісних параметрів та характеристик тріщиностійкості.

Інноваційним підходом можна вважати раціональний підбір ефективних мінеральних добавок в бетоні, які повинні характеризуються позитивними основним і додатковим ефектами (гранульований доменний шлак, зола-виносу, цеолітовий туф, синтетичні цеоліти), що в комплексі з правильно підібраними пластифікуюче-повітровтягувальними добавками з врахуванням їхньої природи, сумісності та ефекту дії дозволяє одержати синергічний ефект їх взаємодії. Перевагою таких бетонних сумішей є підвищена легкоукладальність, відсутність їх

розшарування та можливість транспортування бетононасосами, а затверділих бетонів – підвищена міцність і тріщиностійкість внаслідок так званого самоармування бетону на рівні мікроструктури, що досягається утворенням волокнистих гідросилікатів кальцію та рівномірного розподілу дрібних бульбашок повітря із забезпечення необхідної величини просторового фактора на рівні мезоструктури, які підвищують експлуатаційні властивості та тріщиностійкість бетонів за рахунок рівномірного розподілу та розсіювання внутрішніх напружень. Поєднання вищезгаданих технологічних рішень з дисперсним армуванням фібрами різних типів дає змогу забезпечити одночасне додаткове армування на рівні мезоструктури та внаслідок забезпечення “Bridge” ефекту при оптимальному відношенні l_f/D_{max} та коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача на рівні макроструктури. Таке неперервне армування на різних рівнях структури бетону забезпечує підвищену тріщиностійкість та можливість її регулювання за рахунок зміни впливаючих технологічних факторів.

Ірраціональне і неефективне поєднання компонентів може призвести до зменшення пластичності, розшарування і, як наслідок, до проблем при їх вкладанні, а затверділі бетони будуть характеризуватися низькою довговічністю.

Використання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю дає змогу створити більш економічні конструктивні рішення при проектуванні конструктивних елементів внаслідок зниження їх маси при зменшенні товщини та скорочення витрати матеріалів.

Перспективним напрямком використання бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю є будівництво дорожньої інфраструктури, а саме будівництво автомагістралей з покращеними експлуатаційними властивостями, проведення ремонтних робіт, а також реконструкції та підсилення вже існуючих об'єктів (підземні переходи, об'єкти в аеропортах та залізницях, гідротехнічні споруди). Застосування розроблених бетонів збільшує довговічність конструкцій, знижує енерго-, ресурсоемність та зменшує викиди парникових газів на всіх етапах життєвого циклу [363], а також потенціал глобального потепління (GWP).

Висновки до розділу

1. Дослідженнями впливу різних технологічних факторів на міцнісні показники та тріщиностійкість бетонів з підвищеною міцністю показано можливість регулювання властивостей бетону внаслідок зміни параметрів проектування. Встановлено, що міцність бетону на стиск підвищується на 27% через 1 добу тверднення при додаванні в бетон різних типів поліпропіленових волокон. Часткова заміна (10 мас.%) портландцементу на цеолітовий туф і додавання повітровтягувальної добавки призводить до зниження початкової міцності, але з часом, через 28 діб тверднення, міцність бетонів R+F+A та R+Z+F+A навіть перевищує міцність бетону R+F на 3,5 і 3,2% відповідно і покращуються експлуатаційні властивості, а саме морозо- та корозійна стійкість, а також водонепроникність.

2. Вивчено поведінку бетону, одержаного з використанням попередньо оптимізованої кількості цеолітового туфу, різних типів волокон і повітровтягувальної добавки, під навантаженням і показано, що такий бетон, незважаючи на менший вміст портландцементу (на 10 мас.%), характеризується покращеними механічними властивостями та параметрами тріщиностійкості зі збільшенням енергії руйнування на 35,1% і критерія крихкості на 61,5% порівняно з еталонним бетоном. Встановлено, що як бетон R+F, так і бетон, що містить оптимізовану кількість цеолітового туфу, різні типи поліпропіленових волокон і повітровтягувальну добавку R+Z+F+A, однаково поведуться під навантаженням на стадії після утворення тріщин, проте бетон R+Z+F+A має покращені експлуатаційні характеристики і довговічність, що підтверджує ефективність раціонального підбору та оптимізації різних технологічних факторів, які дозволяють отримати економічно ефективний високоякісний бетон.

3. Використання цеолітового туфу у в'язучих системах, що містять гранульований доменний шлак, покращує технологічні та технічні характеристики одержаних мінеральних в'язучих речовин, а саме зменшується водовідділення, скорочуються терміни тужавіння та дещо підвищується міцність в більш пізні терміни тверднення. Змішана сульфатно-лужна активація в'язучих з такими пуцолановими матеріалами призводить до утворення додаткової кількості гідратних фаз в неклінкерній частині, таких як гідросилікати кальцію, а також подовжених голчастих кристалів гідросульфоалюмінату кальцію, які забезпечують самоармування тверднучої системи та синтез міцності бетону на мікроструктурному рівні. Використання цеолітового туфу з підвищеною пуцоланічною активністю разом з гранульованим шлаком призводить до формування щільної мікроструктури, а повітровтягувальні добавки створюють мезоструктуру з рівномірно розподіленими бульбашками повітря з добре армованою волокнистими гідросилікатами кальцію оболонкою, яка при навантаженні бетону призводить до дисипації енергії мікротріщиноутворення та зростання тріщиностійкості.

4. Промисловий випуск бетонних сумішей БСГ В40Р4F200W10 (загальний об'єм - 30 м³), що містили полідисперсний цеолітовий туф, пластифікуючу та повітровтягувальну добавки, а також поліпропіленову фібру, здійснено на ПП «Застава» при будівництві площадки для складування бетонних виробів, що дало змогу вирішити завдання одержання бетонних сумішей з покращеними технологічними (з нормованою пористістю та відсутністю розшарування) та експлуатаційними (підвищеною тріщиностійкістю, морозостійкістю та водонепроникністю) властивостями. Фактичний економічний ефект від впровадження розробки з врахуванням вартості виробництва і вкладання складає 90,05 грн на 1 м² промислової площадки. Такі бетони також були впроваджені на ПП «Захід-Бетон-Буд» (в кількості 82 м³) при будівництві під'їзної дороги до складських приміщень у с. Малехів Львівської ОТГ.

5. Здійснено промислове впровадження бетонів з підвищеною міцністю В30 (С25/30) в кількості 200 м³ на ТзОВ «Угринів Еко Ферм» при бетонуванні ванни тваринницького комплексу із забезпеченням підвищеної корозійної та тріщиностійкості бетону, внаслідок оптимізації технологічних факторів на різних структурних рівнях. Бетони розроблено за алгоритмом багатопараметричного проектування складів. Використання сучасних підходів при проектуванні складів дисперсноармованих бетонів з підвищеною міцністю, а саме використання мінеральних добавок з необхідними основним і додатковим ефектами та хімічних добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії, сприяє вирішенню завдання підвищення корозійної стійкості та тріщиностійкості бетонів як в докритичній, так і на закритичній стадіях і дає змогу забезпечити зростання довговічності.

6. Впроваджено розроблені бетони з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю на основі БСГ В35Р4F200W6 на підприємстві «Дрог-Буд» Сп. з о.о. при будівництві мостового переходу в с. Корчів в кількості 116 м³, а також суміші БСГ В30Р4F200W6 та БСГ В30Р3F200W6 на ТОВ «Автомагістраль-Південь» при бетонуванні монолітних стійок опор, ростверків, підферменників, ригелів, буронабивних паль при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 в кількості 580 м³. Комплексне поєднання раціонально підібраних органо-мінеральних добавок з підвищеною ефективністю дозволило одержувати бетонні суміші з проектними марками за легкоукладальністю Р3 та Р4 і з нормованим розшаруванням за показниками водо- та розчинівідділення, а затверділий бетон характеризувався швидким наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28} \geq 0,5$), підвищеною проектною морозостійкістю та водонепроникністю, а також покращеними характеристиками тріщиностійкості.

7. Проведено промислове впровадження розробленого бетону з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю класу за міцністю на стиск В30 (С25/30), марки за морозостійкістю F200 та водонепроникністю W6 на ТОВ «Автомагістраль-Південь» із забезпечення високої технологічності самоущільнювальних (розплив конуса 550-620 мм, клас за розпливом конуса розробленої бетонної суміші - SF1) бетонних сумішей для бетонування деяких монолітних складних за формою для вкладання бетонних сумішей стійок опор, в

яких була утруднена можливість ущільнювати бетон способом вібрування із застосуванням глибинних вібраторів, при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 в кількості 4 м³. При цьому раціональним підбором хімічних добавок забезпечено одержання об'єму втягнутого повітря в кількості 5%, отримання проектної марки за морозостійкістю бетону, підвищеної тріщиностійкості та тверднення бетонів в умовах знакозмінних температур в діапазоні -10...+3°C.

8. Отримані в дисертаційній роботі теоретичні, технологічні й методологічні результати застосовуються в навчальному процесі при підготовці здобувачів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія в Національному університеті «Львівська політехніка», зокрема при викладанні курсів «Технології моделювання інформації у будівельному виробництві», «Бетони та будівельні розчини. Заповнювачі для бетонів. Частина 1 і 2», «Будівельне матеріалознавство», «Технологічний супровід виготовлення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті узагальнення комплексу експериментально-теоретичних досліджень в дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему з розроблення теоретичних основ і технології бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, що дає змогу поєднувати системно їх технічні, екологічні та економічні переваги. Нижче сформульовані висновки по найважливіших наукових і практичних результатах:

1. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість створення бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю за рахунок направленою формування їх структури на мікро-, мезо- та макроструктурному рівнях шляхом раціонального підбору пуцоланових матеріалів на основі цеолітів, пластифікуючих і повітровтягувальних добавок, дисперсних волокон.

2. Показано, що формування оптимальної структури на мікро-, мезорівнях здійснюються шляхом зв'язування вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і утворення гідросилікатів кальцію волокнистої форми, а також гідрогеленіту і збільшеної кількості еtringіту, що може бути реалізовано як введенням добавок пуцоланової дії, так і комплексної пуцоланової і кристалоутворюючої дії (природні і штучні цеоліти).

3. Запропоновано розділити ефекти дії пуцоланових матеріалів на основі і додаткові та враховувати їх при проектуванні бетонів. Дослідженнями пуцоланічної активності (основний ефект) матеріалів показано, що за здатністю поглинати CaO з його насиченого розчину їх можна розмістити в порядку зростання їх активності: гранульований доменний шлак → зола-винесення → природні пуцолани → штучні пуцолани. Підтверджена роль цеолітового туфу як джерела додаткової води (додатковий ефект) для поглиблення гідратації портландцементу в нормальних та повітряно-сухих умовах тверднення і як кристалоутворюючої добавки. Показано, що введення до складу бетону до 10

мас.% цеолітового туфу або штучного цеоліту Na-P1 підвищує міцність на стиск на 28 добу порівняно з контрольним складом на 18,4 і 11,7 %, а на розтяг при згині 23,4 і 14,3 % відповідно.

4. Встановлено зв'язок показників тріщиностійкого бетону з його структурою на макрорівні і показано, що формування в структурі бетону рівномірно розподілених бульбашок повітря за рахунок введення пластифікуюче-повітровтягувальних добавок забезпечує рівномірний розподіл напружень в бетоні і сприяє дисипації енергії мікротріщиноутворення під навантаженням як на докритичній стадії, так і сповільнення руху магістральної тріщини в закритичній.

5. Запропоновано як один з критеріїв оцінки тріщиностійкості бетонів підвищеної міцності параметр питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_1 , який разом із стандартизованим показником питомих енерговитрат та статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i) більш точно і в повній мірі характеризує поведінку бетону під навантаженням в докритичній і закритичній областях деформування і визначає ефективність армування.

6. Виявлено механізм покращення тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю, внаслідок використання природних пуцолан (10 мас.% цеолітового туфу) в комплексі з повітровтягувальною добавкою (0,15 мас.%). Досліджено, що при вмісті повітря 6,5% такий бетон характеризується системою рівномірнорозподілених замкнутих пор, а використання повітровтягувальних добавок з дифільними молекулами забезпечує формування бульбашок повітря з міцною оболонкою, яку утворюють продукти гідратації портландцементу з переважанням в них волокнистих гідросилікатів кальцію. Це зумовлює дисипацію енергії мікротріщиноутворення під навантаженням як на докритичній ($G_i=247,44$ Дж/м²), так і сповільнення руху магістральної тріщини в закритичній ($G_1=492,28$ Дж/м²) стадіях із зростанням критерія крихкості до 206 мм та морозостійкості бетону у 1,5 рази.

7. Уточнено і розвинуто механізм неперервності армування на рівні

мікро- і мезоструктури, здійсненого як шляхом направленою формування новоутворень волокнистої форми в цементному камені, так і введенням до складу бетону полідисперсних фібрових волокон, що створює так званий «Bridge» ефект, який призводить до сповільнення розвитку мікротріщин в докритичній стадії деформування та чинить опір в подальшому дефрагментації полідисперсноармованих бетонів в закритичній стадії деформування.

8. Доведено ефективність полідисперсного армування бетонів, що дає змогу при вмісті фібри з деформованою поверхнею 8 кг/м^3 бетонної суміші та прямої фібри $1,05 \text{ кг/м}^3$ досягнути максимальних значень міцності ($f_{ctfm}=11,9 \text{ МПа}$) та енергетичних (при $F_c=5400 \text{ Н}$: $G_i=207,34 \text{ Дж/м}^2$; $G_l=660,19 \text{ Дж/м}^2$; $G_F=840,44 \text{ Дж/м}^2$) параметрів тріщиностійкості. Показано, що поєднання двох видів фібри ФПДП2 та ФПП1 покращує міцність на розтяг при згині на 40-75% та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів майже в 2,0-2,5 рази порівняно з бетоном без фібри. Критерій крихкості становить 209 мм.

9. Розроблено алгоритм багатопараметричного проектування, який передбачає комплексне поєднання пуцоланових матеріалів на основі природних і штучних цеолітів, пластифікуюче-повітровтягувальних добавок та різних видів фібри для одержання бетонів з підвищеною міцністю, тріщиностійкістю та експлуатаційними властивостями. Показано, що запроектовані бетони класів С 25/30-С 50/60 мають кращі міцнісні показники ($f_{cm.cube}=67,3 \text{ МПа}$, $f_{ctfm}=9,0 \text{ МПа}$), силові ($\chi_F^c=176 \text{ мм}$) та енергетичні (при $F_c=3834 \text{ Н}$: $G_F=350,47 \text{ Дж/м}^2$) характеристики тріщиностійкості при високих експлуатаційних властивостях ($\check{G}_c=0,2 \text{ г/см}^2$, F300, W16).

10. Розроблено наукові засади технології бетонів з підвищеною тріщиностійкістю. Встановлено, що для одержання таких бетонів значення критерія крихкості χ_F^c має перевищувати 140 мм. Показано можливість регулювання характеристик тріщиностійкості та довговічності за рахунок зміни технологічних факторів та параметрів проектування. Вивчено поведінку бетону з підвищеною міцністю під навантаженням і встановлено, що бетон, який містить

полідисперсний цеолітовий туф, різні види фібри і повітровтягувальну добавку, незважаючи на менший вміст портландцементу (на 10 мас.%), характеризується покращеними (на 3-3,5%) механічними властивостями в більш пізні терміни тверднення та параметрами тріщиностійкості зі збільшенням енергії руйнування на 35,1% і критерію крихкості на 61,5% порівняно з контрольним складом бетону.

11. Результати апробації та промислового випуску підтверджують перспективність застосування розроблених бетонів з підвищеною тріщиностійкістю для будівництва транспортної інфраструктури, гідротехнічних об'єктів, які відповідають різним класам впливу навколишнього середовища на бетон, а також конструкцій з особливими вимогами. Питомий економічний ефект від впровадження розроблених бетонів з підвищеною тріщиностійкістю становить 90,05 грн на 1 м² промислової площадки з фактичним економічним ефектом 9005 грн на 100 м² порівняно з традиційною технологією.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Активність полідисперсних мінеральних компонентів та їх роль у формуванні структури та міцності цементів / Х. С. Соболев, Т. Є. Марків, Н. І. Петровська, О. М. Гуняк. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 175–182.
2. Актуалізація розробки технологічного процесу використання техногенних відходів в будівельному виробництві / С. І. Ломовацький, О. М. Назаренко, А. О. Березовська, О. С. Іщенко, М. В. Кулік, Н. С. Сторчай. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. НУВГП. Рівне, 2023. Вип. 44. С. 68-76.
3. Аналіз використання добавок при виробництві пінобетону / Н.С. Сторчай, Ю.Л. Савін, К.В. Мінін, К.В. Сторчай. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. НУВГП. Рівне, 2023. Вип. 43. С. 40-45.
4. Аналіз ефективності використання тонкомеленого доменного гранульованого шлаку в бетоні / Х. С. Соболев, Т. Є. Марків, Н. І. Петровська, В. В. Гідей. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 169–174.
5. Аналіз науково-технічних аспектів одержання газобетону зниженої густини / Н.С. Сторчай, А.В. Радкевич, І.А. Соколов, І.Ф. Зібров. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. НУВГП. Рівне, 2023. Вип. 44. С. 93-98.
6. Барабаш І. В., Даниленко А. В. Вплив базальтової фібри на міцність цементного каменю. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 31. 2017. С. 163-167.
7. Барабаш І. В., Ксьоншкевич Л. М. Вплив механоактивації на міцність дисперсноармованого бетону з добавкою золи-виносу. Тези доповідей 76-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу академії. 2020.

8. Бетони поліфункціонального призначення на основі композиційних цеолітвмісних портландцементів / М. А. Саницький, Т. П. Кропивницька, І.М. Гев'юк, М. В. Котів. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. № 844. 2016. С. 188–193.
9. Белятинський А. О., Краюшкіна К. В., Гігінейшвілі Д. Я. Перспективи застосування базальтового волокна-фібри при будівництві й реабілітації доріг і злітних смуг аеродромів. Дорожня галузь України. № 6. 2014. С. 28-32.
10. Бліхарський З. Я. Залізобетонні конструкції в агресивному середовищі за дії навантаження та їх підсилення. Монографія. *Львів: Видавництво Львівської політехніки*. 2011.
11. Бліхарський З.Я. Напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій в агресивному середовищі при дії навантаження: Автореф. дис... д-ра. техн. наук: 05.23.01/ Київ: КНУБА, 2005. 37 с.
12. Бліхарський З.Я., Стацук М.Г., Малик О.М. Теоретичні та експериментальні дослідження корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі. Вісник Одеської акад. б-ва та арх.-ри. Одеса. ОДАБА, 2003. №10. С. 22–29.
13. Богдан С.Ю. Визначення граничних станів елементів бетонних і залізобетонних конструкцій методами механіки руйнування: Автореф. дис... канд. техн. наук. К: Науковий світ, 2002. 19 с.
14. Будівельне матеріалознавство / П. В. Кривенко, К. К. Пушкарьова, В. Б. Барановський та ін.; під ред. П. В. Кривенка. Київ: ТОВ УВПК "Ексоб". 2010. 704 с.
15. Будівельні розчини з мікроармувальними добавками / Т. Є. Марків, Х. С. Соболь, Т. П. Кропивницька, П. В. Новосад. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. 2007. № 602. С. 139–143.
16. Вилуговування базальтового волокна різних модифікацій / В. І. Гоц, П. П. Пальчик, С. П. Шпера, О. Ю. Резнік. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Рівне. 2010. Вип. 2010. С. 17-22.

17. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсноармованих цементуючих систем / М. А. Саницький, У. Д. Марущак, І. І. Кіракевич, М. С. Стечишин. Будівельні матеріали і вироби. 2015. № 1. С. 6–9.
18. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони/ Л.Й. Дворкін та ін. Рівне. НУВГП. 2017. 332 с.
19. Високофункціональні бетони на основі модифікаторів нової генерації / М.А. Саницький, О.О. Позняк, І.І. Кіракевич, Б.Г. Русин. Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. Львів. 2008. № 627. С.191-197.
20. Вплив органо-мінеральних добавок на властивості високоміцних бетонів / С.Й. Солодкий, Т.Є. Марків, О.М. Гуняк, Б.А. Гостинецький. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Харків. ХНУСА. 2015. С. 29-34.
21. Вплив хімічних добавок різної природи на кінетику карбонізації бетону / Р. Ф. Рунова, В. В. Троян, С. В. Каменотрус, Є. В. Тихолаз. Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 43. 2012. С. 133-138.
22. В'язучі речовини / Р.Ф. Рунова, Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, Ю.Л. Носовський. Київ: Основа, 2012. 448 с.
23. Гев'юк І. М., Кропивницька Т. П., Саницький М. А. Композиційні портландцементи з добавками природного цеоліту та вапняку. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 31. 2015. С. 149-156.
24. Гев'юк І. М. Мультиmodalьні композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та модифіковані бетони на їх основі: дис. канд. техн. наук : спец. 05.23.05 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2018. 194 с.
25. Гоц В. І. Бетони і будівельні розчини. Підручник. Київ: ТОВ УВПК “Ексоб”, 2003. 472 с.
26. Гуняк О. М. Високоміцні бетони транспортного призначення з підвищеною довговічністю: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2019. 21 с.
27. Гуняк О. М. Пуцоланічні добавки для портландцементів транспортного будівництва. Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. № 877. 2018. С. 88-93.

28. Гуняк О. М., Соболев Х. С., Марків Т. Є. Оптимізація складів спеціальних цеолітовмісних портландцементів. Містобудування та територіальне планування. № 54. 2014. С. 139–143.
29. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Основи бетонознавства. Київ: Основа. 2007.
30. Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М. Взаємозв'язок структури та властивостей бетону для транспортних споруд. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Транспортні системи і технології. 25. 2014. С. 5-14.
31. Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М. Проблеми довговічності бетонів транспортного будівництва. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Транспортні системи і технології. 20. 2012. С. 45-49.
32. Дорошенко О.Ю., Дорошенко Ю.М. Цементний камінь, армований дисперсною арматурою. Зб. наукових праць Київського ун-ту економіки і технології транспорту. Транспортні системи і технології. 2006. Вип.10. С. 66-74.
33. Дослідження будівельних розчинів з добавкою цеолітів / Т. Є. Марків, Х. С. Соболев, З. Я. Бліхарський, О. М. Гуняк. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. № 823. 2015. С. 222–228.
34. Дослідження властивостей дисперсно-армованих розчинів / В. М. Дерев'янку, Н. В. Кондратьєва, Г. М. Гришко, П. Є. Євтушенко. Одеська державна академія будівництва та архітектури. Технічний університет Молдови. 2020.
35. Дослідження сумісності роботи мінеральних добавок в складі високоміцних сульфатостійких бетонів / А. С. Приймаченко, Л. О. Шейніч, К. К. Пушкарьова, С. І. Гедулян. Наука та будівництво. 2. 2015. С. 4-8.
36. ДСТУ Б В.2.7-29-95. Будівельні матеріали. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держкомстандарт України. 1996. 19 с.
37. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. [Чинний

від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держкомстандарт України. 1996. 20 с.

38. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. [Чинний від 2011-09-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України. 2011. 20 с.

39. ДСТУ Б В. 2.7-47-96. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. [Чинний від 1997-04-01]. 1996. 14 с.

40. ДСТУ Б В.2.7-49-96. Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. [Чинний від 1997-04-01]. Вид. офіц. Київ: Держкоммістобудування України. 48 с.

41. ДСТУ Б В.2.7-74-98 Будівельні матеріали. Крупні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держкомстандарт України. 1999. 16 с.

42. ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань. [Чинний від 2002-07-01]. Вид. офіц. Київ: Державний комітет архітектури, будівництва і житлової політики України. 2002. 32 с.

43. ДСТУ Б В.2.7-128:2006. Добавки активні мінеральні та добавки-наповнювачі до цементу. Технічні умови. Київ: Мінбуд України, 2006. 25 с.

44. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. [Чинний від 2009-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України. 2009. 38 с.

45. ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008. Будівельні матеріали. Настанова щодо застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах. Київ: Мінрегіонбуд України. 2010. 31 с.

46. ДСТУ Б В.2.7-185:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 10 с.

47. ДСТУ Б В.2.7-187:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 22 с.

48. ДСТУ Б В. 2.7-188:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення тонкості помелу. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 6 с.
49. ДСТУ Б В.2.7-212:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стираності. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 10 с.
50. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.
51. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Правила підбору складу. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 14 с.
52. ДСТУ Б В.2.7-216:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення деформацій усадки та повзучості. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 24 с.
53. ДСТУ Б В.2.7-227:2009. Бетони. Методи визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) при статичному навантаженні. Київ: Укрархбудінформ, 2010. 23 с.
54. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 44 с.
55. ДСТУ Б ГОСТ 27677:2011. Захист від корозії у будівництві. Бетони. Загальні вимоги до проведення випробувань. Київ: Мінрегіон України, 2012. 8 с.
56. ДСТУ EN 196-1:2007. Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності. Київ: Укрархбудінформ, 2007. 25 с.
57. ДСТУ EN 450-1:2019. Зола виносу для бетону. Частина 1. Визначення, характеристики та критерії відповідності (EN 450-1:2012, IDT), 2019. 30 с.
58. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Київ: Укрархбудінформ, 2013. 87 с.
59. Експертний висновок про можливість використання поліпропіленової фібри виробництва ТОВ «СПЕЦНАБ» у дорожньому будівництві. Київ: ДерждорНДІ, 2007. 22 с.
60. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної

сировини: монографія / Дворкін Л.Й. та ін. Рівне. НУВГП, 2017. 424 с.

61. Журавський О. Д., Цибульник І. О. Дослідження плит, підсилених сталевібробетоном. Будівельні конструкції. 2001. №54. С. 268-270.

62. Золомісні портландцементи та бетони на їх основі / М.А. Саницький, Т.Є. Марків, Ю.Л. Новицький, Т.П. Кропивницька, В.А. Пристай. Матеріали V науково-практичного семінару “Структура, властивості та склад бетону”. Рівне, 2006. С. 174-179.

63. Іващишин Г. С. Низькоемісійні змішані цементи та модифіковані бетони і будівельні розчини на їх основі: дис. канд. техн. наук : спец. 192 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2020. 207 с.

64. Кияшко В.Т. Фібра для армування залізобетонних будівельних виробів. Журнал цивільного виробництва. 2012. № 8. С. 61-66.

65. Кінаш Р., Білозір В., Біденко І. Деформативність і міцність дрібнозернистого сталевібробетону за осьового розтягу. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 20. 2023. С. 45-62.

66. Комплексні модифікатори пластифікуюче-прискорюючої дії в технології бетонів / М.А. Саницький, О.Р. Позняк, У.Д. Марущак, І.І. Кіракевич. Будівельні конструкції. Сучасні технології бетону. 2009. Вип.72. С.52-59.

67. Конструкційні матеріали нового покоління та технології впровадження їх в будівництво / Р.Ф. Рунова та ін. Київ: УВПК «ЕксОб». 2008. 360 с.

68. Концепція застосування модифікаторів для підвищення якості та довговічності залізобетону / М.А. Саницький, У.Д. Марущак, О.Т. Мазурак, М.М. Чемерис. Будівельні конструкції. 2003. Вип.59, Кн. 1. С. 448-455.

69. Концепція низьковуглецевого розвитку в цементній промисловості / М. А. Саницький, Т.П. Кропивницька, Г. С. Іващишин, Б. Г. Русин. Будівельні матеріали і вироби. 5-6. 2017. С. 24-27.

70. Концепція одержання низькоенерговмісних цементів / Т.Є. Марків, У.Д. Марущак, М.А. Саницький, Х.С. Соболь, Ю.Л. Новицький. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2009. № 655. С. 170-178.

71. Кропивницька Т. П. Пластифіковані цементи та будівельні мурувальні розчини на їх основі: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / НУ «Львівська політехніка», Львів, 2011. 23 с.

72. Кропивницька Т. П. Лужноактивовані композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та наномодифіковані бетони на їх основі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: 05.23.05 / НУ «Львівська політехніка», Львів, 2020. 39 с.

73. Луцюк І. В., Вахула Я. І. Технологічні особливості одержання високодисперсних порошків магнію гідросилікату. Вісник НУ «Львівська політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування. № 700. 2011. С. 318–321.

74. Лучко Й. Й. Застосування методів механіки руйнування для оцінки міцності та тріщиностійкості залізобетонних конструкцій. Будівельні конструкції: Зб. наук. праць. Київ: НДІБК. 2005. Вип. 62. С.180–188.

75. Лучко Й. Й., Сулим Г. Т., Кир'ян В. І. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності. НАН України фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка / За ред. Й.Й. Лучка. Львів: Каменяр. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідник. посібник. Т.6. 2004. 885 с.

76. Лучко Й. Й., Чубріков В. М., Лазар В. Ф. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування. НАН України, фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка, Львів, Каменяр. 1999. 348 с.

77. Марків Т. Є., Кропивницька Т. П. Модифіковані будівельні розчини нової генерації. II науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2008. С. 43.

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

79. Марущак У. Д. Наномодифіковані надшвидкотверднучі цементуючі системи та високофункціональні бетони на їх основі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: 05.23.05 / НУ «Львівська політехніка», Львів, 2019. 39 с.

80. Математичне моделювання та оптимізація будівельних композитів / С.Й. Солодкий, І.Д. Пелешко, Р.М. Русин, В.В. Юрченко. Львів: Видавництво НУ “ЛП”. 2006. 92 с.
81. Модифікатори нової генерації для бетонів / М.А. Саницький і ін. Будівельні матеріали та вироби. 2006. №1(36). С. 5-7.
82. Модифіковані бетони з поліпшеними експлуатаційними властивостями / Т. Є. Марків, П. В. Новосад, О. П. Новосад, І. В. Саїв. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2010. № 664. С. 93–97.
83. Модифіковані бетони на основі портландцементу композиційного ПЦ Ш/Б-К (Ш-3)-400 / Т. Є. Марків, У. Д. Марущак, С. В. Міхін, О. О. Серкіз. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2013. Вип. 26. С. 286–291.
84. Модифіковані будівельні розчини з мікроармуючими і хімічними добавками / Т.Є. Марків, Х.С. Соболь, Т.П. Кропивницька, В.А. Пристай, Р.А. Солтисік. І науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2007. С. 13-15.
85. Модифіковані малоенергоємні цементи для будівельних розчинів і бетонів / Т. Є. Марків, Т. П. Кропивницька, М. В. Штурмай, Б. В. Федунь. Будівельні конструкції, міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. п-во «Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій». Київ. НДІБК, 2009. Вип. 72: Сучасні технології бетону: зб. наук. пр. С. 216–222.
86. Модифіковані цементобетони для покриття доріг / В. В. Чистяков, А. Г. Шургая, Ю. М. Дорошенко, Н. П. Чиженко, А. В. Кабусь, Л. Б. Коваль. Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 43. 2012. С. 212-216.
87. Низькоенергоємні цементи, модифіковані добавками пластифікуюче-прискорюючої дії / М. А. Саницький, Т. Є. Марків, У. Д. Марущак, Ю. Л. Новицький. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2010. № 664. С. 195–199.
88. Ніколаєв О.П., Кондращенко О.В. Ефективність дії пластифікаторів

залежно від способу їх додавання до складу бетону. Вісник ОДАБА. 2022. Вип. 82. С. 98- 105.

89. Основні напрямки досліджень із використання золи ТЕС у виробництві будівельних матеріалів / В. М. Дерев'янку, В. І. Мосьпан, В. В. Колохов та ін. Український журнал будівництва та архітектури. 2022. № 1. С. 38-44.

90. Особливошвидкотверднучі композиції для високофункціональних бетонів / М.А. Саницький, У.Д. Марущак, І.І. Кіракевич, Т.А. Мазурак. Вісник НУ «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. 2013. № 755. С. 385-390.

91. Пат. 154932 Україна. Спосіб одержання зв'язуючого / З. Я. Бліхарський, Х. С. Соболев, Т. Є. Марків, О. М. Гуняк. u 202302590; опубл. 03.01.2024, Бюл. № 1. 4 с.

92. Перспективи використання високоміцних фібробетонів як основи формування захисних укриттів та фортифікаційних споруд під час російсько-української війни / С. Королько, М. Саницький, Т. Кропивницька, А. Дзюба, Ю. Шабатура. Військово-технічний збірник. 28. 2023. С. 25-33.

93. Позняк О.Р., Мазурак О.Т., Марущак У.Д. Особливості процесів гідратації портландцементних систем з модифікаторами на основі полікарбоксилатів. Вісник НУ «Львівська політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування. 2008. № 609. С. 310-314.

94. Порівняння сучасних добавок для високоміцного дорожнього бетону / І. П. Гамеляк, А. Г. Шургая, Я. М. Якименко, Н. П. Чиженко, О. А. Каршук. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 92. 2014. С. 38-49.

95. Принципи стратегії сталого розвитку в цементній промисловості / Т.М. Круць, І.М. Гев'юк, М.А. Саницький, Т.П. Кропивницька. Будівельні матеріали та виробни. 2015. № 3-4. С. 16-19.

96. Пушкарьова К. К., Назим О. А. Технічні переваги модифікації композиційних в'язучих систем цеолітовими додатками та перспективність їх використання для отримання бетонів із наперед заданими властивостями. Композиційні матеріали для будівництва. Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. 38. С. 88-91.

97. Розробка складів шлаколузних в'язучих матеріалів для тротуарних виробів / Г. М. Шабанова, А. М. Корогодська, В. М. Шумейко, О. М. Борисенко, Г. В. Лісачук, Р. В. Кривобок, М. Д. Сахненко // Питання хімії та хімічної технології. 2023. № 5. Р. 147–154.

98. Роль хімічних добавок у формуванні властивостей лузних цементів / V. I. Gots, I. I. Rudenko, O. V. Lastivka, E. V. Volinska. *Ceramics: Science and Life*. 3 (36). 2017. С. 5-14.

99. Саницький М. А., Кропивницька Т. П., Гев'юк І. М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони / колективна монографія. Львів: Простір-М, 2021. 206 с.

100. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Марків Т.Є. Мікроструктура та міцність будівельних розчинів з комплексними модифікаторами. Будівельні матеріали та вироби. 2010. № 1 (60). С. 6–9.

101. Саницький М.А., Марків Т.Є., Круць Т.М. Волокнистоцементні вироби на основі портландцементу, одержаного з використанням вторинних паливних матеріалів / Будівельні матеріали та вироби. 2011. № 4 (69). С. 2–7.

102. Саницький М.А., Марків Т.Є., Русин Б.Г. Вплив лузних компонентів на компатибільність портландцементів з хімічними та мінеральними добавками. XII Міжнародна науково-практична конференція «Дні сучасного бетону». Будіндустрія ЛТД. Запоріжжя, 2012. С. 51-57.

103. Саницький М. А., Соболев Х. С., Марків Т. Є. Модифіковані композиційні цементи. Навч. посіб. Львів. Вид-во Львів. політехніки, 2010. 132 с.

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

105. Солодкий С.Й., Марків Т.Є., Холод Т.П. Способи регулювання тріщиностійкості високоміцних бетонів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, зб. наук. пр. Рівне [б. в.], 2015. Вип. 31. С. 357–362.

106. Солодкий С. Й. Наукові засади підвищення тріщиностійкості дорожнього цементного бетону : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.23.05 / НУ

«Львівська політехніка», Львів, 2009. 30 с.

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

108. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленою фіброю. Наукові нотатки. 46. 2014. Р. 512-515.

109. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Підвищення тріщиностійкості дисперсно-армованих поліпропіленою фіброю бетонів технологічними чинниками. Вісник ОДАБА. 2017. Вип. 66. С. 99-105.

110. Сучасні бетони на основі комплексних модифікаторів нової генерації / М. А. Саницький, О. Р. Позняк, І. І. Кіракевич, Н. І. Топилко. Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка. 2008. №2 (29). С. 98-102.

111. Толмачов С. М. Дослідження сумісності суперпластифікаторів і цементів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2015. Вип. 31. С. 176-182.

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

113. Троян В. В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Київ: Аспект-Поліграф. 2010. 228 с.

114. Троян В. В. Моделювання тріщиностійкості бетону масивних монолітних конструкцій. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 53. 2014. С. 375-379.

115. Троян В. В., Сова Н. О. Моделювання морозостійкості бетону. Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка. 49. 2013. С. 139-144.

116. Троян В. В., Товстони́с В. В. Поліфракційність заповнювача як технологічний фактор формування структури високоміцного бетону. Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия. Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского,

промислового и транспортного назначення. 47. 2008. С. 661-670.

117. Турба Ю. В., Марків Т. Є., Солодкий С. Й. Вплив дисперсного армування поліпропіленовими фібрами на тріщиностійкість дорожніх бетонів. Матеріали міжнародного семінару “Моделювання і оптимізація будівельних композитів”. Одеса, 2018. С. 119-121.

118. Турба Ю. В. Тріщиностійкість дисперсно-армованого бетону: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / НУ «Львівська політехніка», Львів, 2021. 21 с.

119. Ушеров-Маршак О., Гергични З., Малолепши Я. Шлакопортландцемент и бетон. Харків. Колорит. 2004. 159 с.

120. Ушеров-Маршак О.В., Гоц В.І., Кабусь О.В. Бетони та будівельні розчини. Навч. посіб. Харків. ХНУБА, Київ. КНУБА, 2022. 93 с.

121. Ушеров-Маршак О.В., Кабусь О.В. Функціональна сумісність компонентів -фактор розвитку сучасного бетону (на прикладі добавок до бетону). Наука та будівництво. 2018. № 1. С. 27-33.

122. Ушеров-Маршак О.В. Хімічні і мінеральні добавки в бетон. Харків: Колорит. 2005. 280 с.

123. Чистяков В. В. Вплив комплексної добавки на особливості твердіння і властивості цементобетону для покриття доріг. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. 39. 2011. С. 122-126.

124. Шейніч Л. О., Іонов Д. С., Сопов В. П. Особливості процесів структуроутворення цементного каменю, модифікованого комплексною органо-мінеральною добавкою. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 52. 2013. С. 308-314.

125. Щербина О. С., Барабаш І. В., Ксьоншкевич Л. М. Дисперсно-армированный керамзитобетон на механоактивированном портландцементе. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2016. 159.

126. Ширина розкриття нормальних тріщин залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою / І. В. Мельник, А. Я. Мурин, Р. І. Канафоцький, Т. В. Приставський. Вісник Національного університету «Львівська

політехніка». Теорія і практика будівництва. Львів, 2010. Вип. 652. С. 308-315.

127. Admixture compatibility with natural supplementary cementitious materials / E. Ghafari, S. Ghahari, D. Feys, K. Khayat, A. Baig, R. Ferron. *Cement and Concrete Composites*. 2020. 112. 103683.

128. Adsorptive Modification of High-Dispersed Magnesium Hydrosilicate / I. Lutsyuk, Ya. Vakhula, V. Levytskyi, L. Zhuk // *Chemistry & Chemical Technology*. 2014. Vol. 8, № 3. P. 261–264.

129. Air-entraining admixtures as a protection method for bacterial spores in self-healing cementitious composites: Healing evaluation of early and later-age cracks / I. Justo-Reinoso, B. J. Reeksting, C. Hamley-Bennett, A. Heath, S. Gebhard, K. Paine. *Construction and Building Materials*. 2022. 327.

130. Aitcin P., Flatt, R.J. (Eds.). *Science and Technology of Concrete Admixtures*. first ed. Woodhead Publishing. Oxford. United Kingdom. 2015.

131. Aitcin P. C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and concrete composites*. 25 (4-5). 2003. P. 409-420.

132. Aitcin P., Wilson W. *Cements of today – concretes of tomorrow*. *Cement Wapno Beton*. 2014. 81(19). P. 349-358.

133. Afifi M. S., Abou-Zeid M. N. Internal curing of high performance concrete using lightweight and recycled concrete aggregates. In *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*. 2016.

134. Ahmadi B., Shekarchi M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*. 32 (2). 2010. P. 134-141.

135. Analysis of plasticizer effectiveness during alkaline cement structure formation / P. Kryvenko, R. Runova, I. Rudenko, V. Skoryk, V. Omelchuk. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 4 (6). 2017. P. 35-41.

136. Analysis of structure formation peculiarities during hydration of oil-well cement with zeolitic tuff and metakaolin additives / Kh. Sobol, Z. Blikharsky, N. Petrovska, V. Terlyha. *Chemistry and chemical technology*. 2014. Vol. 8. 4: 461-5.

137. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan / M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi, M. Shekarchi.

Construction and Building Materials. 2012. 35. P. 1023–33.

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

139. Application of X-ray Computed Tomography to Verify Bond Failures Mechanism of Fiber-Reinforced Fine-Grain Concrete / G. P. Kaczmarczyk, R. Kinasz, V. Bilozir, I. Bidenko. Materials. 15 (6). 2022. 2193.

140. A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes / C.S. Poon, L. Lam, S.C. Kou, Z.S. Lin. Construction Build Mater. 13. 1999. P. 427–432.

141. Atiş, C. D. High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 14 (3). 2002. P. 274–277.

142. Baccouche A., Srasra E., El Maaoui M. Preparation of Na-P1 and sodalite octahydrate zeolites from interstratified illite–smectite [Электронный ресурс]. Applied clay science. 1998. Т. 13. № 4. P. 255–273.

143. Bandura L., Panek R., Franus W. The use of clinoptilolite and synthetic zeolites for removal of petroleum substances. Theory and practice of building. 2014. 781. P. 9-17

144. Barabash J., Harashenko D. Mechanoactivation of the Portland cement in technology of manufacturing self-compacting concrete. Eastern European journal of enterprise technologies. 2018. № 3/6(93). P. 12-17.

145. Bentur A., Igarashi S. I., Kovler K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. Cement and concrete research. 31 (11). 2001. P. 1587-1591.

146. Bentur A., Mindess S. Fiber reinforced cementitious composites. Modern concrete technology series. New York. 2007. № 2. P. 625.

147. Bentz D. P., Garboczi E. J., Quenard D. A. Modelling drying shrinkage in reconstructed porous materials: application to porous Vycor glass. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 6(3). 1998. 211.

148. Bentz D. P., Hansen A. S., Guynn J. M. Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes. Cement and Concrete Composites. 33 (8).

2011. P. 824–831.

149. Bentz D. P., Lura P., Roberts J. W. Mixture proportioning for internal curing. *Concrete international*. 27 (2). 2005. P. 35-40.

150. Bentz D. P., Weiss W. J. Internal curing: a 2010 state-of-the-art review. Gaithersburg, Maryland: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. 2011.

151. Bilim C. Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*. 25. 2011. P. 3175–3180.

152. Błaszczyszński T., Przybylska M. Fiber-reinforced concrete as structural material. *Isolations* 11-12. 2012. P. 44–50.

153. Blended cements produced with synthetic zeolite made from industrial by-product [Электронный ресурс] / Vitoldas Vaitkevičius [et al.]. *Materials science*. 2015. Т. 21. № 1.

154. Blikharsky Y., Selejdak J., Kopiika N. Non-uniform corrosion of steel rebar and its influence on reinforced concrete elements` reliability. *Production Engineering Archives*. 26. 2020. P. 67 – 72.

155. Bordelon A. C. Fracture Behavior of Concrete Materials for Rigid Pavement Systems. M.S. Thesis. 2007.

156. Broda J. Application of Polypropylene Fibrillated Fibres for Reinforcement of Concrete and Cement Mortars. In *High Performance Concrete Technology and Applications*; IntechOpen. London, UK. 2016. P. 189–204.

157. Brouwers H. J. H., Radix H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research*. 35 (11). 2005. P. 2116–2136.

158. Caputo D., Liguori B., Colella C. Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: The effect of zeolite structure [Электронный ресурс]. *Cement and concrete composites*. 2008. Т. 30. № 5. С. 455–462.

159. Carbon dioxide emissions from the global cement industry / E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, L.O. Meida. *Annual Review of Energy and Environment*. 2001. 26. P. 303–329.

160. Carpinteri A., Brighenti R. Fracture behaviour of plain and fiber-reinforced concrete with different water content under mixed mode loading. *Materials & Design*. 31 (4). 2010. P. 2032-42.
161. Chan S.Y.N., Ji X. Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes. *Cement and Concrete Composites*. 21. 1999. P. 293–300.
162. Characterization of Particle Size, Surface Area, and Shape of Supplementary Cementitious Materials / A.C. Arvaniti, M.C. Cr. Yungler, S.A. Bernal et al. *Particulate Science and Technology*. 2014. 32 (4). 44 p.
163. Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans / F. Dabbaghi, A. Sadeghi-Nik, N. Ali Libre, S. Nasrollahpour. *Structures*. 34. 2021. P. 2617–2627.
164. Chatterji S. Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents. *Cement and Concrete Composites*. 25 (7). 2003. P. 759–765.
165. Chemistry of chemical admixtures / G. Gelardi, S. Mantellato, D. Marchon, M. Palacios, A. B. Eberhardt, R. J. Flatt. In *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Elsevier Ltd. 2016.
166. Colella C. In: J. Cejka, H. van Bekkum, A. Corma, F. Schueth editors. *Introduction to zeolite science and practice*. Amsterdam: Elsevier. 2007. P. 999–1035.
167. Collepari M. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. *Cement and concrete composites*. 20 (2-3). 1998. P. 103-112.
168. Comparative Study of Metakaolin and Zeolite Tuff Influence on Properties of High-Strength Concrete / L. I. Dvorkin, V. Zhitkovsky, N. Lushnikova, M. Sonebi. *Construction Technologies and Architecture*. 1. 2022. P. 179-185.
169. Comparison of the pore size distributions of concretes with different air-entraining admixture dosages using 2D and 3D imaging approaches / S. Y. Chung, P. Sikora, T. Rucinska, D. Stephan, M. Abd Elrahman. *Materials Characterization*, 2020. 162.
170. Concrete as a self-organizing system / V. M. Vyrovoy, O. O. Korobko, V. G. Sukhanov, O. O. Posternak. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*.

708. 012115.

171. Corinadelsi V., Moriconi G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2009. 23. P. 2869–2876.

172. Corrosion of Reinforce Bars in RC Constructions / Z. Blikharskyy, J. Selejdak, Y. Blikharskyy, R. Khmil. *System Safety. Human - Technical Facility – Environment*. 2019. 1. P. 277 - 283.

173. Coussy O., Monteiro P.J.M. Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures. *Cement and Concrete Research*. 38. 2008. P. 40-48.

174. Craeye B., Geirnaert M., Schutter G. De. Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks. *Construction and Building Materials*. 2011. P. 1-13.

175. Cultrone G., Sebastián E., Ortega Huertas M. Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: mineralogical and textural changes. *Cement and Concrete Research*. 35 (12). 2005. P. 2278–2289.

176. Cusson D., Lounis Z., Daigle L. Benefits of internal curing on service life and life-cycle cost of high-performance concrete bridge decks - A case study. *Cement and Concrete Composites*. 2010. P. 339-350.

177. Daigic L., Cusson D., Lounis Z. 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*. 2009.

178. Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials: Laboratory and field test data / N. Bouzoubaâ, A. Bilodeau, B. Fournier, R. D. Hooton, R. Gagné, M. Jolin. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 35 (11). 2008. P. 1261–1275.

179. Deng X., Liu Y., Wang R. Investigating freeze-proof durability of air-entrained C30 recycled coarse aggregate concrete. *Archives of Civil Engineering*. Vol. 67. № 2. 2021. P. 507–524.

180. Design of Rapid Hardening Quaternary Zeolite-Containing Portland-

Composite Cements / M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, T. Kruts, O. Horpynko, I. Geviuk. Key Engineering Materials. Vol. 761. 2018. P. 193-196.

181. Dinakar P., Sahoo P.K., Sriram G. Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials. 7. 2013. P. 215–223.

182. Ding Y. Investigations into the relationship between deflection and crack mouth opening displacement of SFRC beam. Construction and Building Materials. 25 (5). 2011. P. 2432–2440.

183. Ding Y, Zhang Y, Thomas A. The investigation on strength and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete. Construction and Building Materials. 2009. 23. P. 448–452.

184. Dispersed-reinforced concretes and mixtures with mineral and organic fibers / V. Derevianko, L. Moroz, H. Hryshko, O. Vatazhishin. Ways to Improve Construction Efficiency. 1 (52). 2023. P. 181–195.

185. Du L., Folliard K.J. Mechanisms of air entrainment in concrete. Cement and Concrete Research. 35. 2005. P. 1463-1471.

186. Early age hydration and pozzolanic reaction in natural zeolite blended cements: Reaction kinetics and products by in situ synchrotron X-ray powder diffraction / R. Snellings, G. Mertens, Ö. Cizer, J. Elsen. Cement and Concrete Research. 40. 2010. P. 1704–713.

187. Early shrinkage as influenced by water movement in mortars containing zeolites / TA. Bier, B. Stolte, H. Tokushige, M. Kawakami. In: Proc 9th int symp on high performance concrete – design, verification & utilization, energy events centre, Rotorua, New Zealand. 2011.

188. Eco-efficient blended cements with high volume supplementary cementitious materials / M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, H. Ivashchyshyn, O. Rykhlitska. Budownictwo i Architektura. 2019. 18. P. 5-14.

189. Effective solution for low shrinkage and low permeability of normal strength concrete using calcined zeolite particles / J. Zhang, X. Ding, Q. Wang, X. Zheng. Construction and Building Materials. 160. 2018. P. 57–65.

190. Effect of air entraining agents on the air void structure of concrete / X. Song, S. Ng, T. Ni, Y. M. Wang, F. Ke. *Journal of Physics: Conference Series*. 2011 (1). 2021.
191. Effect of Modern Air Entraining Admixtures on Physical Properties of Construction Mortars / M. Babiak, M. Ratajczak, P. Kulczewski, J. Kosno. In *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications, Ltd. 923. 2018. P. 115–119.
192. Effect of Natural Zeolite and Air-Entraining Agent on the Properties of High Strength Concretes / Z. Blikharskyy, S. Solodkyy, O. Pozniak, T. Markiv. *Regional Barometer. Analyses & Prognoses*. 13(2). 2015. P. 137-138.
193. Effect of particle size of blast furnace slag on properties of portland cement / G. Zhu, Q. Zhong, G. Chen, D. Li. *Procedia Engineering* 27. 2012. P. 231–236.
194. Effect of plasticizing and retarding admixtures on the properties of high strength concrete / T. Markiv, S. Solodkyy, K. Sobol, D. Rachidi. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 100. P. 286–293.
195. Effects of the mechanical milling method on transport properties of self-compacting concrete containing perlite powder as a supplementary cementitious material / S. Karein, A. Joshaghani, A. Ramezaniapour, S. Isapour, M. Karakouzian. *Construction and Building Materials*. 172. 2018. P. 677-684.
196. Efficient, Fine-Grained Fly Ash Concrete Based on Metal and Basalt Fibers / L. Dvorkin, J. Konkol, V. Marchuk, A. Huts. *Materials*. 16 (11). 2023. 3969.
197. Einsfeld R. A., Velasco M. S. L. Fracture parameters for high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 36 (3). 2006. P. 576–583.
198. El-Dieb A. Self-curing concrete: Water retention, hydration and moisture transport. *Construction and Building Materials*. 21 (6). 2007. P. 1282-1287.
199. End-of-Life Materials Used as Supplementary Cementitious Materials in the Concrete Industry / A.I. Nicoara, A.E. Stoica, M. Vrabec, N. Šmuc Rogan, S. Sturm, C. Ow-Yang, M.A. Gulgun, Z.B. Bundur, I. Ciuca, B.S. Vasile. *Materials*. 2020. 13. 1954.
200. Engineering performance of polycarboxylate based air entraining agent / Jiang, Z. Xu, F. Li, and G. Li, Y. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*. 36 (4). 2006. P. 568–571.
201. Engineering properties of concrete containing natural zeolite as

supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance / E. Vejmelková, D. Koňáková, T. Kulovaná, M. Keppert, J. Žumár, P. Rovnaníková, Z. Keršner, M. Sedlmajer, R. Černý. *Cement and Concrete Composites*. 55. 2015. P. 259–267.

202. Enhanced entrainment of fine air bubbles in self-compacting concrete with high volume of fly ash using defoaming agent for improved entrained air stability and higher aggregate content / N. Puthipad, M. Ouchi, S. Rath, A. Attachaiyawuth. *Construction and Building Materials*. 144. 2017. P. 1–12.

203. Enhancement of alkali-activated slag cement concretes crack resistance for mitigation of steel reinforcement corrosion / P. Krivenko, O. Petropavlovskiy, O. Kovalchuk, I. Rudenko, O. Konstantynovskiy. In *The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)*, E3S Web of Conferences, Semerikov S., Chukharev S., Sakhno S., Striuk A., Osadchyi V., Solovieva V., Vakaliuk T., Nechypurenko P., Bondarenko O., Danylchuk H., Eds.; Kryvyi Rih, Ukraine, 2020. Volume 166. 06001.

204. Experimental Investigation on Damage Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete under Compression / Lihua Xu, Biao Li, Xiaoxiao Ding, Yin Chi, Changning Li, Biao Huang and Yuchuan Shi. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 20. 2018.

205. Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Polypropylene Hybrid Fiber-Reinforced Roller-Compacted Concrete Pavements / N. Liang, X. You, R. Yan, Q. Miao, X. Liu. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2022. 16.

206. Falkner H. Steel fiber and polymer concrete. Basis, model code 2007 and applications. Braunschweig: Technical University at Braunschweig, 2007. P. 381- 400.

207. Feng N., Peng G. Applications of natural zeolite to construction and building materials in China, *Construction and Building Materials* 19. 2005. P. 579-84.

208. Fernández Á., García Calvo J. L., Alonso M. C. Ordinary Portland Cement composition for the optimization of the synergies of supplementary cementitious materials

of ternary binders in hydration processes. *Cement and Concrete Composites*. 2018. 89. P. 238–250.

209. Fine-grained Fiber Concrete on Mechanoactivated Portlandcement / A. Vorokhaiev, I. Barabash, L. Ksonshkevych, Z. Kos, I. Grynyova. *Croatian regional development journal*. 2 (1). 2021. P. 47-56.

210. Fly ash and its influence on the properties of mechano-activated cement compositions / S. N. Mostoroi, I. V. Barabash, L. N. Ksënshevich, E. N. Krantovskaja. *Tehnički glasnik*. 9 (3). 2015. P. 303-306.

211. Fonseca P. C., Scherer G. W. An Image Analysis Procedure to Quantify the Air Void System of Mortar and Concrete. *Materials and Structures*. 48. 2015. P. 3087–3098.

212. Fracture properties of high-strength concrete obtained by direct modification of structure / S. Solodkyy, T. Markiv, K. Sobol, O. Hunyak. In *MATEC Web of Conferences*. Vol. 116. P. 01016 -2017.

213. Franus W. Characterization of X-type zeolite prepared from coal fly ash. *Polish Journal of Environmental Studies* 21. 2012. P. 337-343.

214. Franus W. The use of zeolites of fly ash produced from removing contaminants from water and wastewater. Polish academy of sciences. Lublin, 2012.

215. Freezing of fully and partly saturated cement paste / M. Koniorczyk, D. Bednarska, A. Wieczorek, P. Konca. *Archives of Civil Engineering*, 67(2). 2021. P. 383–396.

216. Frost resistance of internal curing concrete with calcined natural zeolite particles / X. Zheng, J. Zhang, X. Ding, H. Chu, J. Zhang. *Construction and Building Materials*. 2021. 288. 123062.

217. Gambhir M.L. *Concrete Technology. Theory and Practice*. 4th ed. Tata McGraw Hill Education Private Limited: New Delhi. India. 2009. P. 1-3.

218. Ghafari E., Feys D., Khayat K. Feasibility of using natural SCMs in concrete for infrastructure applications. *Construction and Building Materials*. 2016. 127. P. 724–732.

219. Ghanbari A., Karihaloo B. L. Prediction of the plastic viscosity of self-

compacting steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 2009. № 39. P. 1209-1216.

220. Girskas G., Nagrockienė D. The effect of synthetic zeolite on hardened cement paste microstructure and freeze-thaw durability of concrete [Електронний ресурс]. *Construction and Building Materials*. 2017. Т. 142. P. 117–127.

221. Girskas G., Nagrockienė D., Skripkiūnas G. The effect of synthetic zeolite admixture on the durability of concrete paving blocks [Електронний ресурс]. *The baltic journal of road and bridge engineering*. 2016. Т. 11. № 3. P. 215–221.

222. Girskas G., Nagrockienė D. The effect of synthetic zeolite on the viscosity of cement paste [Електронний ресурс]. *Engineering structures and technologies*. 2013. Т. 4, № 4. P. 119–124.

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

224. Gołaszewski J. *Domieszki do betonu efekty dzialania ocena i badania*. Cliwice. 2016. 263 s.

225. Gołaszewski J. and Gołaszewska M. The effect of shrinkage reducing admixture and expansive admixture on properties of mortars with Portland and slag cement. *Archives of Civil Engineering*. Vol. 68. № 2. 2022. P. 337–353.

226. Grabiec A.M., Grabiec-Mizera T., Słowek G. Contribution to the knowledge on influence of polypropylene fibres on selected properties of self-compacting concrete. *Architectura*. 2014. 13. P. 5–18.

227. Gribniak V., Kaklauskas G., Bacinskas D. Shrinkage in reinforced concrete structures: A computational aspect. *Civil Engineering and Management*. 14 (1). 2008. P. 49-60.

228. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1920. P. 128–154.

229. Griffith A. A. The theory of rupture. In: *Proceedings of the first International Congress for Applied Mechanics*. Delft. 1924. P. 55–63.

230. Christidis G. E., Hara Papantoni. Synthesis of FAU type zeolite Y from natural raw materials: hydrothermal SiO₂-sinter and perlite glass [Електронний ресурс].

The open mineralogy journal. 2008. T. 2. № 1. P. 1–5.

231. Helbrych P. Effect of dosing with propylene fibers on the mechanical properties of concretes. Construction of Optimized Energy Potential CoOEP. 2021. 10. P. 39–44.

232. High Performance concretes based on Portland cements modified ultrafine supplementary cementitious materials / M. Sanytsky, B. Rusyn, U. Marushchak, I. Kirakevych. Proceedings of the 19th International Conference on Building Materials. Weimar. Germany. 2015. Band 2. P. 1051-1058.

233. High-Strength Concrete Using Ash and Slag Cements / L. Dvorkin, V. Zhitkovsky, V. Marchuk, R. Makarenko. Materials Proceedings. 13 (1). 2023. 16.

234. Huntzinger D.N., Eatmon T.D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: Comparing the traditional process with alternative technologies. J. Clean. Prod. 2009. 17. P. 668–675.

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

236. Hydration Products that Provide Water-Repellency for Portland Cement-Based Waterproofing Compositions and Their Identification by Physical and Chemical Methods / Andrii A. Plugin, Olga S. Borziak, Oleksii A. Pluhin, Tatiana A. Kostuk, Dmytro A. Plugin. International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering EcoComfort 2020: Proceedings of EcoComfort. 2020. P. 328-335.

237. Ince R., Alyamac K. E. Determination of fracture parameters of concrete based on water-cement ratio. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 15. 2008. P. 14–22.

238. Influence of cracks on the safe functioning of building structures / Vyrovoy V., Korobko O., Antoniuk N., Zakorchemny Y. Materials Science Forum MSF. 2021. 1038. P. 383–392.

239. Influence of mix proportions on rheological properties, air content of wet shotcrete - A case study / J. Xie, X. Cui, N. Guo, G. Liu. Applied Sciences. 2021. 11. 3550.

240. Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes / K. Samimi, S. Kamali-Bernard, A.A. Maghsoudi, M. Maghsoudi, H. Siad. *Construction and Building Materials*. 2017. 151. P. 292–311.

241. Influence of PVA and PP fibers addition on the durability and mechanical properties of engineered cementitious composites blended with silica fume and zeolite / H. Emamjomeha, K. Behfarnia, A. Raji, M. Almohammad-albakkar. *Research on Engineering Structures and Materials*. 9. 2023. P. 457–473.

242. Influence of Structural Characteristics on Concrete Strength under Dynamic Effects / A. A. Plugin, O. Palant, D. Plugin, S. Miroschnichenko. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, Ltd. Vol. 968. 2019. P. 368–379.

243. Influence of the percentage of reinforcement by unstressed rebar on the deformability of pre-stressed RC beams / Y. Blikharsky, J. Selejdak, T. Bobalo, R. Khmil, M. Volynets. *Production Engineering Archives*. 27. 2021. P. 212–216.

244. Jamrozy Z. *Beton I jego technologie*. Warszawa. Wydawnictwo naukowe PWN. 2000. 486 s.

245. Jana D. A new look to an old pozzolan, clinoptilolite – a promising pozzolan in concrete. In: *Proceedings of the 29th ICMA conference on cement microscopy*. Quebec City: Curran Associates Inc. 2007. P. 168–206.

246. Jin S., Zhang J., Huang B. Fractal Analysis of Effect of Air Void on Freeze–Thaw Resistance of Concrete. *Construction and Building Materials*. 47. 2013. P. 126–130.

247. Joshi R. C. Fly Ash - Production, Variability and Possible Complete Utilization. *Indian Geotechnical Conference*. 2010. P. 103–111.

248. Kocak Y., Tasci E., Kaya U. The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. *Construction and Building Materials*. 2013. 47:720–27.

249. Kotwa A. Effect of selected admixtures on the properties of ordinary concrete. *Procedia Engineering* 108. 2015. P. 504–509.

250. Koval S., Jakóbczak A., Abid N. Modyfikowanie kompozytów cementowych przez dodatki – kompensatory skurczu. In: *Materiały, instalacje i technologie*

energooszczędne w budownictwie: Międz. konf. Biała Podlaska. 2012. P. 184-189.

251. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Geviuk I. Properties of Portland-composite cements with zeolite tuff. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*. 65(3). 2018. P. 25-34.

252. Kroviakov S., Shestakova L. Influence of basalt fiber and air-entraining admixture on the properties of rigid concrete pavement. *Revista Romana de Materiale*. 53 (2). 2023. P. 170-175.

253. Kumar S. V., Santhanam M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. *Indian Concrete Journal*. 77(9). 2003. P. 1324–1331.

254. Kurdowski W. *Chemia cement i Betonu*. Wyd. Polski Cement. 2010. 728 p.

255. Life cycle greenhouse gas emissions of concrete containing supplementary cementitious materials: cut-off vs. Substitution / A. Arrigoni, D.K. Panesar, M. Duhamel, T. Opher, S. Saxe, I.D. Posen, H.L. MacLean. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 263. 121465.

256. Li G., Zhao X. Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 2003. 25. P. 293–299.

257. Lindvall A., Espin O., Löfgren I. Properties of concretes with pulverized fly ash and ground granulated blast furnace slag, in: *Nordic Miniseminar: Durability Aspects of Fly Ash and Slag in Concrete*. Oslo. Norway, 2012. P. 15–16.

258. Lipiński T. Investigation of corrosion rate of X55CrMo14 stainless steel at 65% nitrate acid at 348 K. *Production Engineering Archives*. 2021. 27. P. 108–111.

259. Lopez M., Kahn L. F., Kurtis K. E. High-strength self-curing low-shrinkage concrete for pavement applications. *International Journal of Pavement Engineering*. 11(5). 2010. P. 333–342.

260. Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R. D. Cement and Concrete Research Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 41(12). 2011. P. 1244–1256.

261. Lukowski P. *Modifikacja materiałowa betonu*. Krakow. Polski cement. 2016. 355 s.

262. Lv Y., Ye G., De Schutter G. 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. 2019. P. 669–676.

263. Mackechnie JR, Alexander MG. Using durability to enhance concrete sustainability. *Journal of Green building*. Vol. 4. 2009. P. 52-60.

264. Ma X., Liu J., Shi C. A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 218. 2019. P. 385–393.

265. Madhuri P.V., Kameswara Rao B., Chaitanya A. Improved performance of concrete incorporated with natural zeolite powder as supplementary cementitious material. *Materials Today Proceedings*. 2021. 47. P. 5369–5378.

266. Malhotra V.M. Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions. In *Concrete technology for a sustainable development in the 21st Century*, Gjorv O. E., Sakai K., Eds.; E&FN Spon: London, 2000. P. 226–235.

267. Malhotra V.M. Introduction: sustainable development and concrete technology. *Concrete International*. 2002. 24. 22.

268. Małolepszy J., Grabowska E. Sulphate attack resistance of cement with zeolite additive. *Procedia Engineering*. 108. 2015. P. 170–176.

269. Mangulkar M., Jamkar S. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 4(5). 2013. P. 143–148.

270. Markiv T., Blikharskyy Z. Effect of Calcium Nitrate-Based Admixture on the Strength of Concrete and Corrosion Susceptibility of Reinforcing Steel Bars // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Vol. 290. P. 253–261.

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

272. Markiv T. Properties of fresh and hardened mortars with air-entraining agent. *Theory and Building Practice*. № 2. 2022. P. 105–110.

273. Markiv T., Turba Yu., Solodkyy S. The influence of polypropylene fibres on

fracture parameters of concrete. IBAUSIL. 20 Internationale Baustofftagung. – Weimar (Germany). 2018. Band 2. P. 923-929.

274. Mechanical activation of granulated furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement / S. Kumar, R. Kumar, A. Bandopadhyay, A.C. Alex, B.R. Kumar, S.K. Das, S. P. Mehrotra. *Cement and Concrete Composites*. 2008. 30. P. 679-685.

275. Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite / T. Markiv, K. Sobol, M. Franus, W. Franus. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 16(4). P. 554–562.

276. Mechanical and Fracture Properties of Air-Entrained FRC Containing Zeolitic Tuff / Z. Blikharskyy, T. Markiv, Y. Turba, O. Hunyak, Y. Blikharskyy, J. Selejdak. *Applied Sciences*. 2023. 13(16). 9164.

277. Mehta K. P. Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete international*. 23(10). 2001. P. 61-66.

278. Mehta P.K. High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. In *Proceedings of the international workshop on sustainable development and concrete technology*, Wang, K., Eds.; Ames : Center for Transportation Research and Education, Iowa State University. Beijing, China. P. 3–14.

279. Mel'nyk I.V. Stress-Strain State of the Fragments of Armored Monolithic Floors with Tubular Inserts. *Materials Science*. 52 (2). 2016. P. 269-279.

280. Menéndez G., Bonavetti V., Irassar E.F. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 2003. 25. P. 61-67.

281. Metakaolin and Fly Ash as Mineral Admixtures for Concrete / L. Dvorkin, V. Zhitkovsky, N. Lushnikova, Y. Ribakov // CRC Press. 2021.

282. Microstructural verification of the strength performance of ternary blended cement systems with high volumes of fly ash and GGBFS / Y. Jeong, H. Park, Y. Jun, J.-H. Jeong, J.E. Oh. *Construction and Building Materials*. 2015. 95. P. 96–107.

283. Miller S.A., Horvath A., Monteiro P.J. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. *Environmental*

Research Letters. 2016. 11. 074029.

284. Mishutin A.V., Chintea L. The effect of modified additives on strength and frost resistance in fibrous concrete of rigid road pavements. Вісник ОДАБА. 2020. №80. С. 64-74.

285. Mlonka-Mędrala A. Recent findings on fly ash-derived zeolites synthesis and utilization according to the circular economy concept [Електронний ресурс]. Agata Mlonka-Mędrala. Energies. 2023. 16 (18). 6593.

286. Mobasher B. Mechanics of fiber and textile reinforced cement composite. New York: CRC Press. 2011. 452 p.

287. Mohan Krishna T., Prafulla Devi K. Internal curing efficiency of pre-wetted lightweight fine aggregates on strength parameters of concrete. International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019.

288. Naaman A.E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement composites. Journal of advanced concrete technology. 2003. №1. P. 241-252.

289. Nagrockiene D., Girskas G. Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition. Construction and Building Materials. 113. 2016. P. 964–969.

290. Nagrockiene D., Girskas G., Skripkiunas G. Cement freezing-thawing resistance of hardened cement paste with synthetic zeolite. Construction and Building Materials. 66. 2014. P. 45–52.

291. Nas M., Kurbetci S. Mechanical, durability and microstructure properties of concrete containing natural zeolite. Computers and Concrete. 22. 2018. P. 449–459.

292. Natural zeolite and its application in concrete composite production / Y. T. Tran, J. Lee, P. Kumar, K. H. Kim, S. S. Lee. Composites Part B: Engineering. 165. 2019. P. 354–364.

293. Neville A. M., Brooks J. J. Concrete technology. England: Longman Scientific & Technical. 1987.

294. Neville A.M. Wlasciwosci betonu. Krakow: Wydanie 4. 2000. 874 s.

295. Nowak-Michta A. Impact analysis of air-entraining and superplasticizing admixtures on concrete compressive strength. Procedia Structural Integrity. 23. 2019. P.

77–82.

296. Ouyang X., Guo Y., Qiu X. The feasibility of synthetic surfactant as an air entraining agent for the cement matrix. *Construction and Building Materials*. 22 (8). 2008. P. 1774–1779.

297. Pal S.C., Mukherjee A., Pathak S.R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003. 33. P. 1481–1486.

298. Peculiarities of hydration processes of cements containing natural zeolite / Kh. Sobol, T. Markiv, V. Terlyha, W. Franus / *Budownictwo i Architektura*. 2015. T. 14. № 1. P. 105–113.

299. Performance of Concrete with Fly Ash and Kaolin Inclusion / A. Ghais, D. Ahmed, E. Siddig, I. Elsadig, S. Albager. *International Journal of Geosciences*. 5. 2014. P. 1445-1450.

300. Performance of multicomponent Portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite, and limestone / M. Sanytsky, A. Usherov-Marshak, T. Kropyvnytska, I. Heviuk. *Cement-Wapno-Beton. Cement Lime Concrete*. 25(5). 2021. P. 416-427.

301. Pigeon M., Pleau R. *Durability of concrete in cold climates*, first ed., E. & F. N. Spon, London, United Kingdom. 1995.

302. Pleau R., Pigeon M. *Durability of concrete in cold climates*. CRC Press. 2014.

303. Polat R., Demirboga R., Khushefati W. H. 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*. 2015.

304. Polder R. Effects of slag and fly ash on reinforcement corrosion in concrete in chloride Environment - research from the Netherlands. *Heron* 57. 3. 2012. P. 197-210.

305. Poon C.S., Lam L., Wong Y.L. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*. 2000. 30. P. 447-455.

306. Poursae A. *Corrosion of steel in concrete structures*. Woodhead Publishing, 2016.

307. Pozzolanic activity of clinoptilolite: a comparative study with silica fume, fly

ash and a non-zeolitic natural pozzolan / B. Uzal, L. Turanlı, H. Yücel, M.C. Göncüoğlu, A. Çulfaz. *Cement and Concrete Research*. 40. 2010. P. 398–404.

308. Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity / G. Mertens, R. Snellings, K. Van Balen, B. Bicer-Simsir, P. Verlooy, J. Elsen. *Cement and Concrete Research*. 39(3). 2009. P. 233-240.

309. Production of an eco-friendly concrete by including high-volume zeolitic supplementary cementitious materials and quicklime / D. Vaičiukynienė, D. Nizevičienė, A. Kantautas, G. Tamošaitis, I. V. Fornés, P. Krivenko, O. Boiko. *Scientific Reports*. 14(1). 2024. 188.

310. Production of environmentally friendly cements using synthetic zeolite catalyst as the pozzolanic material [Электронный ресурс] / Edris M. Hassan [та ін.] // *Clean technologies and environmental policy*. 2019. Т. 21. № 9. P. 1829–1839.

311. Properties and microstructure of roller compacted concrete with high volume low quality fly ash / S. Liu, Q. Li, M. Rao, and L. Wang. *Medziagotyra*, vol. 23. № 3. 2017.

312. Properties of Concretes Incorporating Recycling Waste and Corrosion Susceptibility of Reinforcing Steel Bars / Z. Blikharskyy, K. Sobol, T. Markiv, J. Selejdak. *Materials*. 14(10). 2021. 2638.

313. Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement / B. Yılmaz, A. Uçar, B. Öteyaka, V. Uz. *Building and Environment*. 42. 2007. P. 3808–3815.

314. Ramachandran V. *Concrete Admixtures Handbook*. Noyes Publications. New Jersey. 1995. 1111 p.

315. Rao G. A., Prasad B. K. R. Fracture energy and softening behavior of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 32(2). 2002. P. 247–252.

316. Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution [Электронный ресурс] / Nan Su [та ін.]. *Cement and concrete research*. 2000. Т. 30. № 11. P. 1773–1783.

317. Rheological behaviour of fresh cement pastes: Influence of synthetic zeolites, limestone and silica fume [Электронный ресурс] / Noemi Baldino [та ін.]. *Cement and Concrete Research*. 2014. Т. 63. P. 38–45.

318. Rivera R.A., Sanjuán M.Á., Martín D.A. Granulated Blast-Furnace Slag and

Coal Fly Ash Ternary Portland Cements Optimization. *Sustainability*. 12. 2020. 5783.

319. Rovnaníková P., Schmid P., Keršner Z. Effect of cement replacement by zeolite on the basic mechanical fracture properties of concrete: A parametric study. *Advance Materials Research*. 969. 2014. P. 140–143.

320. Runova R., Rudenko I., Konstantinovsky A. Influence of chemical admixtures on characteristics of heat-corrosion resistant masonry mortars based on slag alkaline cements. 18 Ibausil Weimar. 2012. P. 1087- 1101.

321. Saafan M.A., Etman Z.A., El lakany D.M. Microstructure and Durability of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Mortars. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*. 2020.

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

323. Samad S., Shah A. Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: A critical review. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2017. 6. P. 663-674.

324. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Ivashchyshyn H. Sustainable modified pozzolanic supplementary cementitious materials based on natural zeolite, fly ash and silica fume. In *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. Vol. 1254. № 1. 2023. P. 012004.

325. Saraswathy V., Song H.W. Effectiveness of fly ash activation on the corrosion performance of steel embedded in concrete. *Magazine of Concrete Research*. 59 (9). 2007. P. 651–661.

326. Saucier F.J., Pigeon M., Cameron G. Air-Void Stability. Part V: Temperature, General Analysis, and Performance. Index. *ACI Materials Journal*. 88. 1991. P. 25-36.

327. Scharff H. Landfill reduction experience in The Netherlands. *Waste Management*. 2014. 34. P. 2218–2224.

328. Simultaneous DSC and TG analysis of high-performance concrete containing natural zeolite as a supplementary cementitious material / A. Trník, L. Scheinherrová, I.

Medved', R. Černý. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. 121. P. 67–73.

329. Smarzewski P. Fresh and Mechanical Properties of High-Performance Self-Compacting Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag and Polypropylene Fibres. *Applied Sciences*. 13(3). 2023.

330. 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*, 2(12). 2017. P. 95-100.

331. Song H.-W., Saraswathy V. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag – an overview. *Journal of Hazardous Materials*. 2006. B138:226–33.

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

333. Stechyshyn M., Sanytsky M., Poznyak O. Durability properties of high volume fly ash self-compacting fiber reinforced concretes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3. 2015. P. 49-53.

334. Stevulova N., Mezencevova A. Fly ash as a raw material in cement industry. *Scientifical proceedings of Resovia polytechnick, Building and environmental engineering, part 2 – Environmental Engineering*. 2004. 37. 407.

335. Storchai N.S., Savin Yu.L. Use of ilmenite ore enrichment wastes in the production of portland cement clinker. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2022, № 5, P. 110-114.

336. Structural behavior of RC beams containing EAF slag as recycled aggregate: numerical versus experimental results / D.D. Domenico, F. Faleschini, C. Pellegrino, G. Ricciardi. *Construction and Building Materials*. 171. 2018. P. 321-337.

337. Strength, frost resistance, and resistance to acid attacks on fiber-reinforced concrete for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fibers / Ž. Kos, S. Kroviakov, V. Kryzhanovskyi, D. Hedulian. *Materials*, 15(23). 2022. 8339.

338. Struble L.J., Jiang Q. Effects of Air Entrainment on Rheology. *ACI Materials Journal*. 101. 2004. P. 448-456.

339. Study of low-emission multi-component cements with a high content of

supplementary cementitious materials / H. Ivashchyshyn, M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, B. Rusyn. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 4. 2019. P. 39-47.

340. Study of the fracture surface of concretes reinforced with basalt fiber coated with titanium and zirconium dioxides. Fiber-reinforced concrete composites / V. Gots, O. Berdnyk, A. Maystrenko, P. Palchik, N. Amelina. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1164. No. 1. 2021. p. 012011. IOP Publishing.

341. Sujjavanich S., Wongtanasarasin C., Kongkachuichay P. Effect of synthetic and natural zeolite on ASR expansion [Електронний ресурс]. Engineering journal. 2017. Т. 21. № 2. P. 269–278.

342. Sun Z., Scherer G.W. Effect of air voids on salt scaling and internal freezing, Cement and Concrete Research. 40. 2010. P. 260-270.

343. Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete /A.M. Lypez-Buendha,, M. D. Romero-Sanchez, V. Climent, C. Guillem. Cement and Concrete Research. 2013. № 54. p. 29-35.

344. Sustainable concretes containing supplementary cementitious materials / B. Rusyn, M. Sanytsky, J. Szymanska, I. Geviuk. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. IX Miedzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Chestochowa. 2012. №1. P. 95–102.

345. Synthesis of the zeolites on the lightweight aluminosilicate fillers [Електронний ресурс] / W. Pichór [та ін.]. Materials research bulletin. 2014. Т. 49. P. 210–215.

346. Tan K., Pu X. Strengthening effects of finely ground fly ash, granulated blast furnace slag, and their combination. Cement and Concrete Research. 1998. 28. P. 1819–1825.

347. Taylor R., Richardson I.G., Brydson R.M.D. Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement–ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag. Cement and Concrete Research. 2010. 40. P. 971-983.

348. Tebbal N., El Abidine Rahmouni Z., Rabiaa Chadi L. Study of the Influence of an Air-Entraining Agent on the Rheology of Mortars, MATEC Web Conf. 149. 2018. 01054.

349. The durability properties of concrete incorporating zeolitic tuff / Z. Blikharsky, Kh. Sobol, T. Markiv, O. Pozniak, W. Franus. Proceedings of the 9th Croatian-Slovenian-Serbian Symposium on Zeolites. Split (Croatia), 2021. P. 27-30.

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

351. The effect of air-entraining agent on the properties of mortars / Z. Blikharsky, T. Markiv, Kh. Sobol, Y. Turba, J. Selejdak. Archives of civil engineering. 2023. Vol. 69. № 3. P. 147-156.

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

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

354. The effect of structural characteristics on electrical and physical properties of electrically conductive compositions based on mineral binders / O. Pluhin, A. Plugin, D. Plugin, O. Borziak, O. Dudin. 6th International Scientific Conference on Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings. MATEC Web Conferences TransBud. Kharkiv. Ukraine. Volume 116. 2017. 01013.

355. The effect of zeolitic tuff on structure formation and properties of cements / T. Markiv, W. Franus, Kh. Sobol, Z. Blikharsky. IBAUSIL. 19 Internationale Baustofftagung. Weimar (Germany). 2015. Band 2. P. 415-422.

356. The effect of zeolitic tuff on the properties of concretes / T. Markiv, Kh. Sobol, O. Hunyak, M. Franus, W. Franus. The 10th International conference „The occurrence, properties and utilization of natural zeolites”. Cracow, 2018. P. 153-154.

357. The influence of complex additive on strength and proper deformations of alkali-activated slag cements / P. Krivenko, O. Petropavlovskyi, I. Rudenko, O. Konstantynovskyi. Materials Science Forum 2019, 968, P. 13–19.

358. The morphology of entrained air voids in hardened cement paste generated with different anionic surfactants / H.N. Atahan, Jr. C. Carlos, S. Chae, P.J.M. Monteiro, J. Bastacky. *Cement and Concrete Composites*. 30 (7). 2008. P. 566–575.

359. The optimization of aggregate blends for sustainable low cement concrete / M. Moini, I. Flores-Vivian, A. Amirjanov, K. Sobolev. *Construction and Building Materials*. 93. 2015. P. 627–634.

360. The physical and chemical characteristics of the shell of air-entrained bubbles in cement paste / M. T. Ley, R. Chancey, M. C. G. Juenger, K. J. Folliard. *Cement and Concrete Research*. vol. 39. № 5. P. 417–425.

361. The possibility of self-curing concrete / V. Bilek, Z. KerÅ;ner, P. Schmid, T. Mosler. In: Dhir, Hewlett, Csetenyi, editors. *Innovations and developments in concrete materials and construction. Proceedings of international conference, Dundee, Scotland, UK. 2002, vol. 1. Thomas Telford. 2002. P. 51.*

362. The strength effects of synthetic zeolites on properties of high performance concrete [Електронний ресурс] / P. Frontera [та ін.]. *High performance structures and materials*. 2006.

363. Tomporowski D., Markiv T. Analysis of environmental consequences occurring in the life cycle of a retail facility. *Budownictwo i Architektura*. 2022. T. 21 (4). P. 5–12.

364. Topçu I., Boğa A. Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete. *Materials and Design*. 31. 2010. P. 3358–3365.

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

366. Transport properties and durability of concrete: literature review and research plan / D. P. Bentz, J. R. Clifton, C. F. Ferraris, E. J. Garboczi, J. M. Torrents. (No. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)-6395). 1999.

367. Tunstall L. E., Ley M. T., Scherer G. W. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions. *Cement and Concrete Research*. vol. 150. 2021. 106557.

368. Turba Y., Solodkyy S., Markiv T. Strength and fracture toughness of cement concrete, dispersedly reinforced by combination of polypropylene fibers of two types. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. P. 488–494.

369. Ugur Ozturk A., Tugrul Erdem R. Influence of the air-entraining admixture with different superplasticizers on the freeze-thaw resistance of cement mortars. *Romanian journal of materials*. 46. 2016. P. 75–81.

370. Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements / T. K. Erdem, Ç. Meral, M. Tokyay, T. Y. Erdoğan. *Cement and Concrete Composites*. 29 (1). 2007. P. 13–21.

371. Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production / F. Canpolat, K. Yılmaz, M. Kose, M. Sumer, MA. Yurdusev. *Cement and Concrete Research*. 2004. 34:731–735.

372. Vyrovoy V., Sukhanov V., Sukhanova S. Interaction of deformations and the structure of composites. *AIP Conference Proceedings*. 2023. 2840 (1). 030009.

373. Wei Y., Wang Y., Gao X. 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). 2015. P. 355-364.

374. Wen C., Chen J., Liu Q. Research on Influence of Zeolite Powder on Internal Humidity and Autogenous Shrinkage of Self-Compacting concrete. 121 (*Icammce*). 2017. P. 195–200.

375. Yeau K., Kim E. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*. 2005. 35:1391–9.

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

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

378. Zaroudi M., Madandoust R., Aghaee K. Fresh and hardened properties of an eco-friendly fiber reinforced self-consolidated concrete composed of polyolefin fiber and natural zeolite. *Construction and Building Materials*. 241. 2020. 118064.

379. Zhutovsky S., Kovler K., Bentur A. 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, 2002. P. 161-173.

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

381. Zollo R.F. Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*. 19. 1997. P. 107–122.

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, що входять до наукометричних баз даних, та наукових періодичних виданнях інших держав:

1. Peculiarities of hydration processes of cements containing natural zeolite / Kh. Sobol, T. Markiv, V. Terlyha, W. Franus. *Budownictwo i Architektura*. 2015. T. 14. № 1. P. 105–113 (Index Copernicus).
2. Effect of Natural Zeolite and Air-Entraining Agent on the Properties of High Strength Concretes / Z. Blikharskyy, S. Solodkyy, O. Pozniak, T. Markiv. *Regional Barometer. Analyses & Prognoses*. 13(2). 2015. P. 137-138 (Index Copernicus).
3. Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite / T. Markiv, K. Sobol, M. Franus, W. Franus. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 16(4). P. 554–562 (SCOPUS, Q1).
4. Fracture properties of high-strength concrete obtained by direct modification of structure / S. Solodkyy, T. Markiv, K. Sobol, O. Hunyak [Електронний ресурс]. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116 (SCOPUS).
5. The effect of natural pozzolans on properties of vibropressed interlocking concrete blocks in different curing conditions / O. Hunyak, K. Sobol, T. Markiv, V. Bidos. *Production Engineering Archives*. 2019. Vol. 22. P. 3–6 (SCOPUS, Q2).
6. Turba Y., Solodkyy S., Markiv T. Strength and fracture toughness of cement concrete, dispersedly reinforced by combination of polypropylene fibers of two types. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. P. 488–494 (SCOPUS, Q4).
7. Effect of plasticizing and retarding admixtures on the properties of high strength concrete / T. Markiv, S. Solodkyy, K. Sobol, D. Rachidi. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 100. P. 286–293 (SCOPUS, Q4).
8. Properties of concretes incorporating recycling waste and corrosion susceptibility of reinforcing steel bars / Z. Blikharskyy, K. Sobol, T. Markiv, J. Selejdak. *Materials*. 2021. Vol. 14(10). 2638 (SCOPUS, Q2).
9. Tomporowski D., Markiv T. Analysis of environmental consequences occurring in the life cycle of a retail facility. *Budownictwo i Architektura*. 2022. T. 21

(4). P. 5–12 (Index Copernicus).

10. Markiv T., Blikharskyy Z. Effect of Calcium Nitrate-Based Admixture on the Strength of Concrete and Corrosion Susceptibility of Reinforcing Steel Bars. Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Vol. 290. P. 253–261 (SCOPUS, Q4).

11. The effect of air-entraining agent on the properties of mortars / Z. Blikharskyy, T. Markiv, Kh. Sobol, Y. Turba, J. Selejdak. Archives of civil engineering. 2023. Vol. 69. № 3. P. 147-156. (SCOPUS, Q3).

12. Mechanical and Fracture Properties of Air-Entrained FRC Containing Zeolitic Tuff / Z. Blikharskyy, T. Markiv, Y. Turba, O. Hunyak, Y. Blikharskyy, J. Selejdak. Applied Sciences. 2023. 13(16). 9164. (SCOPUS, Q1).

Статті у наукових фахових виданнях України:

13. Будівельні розчини з мікроармувальними добавками / Т. Є. Марків, Х. С. Соболю, Т. П. Кропивницька, П. В. Новосад. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2007. № 602. С. 139–143.

14. Концепція одержання низькоенерговмісних цементів / Т.Є. Марків, У.Д. Марущак, М.А. Саницький, Х.С. Соболю, Ю.Л. Новицький. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2009. № 655. С. 170-178.

15. Модифіковані малоенергоємні цементи для будівельних розчинів і бетонів / Т. Є. Марків, Т. П. Кропивницька, М. В. Штурмай, Б. В. Федунь. Будівельні конструкції, міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. п-во «Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій». Київ: НДІБК, 2009. Вип. 72. Сучасні технології бетону: зб. наук. пр. С. 216–222.

16. Модифіковані бетони з поліпшеними експлуатаційними властивостями / Т. Є. Марків, П. В. Новосад, О. П. Новосад, І. В. Саїв. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2010. № 664. С. 93–97.

17. Саницький М., Кропивницька Т., Марків Т. Мікроструктура та міцність будівельних розчинів з комплексними модифікаторами. Будівельні

матеріали та вироби. 2010. № 1 (60). С. 6–9.

18. Саницький М. А., Марків Т. Є., Круць Т. М. Волокнистоцементні вироби на основі портландцементу, одержаного з використанням вторинних паливних матеріалів. Будівельні матеріали та вироби. 2011. № 4 (69). С. 2–7.

19. Модифіковані бетони на основі портландцементу композиційного ПЦ II/Б-К (Ш-3)-400 / Т. Є. Марків, У. Д. Марушак, С. В. Міхін, О. О. Серкіз. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2013. Вип. 26. С. 286–291.

20. 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.

21. Гуняк О.М., Соболю Х.С., Марків Т.Є. Оптимізація складів спеціальних цеолітовмісних портландцементів. Містобудування та територіальне планування. 2014. Вип. 54. С. 139–143.

22. Солодкий С.Й., Марків Т.Є., Холод Т.П. Способи регулювання тріщиностійкості високоміцних бетонів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, зб. наук. пр. Рівне [б. в.], 2015. Вип. 31. С. 357–362.

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

24. Солодкий С.Й., Гуняк О.М., Марків Т.Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : наук.-техн. зб. Київ, 2016. Вип. 98. С. 247–255.

25. Активність полідисперсних мінеральних компонентів та їх роль у формуванні структури та міцності цементів / Х. С. Соболю, Т. Є. Марків, Н. І. Петровська, О. М. Гуняк. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 175–182.

26. Markiv T. Properties of fresh and hardened mortars with air-entraining agent. Theory and Building Practice. 2022. Volume 4(2). P. 105-110.

Патенти:

27. Пат. 154932 Україна. Спосіб одержання зв'язуючого / З. Я. Бліхарський, Х. С. Соболев, Т. Є. Марків, О. М. Гуняк. u 202302590; опубл. 03.01.2024, Бюл. № 1. 4 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

28. Модифіковані будівельні розчини з мікроармуючими і хімічними добавками / Т. Є. Марків, Х. С. Соболев, Т. П. Кропивницька, В. А. Пристай, Р. А. Солтисік. I науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2007. С. 13-15.

29. Марків Т.Є., Кропивницька Т.П. Модифіковані будівельні розчини нової генерації. II науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2008. С. 43.

30. Саницький М. А., Соболев Х. С., Марків Т. Є. Модифіковані композиційні цементи. Навч. посіб. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2010. 132 с.

31. Саницький М.А., Марків Т.Є., Русин Б.Г. Вплив лужних компонентів на компатибільність портландцементів з хімічними та мінеральними добавками. XII Міжнародна науково-практична конференція «Дні сучасного бетону». Будіндустрія ЛТД. Запоріжжя, 2012. С. 51-57.

32. The effect of zeolitic tuff on structure formation and properties of cements / T. Markiv, W. Franus, Kh. Sobol, Z. Blikharskyu. IBAUSIL. 19 Internationale Baustofftagung. Weimar (Germany). 2015, Band 2. P. 415-422.

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

34. Марків Т. Є., Соболев Х. С., Гуняк О. М. Цеолітовмісні цементи для бетонів транспортного призначення. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2016. С. 97-99.

35. 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, 2(12). 2017. P. 95-100.

36. Markiv T., Turba Yu., Solodkyy S. The influence of polypropylene fibres on fracture parameters of concrete. IBAUSIL. 20 Internationale Baustofftagung. Weimar (Germany), 2018. Band 2. P. 923-929.

37. The effect of zeolitic tuff on the properties of concretes / T. Markiv, Kh. Sobol, O. Hunyak, M. Franus, W. Franus. The 10th International conference „The occurrence, properties and utilization of natural zeolites”. Cracow, 2018. P. 153-154.

38. Турба Ю.В., Марків Т.Є., Солодкий С.Й. Вплив дисперсного армування поліпропіленовими фібрами на тріщиностійкість дорожніх бетонів. Матеріали міжнародного семінару “Моделювання і оптимізація будівельних композитів”. Одеса, 2018. С. 119-121.

39. The durability properties of concrete incorporating zeolitic tuff / Z. Blikharskyu, Kh. Sobol, T. Markiv, O. Pozniak, W. Franus. Proceedings of the 9th Croatian-Slovenian-Serbian Symposium on Zeolites. Split (Croatia), 2021. P. 27-30.

Відомості про апробацію результатів дисертації

XII Міжнародна науково-практична конференція «Дні сучасного бетону» (Запоріжжя, 2012) - заочна участь.

19 Internationale Baustofftagung (Веймар, Німеччина, 2015) - заочна участь.

Міжнародна науково-практична конференція (Харків, 2015) – заочна участь.

I-III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів» (Львів, 2007, 2008, 2016) - очна участь.

VI Міжнародна конференція SICA по бетонам (Київ, 2016) – заочна участь.

XVI International scientific conference in Košice, Lviv, Rzeszów (Кошице, Словаччина, 2017) – заочна участь.

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

10th International conference „The occurrence, properties and utilization of natural zeolites” (Краків, Польща, 2018) - очна участь.

Міжнародний семінар “Моделювання і оптимізація будівельних композитів”

(Одеса, 2018) – заочна участь.

International Conference “Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv – Košice – Rzeszów” (Львів, 2019) - очна участь.

9th Croatian-Slovenian-Serbian Symposium on Zeolites (Спліт, Хорватія, 2021) – очна участь.

II, III International Scientific Conference “EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering” (Львів, 2020, 2022) - очна участь.

ДОДАТОК Б

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

На ТзОВ «Угринів Еко Ферм» в період жовтень-листопад 2022 р. проведено бетонування ванни в свинарнику з використанням бетонів з підвищеною міцністю В30 (С25/30), корозійною стійкістю та тріщиностійкістю, одержаних оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях, в кількості 200 м³. Бетони з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю розроблено у Національному університеті «Львівська політехніка» доцентом Марківим Тарасом Євгеновичем (договір № 875-2022 від 11.01.2022 р. між ПП «Застава» та НУ «Львівська політехніка») за алгоритмом багатопараметричного проектування з врахуванням оптимізації технологічних факторів на різних структурних рівнях ПП «Застава». Використання сучасних підходів при проектуванні складів дисперсноармованих бетонів з підвищеною міцністю, а саме використання додаткових цементуючих матеріалів з необхідними основним і додатковим ефектами та хімічних добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії дає змогу підвищити корозійну стійкість та тріщиностійкість бетонів як в докритичній, так і на закритичній стадіях, забезпечуючи зростання довговічності.

Директор

ТзОВ «Угринів Еко Ферм»



Тарас ГУЗІЧ

№ п/п	Назва	Вид	Місце	Кількість	Вартість	Відомості

№ п/п	Назва	Вид	Місце	Кількість	Вартість	Відомості

ДОДАТОК В

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Директор
ПП “Застава”
10 2023 р.



А К Т

про впровадження бетону з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю,
одержаного оптимізацією технологічних факторів
на різних структурних рівнях”

Ми, директор ПП «Застава» Прокопович Б.З. та представники Національного університету “Львівська політехніка” д.т.н., професор Бліхарський З.Я., к.т.н, доцент Марків Т.Є., склали даний акт про те, що в період серпень-вересень 2023 при будівництві площадки для складування бетонних виробів використано бетон з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю БСГ В40Р4F200W10 в кількості 30 м³.

Для одержання бетону використовували портландцемент ПЦ П/А-Ш-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент», полідисперсний цеолітовий компонент, кварцовий пісок (Mк=1,8) Жовківського родовища, щебінь фракції 5-20 мм. Для забезпечення підвищеної рухливості, проектної марки за морозостійкістю використовували пластифікатор ТзОВ «Сіка Україна» МG 45% і повітровтягувальну добавку Sika Mix Plus та поліпропіленову фібру для підвищення тріщиностійкості.

Бетонна суміш, яка поступала на будівельний майданчик мала такі характеристики:

- марка за легкоукладальністю за показником рухомості Р4 (ОК=16-20 см);
- об'єм втягнутого повітря – 5-6%;

- розшаровуваність бетонної суміші задовольняє вимоги ДСТУ Б В.2.7-96-2000 (водовідділення відсутнє, розчиновідділення важкого бетону $Pr=0,5\%$).

Важкий бетон характеризувався класом за міцністю на стиск В40 і марками за морозостійкістю F200 та водонепроникністю W10.

Характеристики одержаних бетонів наведені в таблиці.

Таблиця

Показник якості бетонів

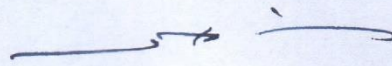
Основні показники	Значення
Рухомість	170-190
Марка за легкоукладальністю	P4
Границя міцності при стиску через 28 діб, МПа	52,6
Клас бетону за міцністю на стиск	B40

Одержані результати показали, що оптимізація технологічних факторів на різних структурних рівнях дозволяє одержати бетони з підвищеними експлуатаційними властивостями та тріщиностійкістю ($G_F=373$ Н/м, $\chi^c_F=185$ мм).

Акт підписали:

Представники Національного університету «Львівська політехніка»

професор, д.т.н.



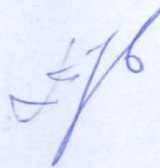
Бліхарський З.Я.

професор, д.т.н.



Соболь Х.С.

к.т.н., доцент



Марків Т.Є.

ДОДАТОК Г

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор

ПП «Захід-Бетон-Буд»



Вікович Т.Г.

40 2023 р.

А К Т

про впровадження результатів дисертаційної роботи
доцента Марківа Т.Є. на тему “Наукові засади отримання бетонів з підвищеною
тріщиностійкістю за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях”

Ми, що нижче підписалися, представник підприємства ПП «Захід-Бетон-Буд»
майстер виробництва Горак С.В. та представники Національного університету
“Львівська політехніка”, д.т.н., професор Бліхарський З.Я. та доцент Марків
Т.Є., склали даний акт про те, що у вересні 2023 при будівництві під’їзної
дороги до складських приміщень у с. Малехів Львівської ОТГ використано
бетон з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю БСГ С32/40 S4 F200 W10 в
кількості 82 м³.

Для одержання бетону використовували портландцемент ПЦ Ш/А-Ш-500Р-Н
ПрАТ «Івано-Франківськцемент», полідисперсний цеолітовий компонент,
кварцовий пісок (Mк=1,6) Розвадівського родовища, щебінь фракції 5-10 та 10-
20 мм виробництва ТОВ «Технобуд». Для забезпечення підвищеної рухливості
і проектної марки за морозостійкістю використовували суперпластифікатор
ТЗОВ «Сіка Україна» SikaPlast 3050 R Plus і повітровтягувальну добавку Sika

та поліпропіленову фібру різних типів (мікро- і макрофібра з деформованою поверхнею) для підвищення тріщиностійкості.

Характеристики одержаних бетонів наведені в таблиці.

Таблиця

Показники якості бетонів

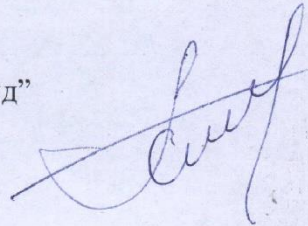
Основні показники	Осадка конуса	Марка за легкоукладальністю	Границя міцності при стиску через 28 діб, МПа	Клас бетону за міцністю на стиск
Значення	180-200	P4	50,9	C32/40

Одержані результати свідчать, що оптимізація технологічних факторів на різних структурних рівнях дає змогу одержати бетони з підвищеними експлуатаційними властивостями та тріщиностійкістю ($G_F=350$ Н/м, $\chi^c_F=176$ мм).

Акт підписали:

Представник ПП "Захід-Бетон-Буд"

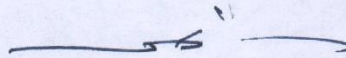
майстер виробництва



Горак С.В.

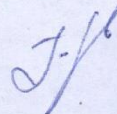
Представники НУ «Львівська політехніка»

Д.т.н., професор



Бліхарський З.Я.

к.т.н., доцент



Марків Т.Є.

ДОДАТОК Д

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор

Представництва “Дрог-Буд” Сп. з о.о.

П'ятак В.А.



08 2023 р.

А К Т

про впровадження бетону з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю,
одержаного оптимізацією технологічних факторів
на різних структурних рівнях”

Ми, що нижче підписалися, інженер-будівельник з нагляду за будівництвом Представництва “Дрог-Буд” Сп. з о.о. Багрій В.І. та Національного університету “Львівська політехніка” д.т.н., професор Бліхарський З.Я., к.т.н., доцент Марків Т.Є. склали даний акт про те, що в період червень-серпень 2023 при будівництві мостового переходу с. Корчів використано бетон з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю БСГ В35Р4F200W6, виготовлений ПП “Застава” в кількості 116 м³.

Бетонна суміш, яка поступала на будівельний майданчик мала такі характеристики:

- марка за легкоукладальністю за показником рухомості Р4 (ОК=16-20 см);
- об'єм втягнутого повітря – 4-5%;
- розшаровуваність бетонної суміші задовольняє вимоги ДСТУ Б В.2.7-96-2000 (водовідділення відсутнє, розчиновідділення важкого бетону Пр=1%).

Важкий бетон характеризувався класом за міцністю на стиск В35і марками за морозостійкістю F200та водонепроникністю W6.

Характеристики одержаних бетонів наведені в таблиці.

Таблиця

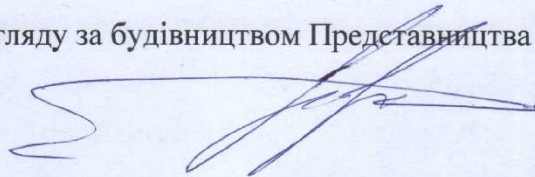
Показник якості бетонів

Основні показники	Значення
Рухомість	170-190
Марка за легкоукладальністю	P4
Границя міцності при стиску через 28 діб, МПа	45,7
Клас бетону за міцністю на стиск	B35

Одержані результати показали, що оптимізація технологічних факторів на різних структурних рівнях дозволяє одержати бетони з підвищеними експлуатаційними властивостями та тріщиностійкістю ($G_F=350$ Н/м, $\chi^c_F=176$ мм).

Акт підписали:

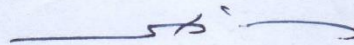
інженер-будівельник з нагляду за будівництвом Представництва “Дрог-Буд”
Сп. з о.о.



Багрій В.І.

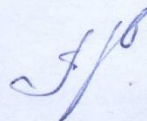
Представник Національного університету «Львівська політехніка»

професор, д.т.н.



Бліхарський З.Я.

к.т.н., доцент



Марків Т.Є.

ДОДАТОК Е

”ЗАТВЕРДЖУЮ”



Генеральний директор

ТОВ «Автомагістраль-Південь»

Гимфеев М.С.

А К Т

про впровадження бетону з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, одержаного оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях

Ми, нижче підписані, представник ТОВ «Автомагістраль-Південь» виконроб Дукельський Н.Т. та представники Національного університету “Львівська політехніка” д.т.н., професор Бліхарський З.Я., к.т.н., доцент Марків Т.Є., склали даний акт про те, що у період листопад 2023 р. - січень 2024 р. використано бетонні суміші з проектними марками за легкоукладальністю Р3 та Р4, класом за міцністю на стиск В30 (С25/30), маркою за морозостійкістю F200 та водонепроникністю W6 для бетонування монолітних стійок опор, ростверків, підферменників, ригелів, буронабивних паль при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693. Для приготування бетонних сумішей застосовували портландцемент ПЦ П/А-Ш-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент» з додатковими цементуючими матеріалами, повітровтягувальну та сильнопластифікуючу добавки з протиморозним ефектом. Як заповнювачі використано кварцовий пісок Старо-Скварявського родовища ($M_{кр}=1,9$), гранітний щебінь Клесівського кар’єру фракції 5-20 мм. Загальний об’єм виготовленого бетону склав 580 м³.

Бетонування і тверднення бетонів відбувалося в діапазоні температур -10...+3 °С. Основними технологічними завданнями при бетонуванні були забезпечення відсутності розшаровуваності бетонної суміші, досягнення необхідного об’єму втягнутого повітря (4-6%), критичної ранньої (в умовах знакозмінних та від’ємних температур) та проектної міцностей, марок за морозостійкістю та водонепроникністю. У результаті випробувань (таблиця) бетонів (марка за легкоукладальністю Р3) середня міцність при стиску через 2 доби в нормальних умовах тверднення становить 25,1 МПа, а через 28 діб

тверднення – 44,0 МПа, а для марки за легкоукладальністю Р4 через 2 та 28 діб відповідно становить 23,3 та 44,1 МПа.

Таблиця

Результати випробувань бетону
з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю

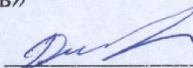
Найменування показника		Значення показника		
		Р3	Р4	
Марка за легкоукладальністю				
Середня густина, кг/м ³		2360	2355	
Об'єм втягнутого повітря, %		6	6	
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	нормальні умови	2	25,1	23,3
		7	32,0	31,5
		28	44,0	44,1
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	температура -10...+3°C	2	7,8	7,3
		7	23,8	23,7
		28	34,4	38,6
Показник питомої міцності в нормальних умовах (наростання міцності)		0,55	(швидке)	0,53 (швидке)

За показниками міцності через 28 діб тверднення в нормальних умовах бетони досягають проектних класу В30 (С25/30), а також марок за морозостійкістю (F200) та водонепроникністю (W6) і характеризуються необхідною кінетикою набору міцності в умовах знакозмінних та від'ємних температур. За показником питомої міцності запроектовані склади відносяться до бетонів з швидким наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28} \geq 0,5$).

Акт підписали:

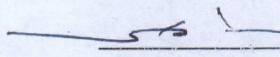
Представник ТОВ «Автомагістраль-Південь»

Виконроб

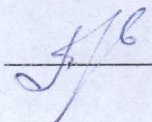
 Дукельський Н.Т.

Представники Національного університету "Львівська політехніка"

Професор, д.т.н.

 Бліхарський З.Я.

Доцент, к.т.н.

 Марків Т.С.

ДОДАТОК Ж

”ЗАТВЕРДЖУЮ”



Генеральний директор
ТОВ «Автомагістраль-Південь»
Тимофєєв М.С.

А К Т

про впровадження самоущільнювального бетону з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, одержаного оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях

Ми, нижче підписані, представник ТОВ «Автомагістраль-Південь» виконроб Дукельський Н.Т. та представники Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., професор Бліхарський З.Я., к.т.н., доцент Марків Т.Є., склали даний акт про те, що в грудні 2023 р. використано самоущільнювальні бетонні суміші з проектним класом за розпливом конуса SF1, міцністю на стиск В30 (С25/30), марками за морозостійкістю F200 та водонепроникністю W6 для бетонування деяких монолітних, складних за формою для вкладання бетонних сумішей механічним способом, стійок опор при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693. Для виготовлення бетонних сумішей застосовували портландцемент ПЦ П/А-Ш-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент» з додатковими цементуючими матеріалами, повітровтягувальну та сильнопластифікуючу добавки з протиморозним ефектом. Як заповнювачі використано кварцовий пісок Старо-Скварявського родовища ($M_{кр}=1,9$), гранітний щебінь Клесівського кар'єру фракції 5-10 мм. Загальний об'єм виготовленого бетону склав 4 м³.

Бетонування і тверднення бетонів відбувалося в діапазоні температур -10...+3 °С. Основними технологічними завданнями при бетонуванні були забезпечення однорідності та відсутності розшаровуваності високопластичної бетонної суміші, досягнення необхідного об'єму втягнутого повітря (4-6%), критичної ранньої (в умовах знакозмінних та від'ємних температур) та проектної міцностей. У результаті випробувань самоущільнювальних бетонів розплив

конуса бетонної суміші становив 550 мм. Середня міцність при стиску в нормальних умовах через 2 доби становила 13,8 МПа, а через 28 діб тверднення - 40,5 МПа (клас бетону за міцністю на стиск В30). За показником питомої міцності дані бетони відносяться до бетонів з середнім наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,35$).

Таблиця

Результати випробувань самоущільнюваного бетону
з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю

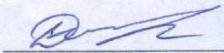
Найменування показника	Значення показника	
Діаметр розпливу конуса, мм	550	
Середня густина, кг/м ³	2240	
Об'єм втягнутого повітря, %	4,8	
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	2	13,8
	7	32,1
	28	40,5
Марка за морозостійкістю	F200	
Марка за водонепроникністю	W6	

Оптимізація технологічних факторів на різних структурних рівнях забезпечує одержання однорідних самоущільнювальних бетонних сумішей та бетонів заданого класу міцності (В30), а також марок за морозостійкістю (F200) та водонепроникністю (W6). Це дає змогу досягнути високої якості бетонних робіт в умовах знакозмінних та від'ємних температур, а також створює можливість уникнення проведення додаткової технологічної операції, а саме механічного ущільнення.

Акт підписали:

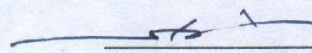
Представник ТОВ «Автомагістраль-Південь»

Виконроб

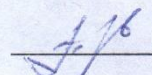

 Дукельський Н.Т.

Представники Національного університету "Львівська політехніка"

Професор, д.т.н.


 Бліхарський З.Я.

Доцент, к.т.н.


 Марків Т.Є.

ДОДАТОК И

“ЗАТВЕРДЖУЮ”



Б.З. Прокопович

р.

РОЗРАХУНОК

економічної ефективності впровадження партії бетону з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, одержаного оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях

Виявлення, призначення та область застосування нової техніки

Нова технологія базується на раціональному підборі компонентів, складу бетону, а також оптимізації технологічних факторів на різних структурних рівнях при виробництві бетонних сумішей.

Використання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю дає змогу покращити експлуатаційні властивості та довговічність конструкцій.

Розрахунок економічної ефективності від впровадження таких бетонів виконано за формулою:

$$E = (C1 - C2) \cdot A$$

де E - економічний ефект від впровадження нової технології, грн;

C1, C2 - собівартість виготовлення одиниці продукції по базовій та новій технології;

A – обсяг виробництва.

Собівартість компонентів бетонної суміші визначали, виходячи з діючих цін на матеріали станом на квітень 2024 р. В якості базового варіанту використано бетон класу за міцністю на стиск C20/25, який найбільш часто використовується при бетонуванні промислових площадок, а як новий варіант – бетон класу за міцністю на стиск C32/40.

Розрахунок собівартості бетону з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, одержаного оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях наведено в таблиці.

Розрахунок товщини площадки проведений згідно з британськими рекомендаціями щодо влаштування цементобетонних промислових підлог (TR 34 «Concrete industrial ground floors»), що базується на стандарті Eurocode 2, та дає змогу розрахувати в т.ч. плити з комбінованим дисперсним та стрижневим армуванням.

Таблиця

Порівняльний розрахунок собівартості 1 м² промислової площадки за базовою та новою технологією

Матеріали	Базовий варіант			Новий варіант		
	Кількість на 1 м ³ бетонної суміші, кг	Вартість одиниці, грн/кг	Вартість на 1 м ³ бетонної суміші, грн	Кількість на 1 м ³ бетонної суміші, кг	Вартість одиниці, грн	Вартість на 1 м ³ бетонної суміші, грн
Портландцемент	309,00	4,60	1421,40	315,00	4,60	1449,00
Цеолітовий туф	-	4,15	-	35,00	4,15	145,25
Пісок	730,00	0,45	328,50	600,00	0,45	270,00
Щебінь	1200,00	0,60	720,00	1230,00	0,60	738,00
Пластифікуюча добавка	3,10	20,00	62,00	3,50	60,00	210,00
Повітровтягувальна добавка	-	58,00	-	0,35	58,00	20,30
Фібра звичайна	0,90	198,00	178,20	1,05	198,00	207,90
Вартість 1 м ³ бетону			2710,10			3040,45
Вартість 1 м ² площадки			514,92 (h=0,19 м)			501,67 (h=0,165 м)
Топінг	5,00*	15,36	76,80	-	15,36	-
Вартість 1 м ² промислової площадки			591,72 (h=0,19 м)			501,67 (h=0,165 м)

* - на 1 м² промислової площадки

Собівартість 1 м² промислової площадки товщиною 0,19 м складає С1=591,72 грн.

Собівартість 1 м² промислової площадки товщиною 0,165 м складає
 $C_2=501,67$ грн.

Очікуваний економічний ефект при бетонуванні 100 м² промислової
площадки складає:

$$E=(591,72-501,67) \cdot 100=9005 \text{ грн.}$$

“УЗГОДЖЕНО”

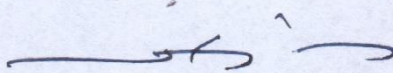
Головний бухгалтер



Жук Н.В.

Представники Національного університету “Львівська політехніка”

Професор, д.т.н.



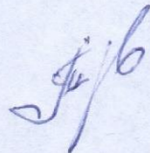
Бліхарський З.Я.

Професор, д.т.н.



Соболь Х.С.

Доцент, к.т.н.



Марків Т.С.

ДОДАТОК К



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор

науково-педагогічної роботи
Національного університету
"Львівська політехніка"

Олег ДАВИДЧАК

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи докторанта кафедри будівельного виробництва Марківа Тараса Євгеновича на тему **“Наукові засади отримання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях”**

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

- в курсі «Технології моделювання інформації у будівельному виробництві» (розділ «Використання інформаційних технологій в науковому аналізі»), що викладається для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія другого (магістерського) рівня вищої освіти (ОПП «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів»), використовуються результати дисертаційної роботи щодо принципів побудови алгоритму багатопараметричного проектування бетонів з підвищеною тріщиностійкістю за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях;

- в курсі «Технологічний супровід виготовлення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій» (розділ «Підвищення довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій»), що викладається для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти (вибірковий блок «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів»), використовуються результати дисертаційної роботи щодо параметрів регулювання властивостями бетонів з підвищеною тріщиностійкістю;

- в курсі «Бетони та будівельні розчини, заповнювачі для бетонів, ч.1», що викладається для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти (вибірковий блок «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів»), оновлена лабораторна робота щодо оптимізації зернового складу крупного заповнювача важкого бетону з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю на

макроструктурному рівні, виконання якої базується на використанні результатів дисертаційної роботи;

- в курсі «Бетони та будівельні розчини, заповнювачі для бетонів, ч.2», що викладається для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти (вибірковий блок «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів»), оновлена лабораторна робота щодо проектування складів бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, виконання якої базується на використанні результатів дисертаційної роботи;

- в курсі «Будівельне матеріалознавство» (розділ «Бетони»), що викладається для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти використовуються результати дисертаційної роботи щодо технологічних, технічних та економічних переваг використання бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю у будівництві.

Результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі Марківа Т.Є., використовуються при виконанні магістерських робіт студентів 192 Будівництво та цивільна інженерія другого (магістерського) рівня вищої освіти (ОПП «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів») та підготовці здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія.

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

Петро ХОЛОД

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

Мирослав САНИЦЬКИЙ