

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СИДОР НАЗАР ІВАНОВИЧ

УДК 691.328.4:692.51

ДИСЕРТАЦІЯ


**ВИСОКОМІЦНІ БЕТОНИ З ПІДВИЩЕНОЮ УДАРНОЮ В'ЯЗКІСТЮ
ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДЛОГ**

192 Будівництво та цивільна інженерія

19 Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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


_____ Н.І. Сидор

Науковий керівник Марущак Уляна Дмитрівна,
доктор технічних наук, доцент

Львів 2021

АНОТАЦІЯ

Сидор Н.І. Високоміцні бетони з підвищеною ударною в'язкістю для промислових підлог. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192. Будівництво та цивільна інженерія (19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню завдання одержання високоміцних бетонів з підвищеною ударною в'язкістю для промислових підлог шляхом системного модифікування портландцементу полідисперсними мінеральними компонентами у поєднанні з високоефективними полікарбоксилатними суперпластифікаторами для покращення їх мікро- та мезоструктури, а також армування дисперсними поліпропіленовими волокнами, що забезпечує тривимірне зміцнення структури для контролю процесу тріщиноутворення та акумулювання енергії динамічних впливів.

У *першому розділі* на основі аналітичного огляду літературних джерел проаналізовано сучасні тенденції влаштування промислових підлог з позицій забезпечення їх довговічності та надійності роботи в екстремальних умовах експлуатації. Показано, що підвищення терміну ефективного використання бетонних основ та забезпечення ресурсозбереження при їх виготовленні пов'язані з впровадженням у їх конструкцію високоміцних бетонів.

Розглянуто та проаналізовано сучасні тенденції отримання бетонів з регламентованими експлуатаційними показниками. Показано, що забезпечення високих показників міцності може бути реалізоване за рахунок оптимізації гранулометричного складу основних компонентів сумішей із забезпеченням щільного упакування. Обґрунтовано застосування активних мінеральних добавок, в т.ч. нанометричної дисперсності, та суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу в напрямку одержання

цементуючої матриці довговічних високоміцних бетонів. Звернуто увагу, що впровадження високоміцних бетонів супроводжується проблемою підвищення їх крихкості, зниження тріщиностійкості та стійкості до ударних навантажень. Розглянуто особливості впливу ударних навантажень та проаналізовано методи підвищення стійкості бетонів у таких умовах.

Аналіз даних у області технології високоміцних бетонів, а також відомих закономірностей формування структури композитів із заданими властивостями дозволяє висунути наукову гіпотезу про доцільність розроблення високоміцних бетонів з підвищеною ударною в'язкістю за рахунок модифікування органо-мінеральними добавками з оптимізованим заповненням системи та армування низькомодульними дисперсними волокнами із забезпеченням направленою структуроутворення цементної матриці з формуванням однорідної дрібнокристалічної малодфектної структури бетону, тривимірного зміцнення поліпропіленовою фіброю, що зумовлює зміну умов і енергетики тріщиноутворення.

У *другому розділі* описано методіку проведення експериментальних досліджень та охарактеризовано використані матеріали. Представлено фізико-механічні властивості та гранулометричний склади портландцементу ПЦ І-500Р-Н. Наведено характеристику та хімічний склад мінеральних добавок, зокрема золи-винесення, метакаоліну, мікрокремнезему та аеросилу А380, а також суперпластифікатора полікарбоксилатного типу. Надано характеристику дрібних та крупного заповнювачів до бетону. Проведено порівняння властивостей дисперсної арматури – поліпропіленової та базальтової. Показано, що визначення технологічних, фізико-механічних і будівельно-технічних властивостей високоміцних дисперсно-армованих інженерних цементуючих композитів та бетонів проведено згідно з діючими нормативними документами і загальноприйнятими методиками. Для дослідження процесів структуроутворення в модифікованих портландцементних матрицях високоміцних дисперсно-армованих композитів використано сучасні методи

фізико-хімічного аналізу (рентгенівську дифрактометрію, растрову електронну мікроскопію та ін.).

У *третьому розділі* досліджено вплив мінеральних добавок, суперпластифікатора, дисперсної фібри на властивості портландцементних систем, розроблено склади інженерних цементуючих композитів. Встановлено, що введення високодисперсних мінеральних добавок ($S_{\text{пит}} \geq 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$) забезпечує підвищення водоутримувальної здатності, зростання сидементаційної стійкості та зниження деформацій усадки в повітряно-сухих умовах тверднення. Дослідженнями пуцоланових властивостей мінеральних добавок за методикою згідно з EN-450 встановлено, що їх активність підвищується із зростанням питомої поверхні. Так, активність золи-винесення за показниками міцності на стиск становить $K_{\text{пуц28}^{\text{ст}}}=0,79$, тоді як для метакаоліну та мікрокремнезему – 0,92 та 1,07 відповідно. За показниками міцності на згин коефіцієнт пуцолановості становить $K_{\text{пуц28}^{\text{зг}}}= 0,80; 0,88; 0,89$ відповідно для золи-винесення, метакаоліну та мікрокремнезему.

Методом математичного планування експерименту з врахуванням принципів мікромеханіки визначено оптимальне співвідношення цемент:зола-винесення:пісок=0,8:1,2:1 з метою отримання максимальної міцності на розтяг при згині. Показано, що часткова заміна золи-винесення ультрадисперсними мінеральними добавками з підвищеною поверхневою енергією у складі в'язучої системи, використання полікарбосилатного суперпластифікатора, а також армування структури інженерних композитів дисперсними поліпропіленовими волокнами в оптимальній кількості сприяють підвищенню міцності на стиск на 25–28 %, на згин – на 20–22 % порівняно з композитами на основі бінарної в'язучої системи портландцемент:зола-винесення. Розроблені дисперсно-армовані інженерні цементуючі композити характеризуються проектною міцністю на стиск 83,3 МПа, міцністю на розтяг при згині – 23,7 МПа, критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень при нерівноважних випробуваннях $1,58 \text{ МПа/м}^{0,5}$, деформаціями усадки 0,34 мм/м.

Дослідженнями впливу технологічних факторів на ударну в'язкість цементної матриці показано, що ударна в'язкість зростає на 8,5–12,9 % при введенні мінеральних добавок. Експериментально підтверджено, що при використанні дисперсної фібри відбувається суттєве зростання ударної міцності портландцементних систем в 8–10 раз, при цьому значення ударної міцності зразків з поліпропіленовою фіброю вищі на 12,7–30,4 % порівняно із зразками, армованими базальтовою фіброю.

Комплексом методів фізико-хімічного аналізу встановлено особливості процесів структуроутворення, формування мікроструктури та синтезу міцності цементного каменю на основі портландцементу, модифікованого комплексною органо-мінеральною добавкою. Ступінь гідратації алітової фази клінкерної складової портландцементу ПЦ І-500 через 1 добу тверднення складає 37,1 %, а для модифікованого портландцементу – 46,1 %. Модифікування ультра- та нанодисперсними мінеральними добавками сприяє прискоренню процесів гідролізу алітової фази з відповідним ущільненням мікроструктури цементного каменю за рахунок утворення волокнистих гідросилікатів у неклінкерній частині, що зміцнює матрицю на мікро- та нанорівні з реалізацією явища «самоармування».

У четвертому розділі проведено оптимізацію гранулометричного складу компонентів високоміцних дисперсно-армованих бетонів для отримання ефективного упакування. При проектуванні складу високоміцного бетону, армованого поліпропіленовою фіброю, класу за рухомістю бетонної суміші Р4 виконано експериментально-статистичне моделювання методом ортогонально-центрального композиційного планування з оптимізацією рецептурних факторів – витрати портландцементу ПЦ І-500Р-Н ($X_1 = 300; 350; 400 \text{ кг/м}^3$) та кількості поліпропіленової фібри ($X_2 = 0,0; 1,0; 2,0 \%$). Міцність модифікованих бетонів через 28 діб тверднення зростає від 61,7 МПа до 98,4 МПа при зміні фактора X_1 (фактор X_2 знаходиться на рівні «0»). Показано, що комплексне модифікування портландцементу забезпечує отримання високоміцних бетонів класу за міцністю С50/67–С60/75 при витраті

портландцементу 350–400 кг на 1 м³ бетонної суміші. Встановлено, що міцність на згин бетонів зростає на 42–50 % при збільшенні ступеня дисперсного армування до 2,0 %.

Бетонні суміші марки за рухомістю Р4 розроблених бетонів характеризуються седиментаційною стійкістю – показник водовідділення становить 0,2 %, розчиновідділення – 0,5 %, а фібробетони на їх основі – підвищеною щільністю (водопоглинання $W_m=1,9-2,1\%$, відкрита пористість $P_v=4,5-4,9\%$, показник капілярного зростання $SI=0,37\text{ мм}\cdot\text{год}^{0,5}$).

Комплексне модифікування та дисперсне армування поліпропіленовою фіброю забезпечує отримання високоміцних бетонів, що характеризуються міцністю на стиск 87,1–96,8 МПа, міцністю на розтяг при згині – 9,8–11,2 МПа, показником питомої витрати портландцементу на одиницю проектної міцності – 4,0–4,5 кг/МПа. Питома міцність розроблених модифікованих фібробетонів f_{cm2}/f_{cm28} становить 0,50–0,51, що відповідає вимогам щодо швидкотверднучих. Ударна в'язкість розроблених високоміцних дисперсно-армованих бетонів за показником питомої енергії при появі першої тріщини становить 33,4–44,1 Дж/см³ та 61,7–80,3 Дж/см³ при повному руйнуванні. Ударна стійкість модифікованих дисперсно-армованих бетонів згідно з ДСТУ Б В.2.7-57-96 становить 20 кг. Міцність на стиск розроблених бетонів через 100 циклів поперемінного зволоження висушування знижується на 1,9–3,0 %, а ударна в'язкість – на 3,1–5,4 %, що свідчить про їх підвищену стійкість в умовах сумісної дії зовнішніх впливів. Динамічна поверхнева твердість (енергія удару 1,8 Дж) модифікованих високоміцних бетонів зростає в 1,5–1,7 рази залежно від віку тверднення порівняно з бетоном контрольного складу.

Модуль пружності фіброармованого високоміцного бетону зростає від 54,6 до 61,7 ГПа, а коефіцієнт Пуассона знижується від 0,19 до 0,17 порівняно із високоміцним бетоном без фібри. Призмova міцність високоміцного бетону становить 73,5 МПа, тоді як високоміцних бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю – 78,6–82,7 МПа. Показано, що введення фібри до високоміцних бетонів сприяє зниженню стираності на 30,4–34,3 %.

У *п'ятому розділі* представлено результати дослідно-промислової апробації високоміцних дисперсно-армованих бетонів з підвищеною ударною в'язкістю. Розроблені високоміцні фібробетони впроваджені ТзОВ «Гартекс» при бетонуванні промислової підлоги в складському приміщенні на вулиці Буйка, м. Львів, а також при влаштуванні перекриття при реконструкції будівлі Комунального некомерційного підприємства «4-та міська клінічна лікарня м. Львова» за адресою вул. Мушака, 54. Представлена техніко-економічна ефективність високоміцних дисперсно-армованих бетонів.

Результати експериментальних досліджень і промислового впровадження використано в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисципліни «Інноваційні технології виготовлення сучасних будівельних матеріалів і виробів» для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Ключові слова: високоміцний бетон, ударна в'язкість, інженерний цементуючий композит, промислова підлога, дисперсне армування, ультрадисперсна мінеральна добавка, експлуатаційні властивості.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Сидор Н. І., Марущак У. Д., Маргаль І. В. Вплив компонентного складу на властивості інженерних цементуючих композитів // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. № 888. С. 127–132.
2. Дослідження швидкотверднучих бетонів, модифікованих комплексною нанодобавкою / У. Д. Марущак, Н. І. Сидор, О. Мазурак, Р. Мазурак // Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2018. № 19. С. 90–93.

3. Сидор Н. І. Дослідження властивостей інженерних цементуючих композитів // Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. № 912. С. 162–168.

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

4. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction // SSP - Journal of civil engineering, 2017. Vol. 12. Issue 2. P. 107–112.

5. Development of nanomodified rapid hardening fiberreinforced concretes for special-purpose facilities / U. Marushchak, M. Sanytsky, S. Korolko, Y. Shabatura, N. Sydor // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances. 2018. № 2/6 (92). P. 34–37.

Патент України на корисну модель:

6. Патент на корисну модель № 109644 Україна, МПК С04В 7/00 С04В 7/13. В'язуче / Марущак У. Д., Саницький М. А., Позняк О. Р., Сидор Н. І., Мельник В. М. (Україна); Заявл. 19.02.2018; Опубл. 10.07.2018, бюл. №13.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction. XVI International Scientific Conference Košice-Lviv-Rzeszów. 2017. P. 1–2.

8. Сидор Н. Ефективні інженерні цементуючі композити для мінімалізації забруднення навколишнього середовища. I Всеукраїнська науково-практична конференція «Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві». 2018. С.28.

9. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N., Braichenko S. Research of Nanomodified Engineered Cementitious Composites. Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties. 2018. Part 2. 8914835. (Scopus).

10. Марущак У., Саницький М., Сидор Н. Дослідження стійкості наномодифікованих дисперсно-армованих бетонів до ударних навантажень. 7-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». 2018. С. 203–208.

11. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N., Braichenko S. Research of impact resistance of nanomodified fiberreinforced concrete. MATEC Web of Conferences. 2018. 230. 03012. (Scopus).

12. Марущак У., Саницький М., Сидор Н. Наномодифіковані дисперсно-армовані будівельні композити. Міжнародний семінар «Моделювання і оптимізація будівельних композитів». 2018. С. 100–102.

13. Марущак У., Сидор Н., Новосад П., Бобецький Ю. Дисперсно-армовані цементуючі композити. Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах». 2018. С. 62–63.

14. Марущак У., Сидор Н., Маргаль І., Солтисік Р. Модифіковані фібробетони для промислових підлог. 8-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». 2019. С. 164–166.

15. Marushchak U., Sydor N., Braichenko S., Margal I., Soltysik R. Modified fiber reinforced concrete for industrial floors. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. 708. 012094. (Scopus).

16. Сидор Н., Проць Є. Модифіковані інженерні цементуючі композити. II Науково-практична конференція «Теорія і практика актуальних наукових досліджень», 2020. С. 139–142.

17. Sydor N., Marushchak U. Modified fiber-reinforced concrete and the sustainability concept. International Seminar on Circular Economy and Sustainability in Civil Engineering (ISCESCE). 2020. P. 29.

18. Sydor N., Marushchak U., Braichenko S., Rusyn B., Development of component composition of Engineered Cementitious Composites. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. 100 LNCE. P. 459–465. (Scopus).

ABSTRACT

Sydor N.I. High strength concretes with high impact resistance for industrial floors. On rights of the manuscript.

PhD thesis (Doctor of Philosophy) in Engineering sciences by specialty 192. “Construction and civil engineering” (19 – Architecture and Construction). – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Lviv, 2021.

The dissertation is devoted to solving the problem of obtaining of high-strength concretes with high impact resistance for industrial floors by systemic modification of Portland cement with polydisperse mineral components in combination with highly effective polycarboxylate superplasticizers to improve their micro- and mesostructure, as well as reinforcement with dispersed polypropylene fibers, which provides three-dimensional strengthening of the structure to control the process of cracking and accumulation of energy of dynamic action.

Current trends in the installation of industrial floors from the standpoint of ensuring their durability and reliability in extreme operating conditions are analyzed in the *first section* on the basis of an analytical review of the literature. It is shown that increasing the term of effective use of concrete foundations and ensuring resource conservation in their manufacture are associated with the introduction of high strength concrete in their construction.

The modern tendencies of concrete production with regulated performance are considered and analyzed. It is shown that the provision of high strength values

can be realized by optimizing the particle size distribution of the main components of mixtures with the provision of dense packaging. The use of active mineral additives, including nanometric dispersion component, and polycarboxylate superplasticizers in the direction of obtaining a cementing matrix of durable high strength concrete. Attention is drawn to the fact that the introduction of high strength concrete is accompanied by the problem of increasing their fragility, reducing crack resistance and resistance to impact loads. The peculiarities of the impact loads are considered and the methods of increasing the stability of concrete in such conditions are analyzed.

Analysis of data in the field of high-strength concrete technology, as well as known patterns of formation of composites with needed properties allows to put forward a scientific hypothesis about the feasibility of developing of high-strength concrete with high toughness by modifying organo-mineral additives with optimized filling and reinforcement by low-modul fibers providing the directed structure formation of a cement matrix with formation of homogeneous small-crystal low-defect structure of concrete, three-dimensional strengthening by polypropylene fiber that causes change of conditions and energy of crack formation.

The *second section* describes the methodology of experimental research and describes the characteristic of used materials. Physico-mechanical properties and granulometric composition of Portland cement CEM I 42.5 N are presented. The characteristics and chemical composition of mineral additives – fly ash, metakaolin, microsilica and Aerosil A380, as well as a superplasticizer of polycarboxylate type are given. The characteristics of sands and coarse aggregates for concrete are given. Comparison of the properties of polypropylene and basalt fiber is presented. It is shown that the determination of technological, physical-mechanical and construction-technical properties of high strength fiber-reinforced engineered cementitious composites and concretes is carried out in accordance with current regulations and generally accepted methods. Modern methods of physicochemical analysis (X-ray diffractometry, scanning electron microscopy, etc.) were used to

study the processes of structure formation in modified Portland cement matrices of high strength fiber-reinforced composites.

In the *third section* the influence of mineral additives, superplasticizer, dispersed fiber on the properties of Portland cement systems is investigated, the compositions of Engineered Cementitious Composites are developed. It is established that the introduction of ultradispersed mineral additives ($A_s \geq 1000 \text{ m}^2/\text{kg}$) provides increased water holding capacity, increased sedimentation resistance and reduced shrinkage deformation in air-dry curing conditions. Studies of pozzolanic properties of mineral additives according to the method according to EN-450 found that their activity increases with increasing specific surface area. Thus, the activity of fly ash in terms of compressive strength is $K_{28c} = 0.79$, while for metakaolin and microsilica – 0.92 and 1.07, respectively. According to the indicators of flexural strength, the coefficient of pozzolanicity is $K_{28fl} = 0.80$; 0.88; 0.89 for fly ash, metakaolin and microsilica, respectively.

The method of mathematical planning of the experiment taking into account the principles of micromechanics determined the optimal ratio of cement: ash-removal: sand = 0.8:1.2:1.0 in order to obtain maximum tensile strength in bending. It is shown that partial replacement of fly ash by ultrafine mineral additives with increased surface energy in the binder system, the use of polycarboxylate superplasticizer, as well as reinforcement of engineering composites with dispersed polypropylene fibers in the optimal amount increase 25 % compressive strength bend – by 20–22 % compared with composites based on binary binder system Portland cement: fly ash. The developed fiber-reinforced Engineered Cementitious Composites are characterized by compressive strength of 83.3 MPa, bending strength - 23.7 MPa, a critical stress intensity factor in nonequilibrium tests of $1.58 \text{ MPa/m}^{0.5}$, shrinkage of 0.14 mm/m.

Studies of the influence of technological factors on the toughness of the cement matrix have shown that the toughness increases by 8.5–12.9 % with the introduction of mineral additives. It has been experimentally confirmed that the introduction of dispersed fiber significantly increases the impact strength of Portland

cement systems by 8–10 times, while the values of impact strength of samples with polypropylene fiber are 12.7–30.4 % higher compared to samples reinforced with basalt fiber.

The complex of methods of physical and chemical analysis establishes the peculiarity of structure formation processes, microstructure formation and strength synthesis of cement paste based on Portland cement, modified with a complex organo-mineral additive. The degree of hydration of the alite phase of the clinker component of Portland cement CEM I 42.5 N after 24 hours is 37.1 %, and for modified Portland cement – 46.1 %. Modification with ultradispersed mineral additives accelerates the hydrolysis of the alite phase with a corresponding compaction of the microstructure of cement paste due to the formation of fibrous hydrosilicates in the non-clinker part, which strengthens the matrix at the micro- and nanolevel with the realization of the phenomenon of "self-reinforcement".

In the *fourth section* the granulometric composition of the components of high strength fiber-reinforced concrete was optimized to obtain effective packaging. When designing the composition of high strength concrete reinforced with polypropylene fiber, the slump class of concrete mixture P4 performed experimental-statistical modeling by orthogonal-central compositional planning with optimization of prescription factors – Portland cement CEM I 42.5 consumption ($X_1 = 300; 350; 400 \text{ kg/m}^3$) and the amount of polypropylene fiber ($X_2 = 0.0; 1.0; 2.0 \%$). The compressive strength of the modified concrete after 28 days increases from 61.7 MPa to 98.4 MPa when the factor X_1 changes (factor X_2 is at the level of "0"). It is shown that the complex modification of Portland cement provides obtaining of high strength concrete of strength class C50/67–C60/75 at a consumption of Portland cement of 350–400 kg per 1 m^3 of concrete. It is established that the flexural strength of concrete increases by 42–50 % with increasing the degree of dispersed reinforcement to 2.0 %.

Concrete mixtures of slump class of P4 of developed concretes are characterized by sedimentation stability – water bleeding rate is 0.2 %, mortar separation – 0.5 %, and fiber-reinforced concretes based on them – high density

(water absorption $W_m = 1.9\text{--}2.1\%$, open porosity $P_o = 4.5\text{--}4.9\%$, capillary growth rate $SI = 0.37\text{ mm} \cdot \text{h}^{0.5}$).

Complex modification and disperse reinforcement with polypropylene fiber provides obtaining of high strength concrete, which characterized by compressive strength of 87.1–96.8 MPa, flexural strength – 9.8–11.2 MPa, an indicator of the specific consumption of Portland cement per unit of strength - 4.0–4.5 kg/MPa. The specific strength of the developed modified fiber-reinforced concretes f_{cm2}/f_{cm28} is 0.50–0.51, which meets the requirements for rapid hardening concrete. The impact strength of the developed high-strength fiber-reinforced concretes in terms of specific energy at the appearance of the first crack is 33.4–44.1 J/cm³ and 61.7–80.3 J/cm³ at complete failure. Impact resistance of modified dispersed reinforced concrete in accordance with DSTU B V.2.7-57-96 is 20 kg. The compressive strength of the developed concretes after 100 cycles of damping-drying is reduced by 1.9–3.0 %, and impact resistance - by 3.1–5.4 %, which indicates their increased stability in the conditions of joint action of external influences. The dynamic surface hardness (impact energy 1.8 J) of modified high strength concretes increases by 1.5–1.7 times depending on the age of hardening compared to the concrete of the control composition.

The modulus of elasticity of fiber-reinforced high strength concrete increases from 54.6 to 61.7 GPa, and the Poisson's ratio decreases from 0.19 to 0.17 compared to high strength concrete without fiber. The prism strength of high strength concrete is 73.5 MPa, while high strength concrete reinforced with polypropylene fiber is 78.6–82.7 MPa. It is shown that the introduction of fiber into high-strength concrete reduces abrasion by 30.4–34.3 %.

The *fifth section* presents the results of experimental and industrial testing of fiber-reinforced high strength concrete with high impact resistance. Developed fiber-reinforced high strength concrete was implemented by "Gartex" LLC during concreting of industrial floor in a warehouse on Buyka street, Lviv, as well as during the installation of the floor during the reconstruction of the building of the Municipal Non-Commercial Enterprise "4th City Clinical Hospital of Lviv" at Mushak str., 54.

The technical and economic efficiency of fiber-reinforced high strength concrete is presented.

The results of experimental research and industrial implementation were used in the educational process of the Lviv Polytechnic National University in teaching the discipline "Innovative technologies for the manufacture of modern building materials and products" for students of speciality 192 Construction and Civil Engineering.

Keywords: high strength concrete, impact resistance, Engineered Cementitious Composite, industrial floor, dispersed reinforcement, ultrafine mineral additive, operational properties.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ

ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ	25
1.1. Сучасні тенденції технологій влаштування промислових підлог.....	25
1.2. Основні принципи одержання високоміцних бетонів.....	35
1.3. Шляхи підвищення ударної в'язкості бетонів.....	46
1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза.....	58
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	60
2.1. Характеристика вихідних матеріалів.....	60
2.2. Фізико-механічні випробування.....	68
2.3. Фізико-хімічні дослідження.....	73
Висновки до розділу.....	74
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МОДИФІКОВАНОЇ ЦЕМЕНТНОЇ МАТРИЦІ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ, АРМОВАНИХ ДИСПЕРНИМИ ВОЛОКНАМИ	75
3.1. Вплив пластифікаторів та мінеральних добавок на властивості портландцементу.....	75
3.2. Вплив технологічних факторів на фізико-механічні властивості модифікованих цементів.....	85
3.3. Особливості процесів структуроутворення модифікованих портландцементів, армованих дисперсними волокнами.....	95
3.4. Підбір складу високофункціональних дисперсно-армованих композитів.....	103
Висновки до розділу.....	117

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ УДАРНОЮ В'ЯЗКІСТЮ.....	118
4.1. Оптимізація гранулометричного складу заповнювачів для отримання високоміцного дисперсно-армованого бетону.....	118
4.2. Оптимізація складів високоміцних бетонів, армованих дисперсними волокнами.....	125
4.3. Дослідження будівельно-технічних властивостей високоміцних дисперсно-армованих бетонів.....	132
4.3.1. Пористість, водопоглинання та водонепроникність.....	132
4.3.2. Ударна в'язкість.....	136
4.3.3. Властивості при довготривалому твердненні.....	140
4.3.4. Атмосферостійкість.....	147
4.3.5. Усадочні деформації.....	154
4.3.6. Деформативні властивості.....	155
4.3.7. Стійкість до стирання.....	157
Висновки до розділу.....	158
РОЗДІЛ 5. ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ, АРМОВАНИХ ДИСПЕРСНИМИ ВОЛОКНАМИ.....	161
5.1. Промислова апробація високоміцних бетонів, армованих дисперсними волокнами.....	161
5.2. Техніко-економічні показники високоміцних дисперсно-армованих бетонів.....	170
Висновки до розділу.....	172
ВИСНОВКИ.....	173
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	176
Додатки.....	193

ВСТУП

Сучасний етап розвитку будівельної галузі зумовлює впровадження ефективних технологій, які базуються на принципах енерго- і ресурсозбереження, що зумовлює спрямованість проектних і виробничих рішень на підвищення довговічності та надійності будівельних конструкцій, особливо тих, які піддаються дії екстремальних експлуатаційних впливів. З огляду на вагому частку зведення будівель нежитлового призначення та зростаючі вимоги, що ставляться до сучасних промислових об'єктів, зумовлених збільшенням інтенсивністю руху, використанням важкої техніки (автокрани, електро- і автонавантажувачі, тракторна техніка і т.д.) важливого значення набуває застосування ефективних матеріалів з підвищеними показниками міцності, зносостійкості, тріщиностійкості, а також стійкості до ударних навантажень при влаштуванні бетонних підлог, що визначає їх стабільний експлуатаційний стан, комфортність та безпеку функціонування з урахуванням характеру виробничих впливів.

Використання високоміцного бетону в конструкціях бетонних основ надає низку вагомих переваг: зниження витрати компонентів за рахунок зменшення товщини конструкцій, підвищення ранньої міцності, щільності та зносостійкості бетону, можливість зниження ступеня армування. Разом з тим, досягнення високих фізико-механічних характеристик бетону зумовлює зростання його крихкості, що значно знижує експлуатаційні властивості, термін служби в умовах

Узагальнення результатів досліджень в області одержання високоміцних бетонів регламентованими експлуатаційними властивостями, зокрема з підвищеною ударною в'язкістю, в екстремальних умовах функціонування промислових підлог свідчать, що формування необхідних показників надійності досягається за рахунок комплексного підходу до модифікування композитів на різних структурних рівнях шляхом зниження

пористості шляхом використання ультрадисперсних мінеральних компонентів, полікарбонатного суперпластифікатора та дисперсного армування низькомодульними волокнами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт «Основи технології створення наномодифікованих надшвидкотверднучих портландцементів та високоміцних дисперсно-армованих композитів з підвищеною ударною в'язкістю на їх основі» (номер держреєстрації 0117U004446, термін виконання – 2017-2018 рр.) та «Лужно-сульфатноактивовані композиційні цементи з високою ранньою міцністю та низькоенергоємні бетони на їх основі» (номер держреєстрації 0119U002253, термін виконання – 2019-2021 рр.) відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України. У зазначених роботах автор був виконавцем.

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення високоміцних бетонів для промислових підлог з підвищеною ударною в'язкістю, оптимізація їх складів, дослідження процесів структуроутворення та будівельно-технічних властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити вплив добавок-модифікаторів на властивості цементної матриці;
- провести оцінку впливу виду армувальних елементів і параметрів армування на фізико-механічні властивості цементуючої матриці;
- визначити вплив рецептурних та технологічних факторів на ударну в'язкість дрібнозернистих бетонів;
- розробити склади високофункціональних дисперсно-армованих композитів;
- встановити фізико-хімічні особливості гідратації модифікованої дисперсно-армованої цементної матриці;

- розробити ефективні склади модифікованих високоміцних бетонів з підвищеною ударною в'язкістю та дослідити їх будівельно-технічні властивості;

- провести практичну апробацію модифікованих високоміцних бетонів з підвищеною ударною в'язкістю для промислових підлог та обґрунтувати їх техніко-економічну ефективність.

Об'єкт дослідження: процеси направленої регулювання та керування властивостями високоміцного бетону на різних структурних рівнях.

Предмет дослідження: високоміцні бетони з підвищеними будівельно-технічними та експлуатаційними властивостями, зокрема ударною в'язкістю для промислових підлог.

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

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

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання високоміцних бетонів, армованих дисперсними волокнами, з підвищеними експлуатаційними показниками, зокрема підвищеною ударною в'язкістю шляхом системного поєднання суперпластифікатора полікарбосилатного типу, комплексної ультрадисперсної мінеральної добавки, а також армування низькомодульними поліпропіленовими волокнами;

- встановлено, що модифікування бетону органо-мінеральною добавкою на основі полікарбоксилатного суперпластифікатора та ультрадисперсних силікатних мінеральних добавок оптимізує процес структуроутворення за рахунок підвищення водоутримуючої здатності, ущільнення міжзернового простору, ранньої пуцоланової реакції з утворенням рівномірно розподілених низькоосновних гідросилікатів кальцію, що призводить до зростання кількості контактів, підвищення усадочної тріщиностійкості та формування мінімально напруженої мікроструктури цементуючої матриці;

- подальшого розвитку набули закономірності статистичного та динамічного зміцнення високоміцного бетону за рахунок дисперсного армування низькомодульними поліпропіленовими волокнами, які базуються на мікромеханічному підході і пов'язані з оптимізацією компонентного складу та мікроструктури матеріалу з врахуванням взаємодії між волокном, цементуючою матрицею та поверхнею розділу волоконно-матричного матеріалу з створенням початкової об'ємно-просторової зв'язаної фіброструктури для контролю тріщиноутворення, поглинання та розподілення енергії динамічних навантажень по об'єму матеріалу;

- визначено принципи отримання модифікованих високоміцних дисперсно-армованих бетонів класів за міцністю C55/67-C60/75 з низькою витратою портландцементу на одиницю міцності 4,0-4,5 кг/МПа, підвищеними показниками ударної в'язкості (75-80 Дж/см³) та стійкості до стирання за рахунок оптимізації структури на всіх масштабних рівнях, зниження дефектності поверхневого шару, мікротріщиноутворення.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено ефективні склади модифікованих високоміцних бетонів, армованих низькомодульними дисперсними волокнами, з підвищеною ударною в'язкістю, впровадження яких у практику влаштування промислових підлог забезпечить вирішення завдань досягнення їх необхідних показників

експлуатаційних властивостей з скороченням технологічного процесу зведення;

- проведено апробацію модифікованих високоміцних бетонів, армованих дисперсною поліпропіленовою фіброю, ТзОВ „Гартекс” для влаштування промислової підлоги складського приміщення (вул. Буйка, м. Львів) з забезпеченням регламентованих технологічних властивостей бетонної суміші, міцності, ударної стійкості та стійкості до стирання бетону, в т.ч. в умовах понижених додатних температур;

- розроблені високоміцні дисперсно-армовані бетони класу за міцністю С60/75 використано ТзОВ «Західнафтохімбуд» для бетонування підлоги та перекриття при реконструкції з надбудовою четвертого поверху комунального некомерційного підприємства «4 міська клінічна лікарня м. Львова» (м. Львів вул. Мушака, 54), що дало можливість досягнення необхідних міцнісних показників в умовах понижених додатних температур.

Укладено ліцензійний договір з ТзОВ «Західнафтохімбуд» на передачу патенту України №121367 на корисну модель.

- отримані в дисертаційній роботі теоретичні положення і практичні результати щодо особливостей проектування складів високоміцних дисперсно-армованих бетонів впроваджено в навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисципліни «Інноваційні технології виготовлення сучасних будівельних матеріалів і виробів» для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні експериментальних досліджень, обробленні одержаних даних, впровадженні результатів роботи у виробництво.

У роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1, 5, 7, 18] – проектування складів дисперсно-армованих цементуючих композитів; [2, 4] – дослідження міцнісних властивостей модифікованих високоміцних бетонів та фібробетонів; [6] – патентний пошук, дослідження впливу добавки

полікарбоксилатного типу на властивості зв'язуючого; [9] – виявлення особливостей структуроутворення дисперсно-армованих цементуючих композитів; [10, 11, 14, 15] – дослідження ударної в'язкості модифікованих високоміцних бетонів, армованих дисперсною фіброю; [12, 13, 16, 17] – дослідження експлуатаційних показників дисперсно-армованих будівельних композитів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях: XVI International Scientific Conference Košice-Lviv-Rzeszów (Кошице, Словаччина, 2017); I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві» (Одеса, 2018); 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (Одеса, 2018); 7-й та 8-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2018, 2019); Міжнародному семінарі «Моделювання і оптимізація будівельних композитів» (Одеса, 2018); Міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах» (Київ, 2018); II науково-практичній конференції «Теорія і практика актуальних наукових досліджень» (Дніпро, 2020); International Seminar on Circular Economy and Sustainability in Civil Engineering (Львів, 2020); XXIII International scientific and practical conference (Сан-Франциско, США, 2020); 2-й Міжнародній науково-технічній конференції “Еко-комфорт та сучасні проблеми цивільної інженерії” (Львів, 2020) та на конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету “Львівська політехніка” 2017-2020 рр.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 18 наукових праць, з них 3 статті у фахових у наукових фахових виданнях України, 2 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus, Index Copernicus, Vaz Tech), 12 публікацій у матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій (4 з яких входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus), 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації: Основна частина дисертаційної роботи викладена на 156 сторінках друкованого тексту і складається із вступу, п'яти розділів та загальних висновків. Повний обсяг дисертації становить 205 сторінок і включає 26 таблиць, 75 рисунків, список використаних джерел із 163 найменувань на 17 сторінках та 5 додатків на 14 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Сучасні тенденції технологій влаштування промислових підлог

За останні роки спостерігається стабільне зростання обсягів дистрибуції, складування та роздрібної торгівлі для задоволення потреб промисловості та суспільства. За даними Державної служби статистики України щодо обсягів виробництва будівельної продукції за видами у 2014–2020 роках нежитлове будівництво протягом усього періоду перевищує обсяги житлового будівництва на 7–34 % [29]. Слід відзначити, що у 2020 р. приріст нежитлового будівництва становив 2,3%, тоді як обсяги житлового будівництва знизилися на 12,4 %. Із загального обсягу нежитлового будівництва на промислові будівлі та склади припадає 27,7–31,0 % вкладених коштів.

Для всіх видів діяльності, включаючи виробництво, складування, роздрібні торгові та розважальні заклади, в будівлях потрібна міцна основа, що забезпечить безперебійну роботу та проведення виробничих операцій. Промислові підлоги повинні витримувати навантаження, що створюються транспортними засобами, а також забезпечувати безпеку та комфорт. Існує дві типові структурні концепції промислових підлог: бетонна (в т.ч. із зміцненим верхнім шаром) та полімерна підлога [17].

Залежно від хімічного складу промислові полімерні підлоги можуть бути епоксидні, акрилові, поліуретанові, епоксидно-уретанові, поліефірні. За стійкістю до певних видів впливів полімерні промислові підлоги поділяються на кислотостійкі, лугостійкі, ударостійкі, морозостійкі, вібростійкі, стійкі до нагрівання і т.д. Для промислових підлог використовується технологія

наливних підлог для створення безшовних поверхонь. Даний вид підлогових покриттів застосовується в приміщеннях з середніми та високими механічними навантаженнями та достатньо високими санітарно-гігієнічними вимогами. Разом з тим, значну частку промислових підлог становлять бетонні підлоги, що зумовлено перевагами покриття на основі портландцементу порівняно з полімерним - нижчою вартістю, вищою стійкістю до вогню та руйнування [117].

Крім того, влаштування полімерної підлоги вимагає влаштування надійної основи, виготовленої з якісних матеріалів, інакше наливні підлоги втрачають стійкість до механічних пошкоджень, з строгим контролем рівня вологості в приміщенні. Вологість поверхні бетонної основи не повинна перевищувати 5%, а вологість повітря в самому приміщенні – не більше 60%. Температура повітря при цьому повинна бути в межах 5–25 °С. Крім цього, бетонна основа повинна набрати необхідну міцність перед нанесенням покриття, а її нерівності не повинні перевищувати 3-5 мм. Для забезпечення максимальної адгезії, яка гарантує міцність наливного покриття, ще одним технологічним процесом є очищення основи від забруднень [93, 115].

Стан підлог безпосередньо впливає на надійність функціонування виробничих та інших процесів. Особливістю експлуатації конструкцій підлог є їх схильність до динамічних впливів від людей або техніки [115]. За останні роки спостерігається використання вищого та важчого стелажного та складського обладнання, відсутність належного догляду за конструкціями. У зв'язку з цим, на даний час відбувається перманентна тенденція погіршення стану конструкцій бетонної підлоги не тільки в будівлях старої забудови, а й на нових об'єктах, що створює загрозу для їх надійності. Тому збільшення інтенсивності руху, зростання навантажень і використання сучасного наземного транспорту висувають підвищені вимоги до бетонних підлог.

Виходячи з умов роботи підлог промислових і цивільних будівель, до них ставляться вимоги, об'єднані в групи [103]:

- загальнотехнічні – конструкції підлог повинні характеризуватися регламентованою міцністю і зносостійкістю, щоб чинити опір зусиллям розтягування, стиску і згину, ударів і стирання;

- технологічні – підлога повинна протистояти фізичним і хімічним впливам (дія води, високих температур, масел, кислот і т. д.), бути гладкою і забезпечувати можливість безпечного і зручного пересування людей і транспортних засобів, чинячи найменший опір руху;

- санітарно-гігієнічні – конструкції підлог не повинні в процесі експлуатації мати шкідливого впливу на здоров'я працюючих, не виділяти пилу, газів, запахів, а в окремих випадках забезпечувати комфортні теплотехнічні умови чи звукоізоляцію;

- експлуатаційні – підлога повинна передбачати можливість швидкого і зручного ремонту і піддаватися легкому і швидкому очищенню.

Експлуатаційні впливи є однією з основних причин зниження довговічності бетонних підлог, визначальними серед яких є:

- зусилля, що викликають вертикальні і горизонтальні напруження, що призводять до появи пружних і пластичних деформацій;

- місцеві силові й ударні навантаження, що спричиняють утворення відколів і вибоїн;

- вібраційні навантаження, що викликають розвиток сітки поверхневих, а іноді і наскрізних тріщин;

- короткочасні і тривалі охолодження і нагрівання поверхні, що виникають переважно поблизу приміщень з різним температурним режимом;

- абразивні впливи від руху транспортних засобів, руйнування при яких відбуваються особливо інтенсивно в разі забрудненої і запиленої поверхні, використання підйомно-транспортного устаткування з деформованими або зношеними колесами, а також при відсутності зміцнюючих захисних покриттів підлоги або застосуванні матеріалів низької якості [57].

Згідно з СНиП 2.03.13-88 інтенсивність механічного впливу на підлоги класифікується на дуже значну, значну, помірну та слабку залежно від інтенсивності руху пішоходів, транспорту на гусеничному та гумовому ході, металевих колесах, ударах при падінні з висоти, роботи гострими предметами на підлозі. Так, до класу значної інтенсивності механічного впливу відносять поверхні, по яких відбувається рух 200 одиниць транспорту на гумових шинах за добу, 50 одиниць візків на металевих шинах чи 10 одиниць на гусеничному ході, а також які зазнають ударів предметів масою не більше 20 кг, що падають з висоти 1 м.

Вплив експлуатаційного навантаження на матеріал підлоги вимагає оптимізації технічних характеристик, товщини та механічних властивостей окремих шарів підлоги. Промислові підлоги необхідно проектувати з урахуванням властивостей ґрунту та передбачуваних навантажень і включають шар однорідного і ущільненого ґрунту, несучий шар, оброблену поверхню [103, 145].

У процесі експлуатації впливам безпосередньо піддається верхній шар підлоги (покриття), який визначає експлуатаційну надійність конструкції в цілому. Тип промислового підлогового покриття залежить від цільового використання призначеного приміщення або від технології обробки, при цьому товщину підлоги потрібно визначати так само, як і дорожнє покриття [145].

Залежно від кількості шарів високоміцні підлоги бувають одношаровими і багатошаровими. Одношарові конструкції підлог, як правило, застосовуються при новому будівництві та відсутності спеціальних вимог. Правильне та тривале функціонування підлогового покриття вимагає застосування багатошарової конструкції з мінімум трьох взаємодіючих шарів. Багатошарові конструкції застосовуються при необхідності влаштування додаткових конструктивних шарів підлоги (гідро- і термоізоляційні шари), при розрахунковій товщині одношарової плити понад 25 см, а також при реконструкції або новому будівництві в разі наявності існуючих нижчих

бетонних шарів, які потребують підсилення, вирівнювання або створення ухилів.

Відповідно до чинних в Україні норм (СНиП 2.03.13-88. Підлоги) визначено такі шари промислової підлоги:

- покриття – верхній шар підлоги, який безпосередньо піддається експлуатаційним впливам;
- прошарок – проміжний шар підлоги, який зв'язує покриття з нижнім шаром підлоги або служить для покриття пружною основою;
- гідроізоляційний шар – шар, що перешкоджає проникненню у підлогу стічних чи ґрунтових вод;
- стяжка (основа під покриття) – шар підлоги для вирівнювання поверхні нижчого шару підлоги або перекриття, надання покриттю підлоги на перекритті заданого ухилу, укриття різних трубопроводів, розподілення навантажень по нежорстких нижчих шарах підлоги;
- підстиляючий шар – шар підлоги, що розподіляє навантаження на ґрунт.

За необхідності передбачають влаштування теплоізоляційного шару, що зменшує загальну теплопровідність підлоги, та звукоізоляційного шару, який запобігає проникненню ударного шуму в приміщення. Товщину покриття проектують залежно від інтенсивності механічних впливів. Згідно з вимогами СНиП 2.03.13-88 повна товщина підлог з бетонним покриттям повинна визначатися розрахунком на міцність і бути не менше 120 мм.

Згідно з рекомендаціями АСІ 302.1R-04 для малого трафіку достатньо укласти одношарове покриття. У цьому випадку бетонна поверхня укладається безпосередньо на ґрунт. Покриття товщиною 50–120 мм рекомендується армувати одним шаром металеві сітки з дроту діаметром 5 мм з комірками 100x100 чи 150x150 мм, а товщиною 120-180 мм – двома шарами металеві сітки.

Підлоги з вимогами щодо вищої стійкості проектують з використанням відповідних матеріалів, що забезпечують опір викривленню шару основи. У

цьому випадку необхідно виконати шар з бетону, армованого сталеву арматурою діаметром 3–8 мм з відстанню між ними або сіткою 20–30 см. В основному покриття влаштовуються по бетонній плиті або бетонній стяжці (прошарку), яка укладається на бетонну плиту. Міцність бетонної стяжки – не нижче 20 МПа при малій інтенсивності механічного впливу і не нижче 30 МПа при значній інтенсивності [103].

У більшості промислових, складських та торгових будівлях бетонні підлоги забезпечують міцну незношувану поверхню за умови дотримання вимог щодо проектування, використання матеріалів та будівельних технологічних процесів. У деяких промислових приміщеннях підлога повинна бути захищена іншими матеріалами, щоб надати хімічну стійкість [117].

Рекомендаціями АСІ 302.1R-04 передбачено для промислових об'єктів та складів з рухом транспортних засобів, включаючи сталеві колісні машини, використання бетону класу за міцністю В30 (С25/30), з обробкою його поверхневого шару металевими або мінеральними порошками. На промислових об'єктах при русі транспортних засобів, включаючи сталеві колісні транспортні засоби та ударне навантаження, рекомендовано використання бетонів класу В35 (С30/35) з наступною поверхневою обробкою.

Згідно з СНиП 2.03.13-88 для бетонної поверхні підлог дуже значного механічного впливу з врахуванням ударного навантаження від падіння предметів з висоти 1 м масою не більше 20 кг використовується бетон класу не нижче В40 (С32/40). У той же час, показники міцності каменю бруківки для застосування у покриттях, що піддаються ударному впливу 10-30 кг становлять не менше 60 МПа, а 30-50 кг – не менше 100 МПа. Підвищену міцність повинні мати конструкції бетонної підлоги з використанням для об'єктів з автотранспортними навантаженнями на підлоги помірної і значної інтенсивності (3500 – 5000 кг/м²) для гаражів, паркінгів та автостоянок.

Бетонні підлоги, як правило, складаються з основи – бетонної стяжки і покриття – матеріалу, що надає поверхні основні експлуатаційні властивості.

Разом з тим, бетон характеризується незначними пластичними деформаціями. Під дією зовнішніх навантажень і внутрішніх напружень в бетоні відбувається утворення тріщин і подальше руйнування конструкції підлоги. Одним із шляхів обмеження цих негативних процесів і забезпечення контролю появи тріщин в бетонній стяжці є нарізання деформаційних швів [103].

Згідно з PN-EN-13813 цементні стяжки для підлог (СТ) класифікуються за міцністю на стиск C5-C80, міцністю на згин (F1-F50), стійкістю до стирання (A), стійкістю до удару. При цьому міцність на стиск не менше C25, а на згин F4. До високоміцних цементних стяжок за вимогами цього стандарту відносять стяжки СТ - C 70 - F 11 - A 3, СТ - C 75 - F 9 - A 6 та СТ - C75 - F 9 - A 1,5. Товщина стяжки повинна бути не менше 45 мм.

Звичайний бетон характеризується крихкістю, в результаті чого при дії статичних (включаючи розтяг та згин), високошвидкісних динамічних навантажень та усадки відбувається тріщиноутворення [7, 83, 115]. Важкий бетон демонструє крихку картину руйнування при динамічних ударних навантаженнях, що створює суттєву загрозу цілісності та безпеці бетонного покриття. Крім того, на бетонних поверхнях під дією ударних навантажень можуть з'явитися тріщини, які спричиняють проникнення агресивних іонів (наприклад, хлорид-іонів), зумовивши корозію арматурної сталі і негативно вплине на довговічність залізобетонних конструкцій. За рахунок «ефекту стіни» при формуванні в опалубці частинки заповнювача менш щільно розміщуються на поверхні бетону, що призводить до утворення області із збільшеним вмістом цементного тіста. Порушення умов тверднення бетону призводить до збільшення ступеня тріщиноутворення на поверхні внаслідок ранньої усадки, зумовленої швидким випаровуванням [112, 128].

Для забезпечення необхідних характеристик, а також можливості здійснення раннього експлуатаційного навантаження розробники часто збільшують кількість портландцементу, рекомендовану нормами або підвищують міцність бетону у 28-добовому віці. Разом з тим, підвищена міцність бетону у ранньому та проектному віці, досягнута лише за рахунок

підвищеного вмісту портландцементу, може негативно вплинути на характеристики усадки при випаровуванні води та жорсткість (модуль пружності) бетону, що визначає стійкість плит до скручування, їх граничну несучу здатність [48, 94, 150].

Для контролю деформацій усадки бетонної основи до складу бетонних сумішей вводять синтетичні волокна, які зменшують утворення усадочних тріщин на поверхні за рахунок збільшення деформації на розтяг [96, 121, 132]. Найбільш широко використовуваними синтетичними волокнами є поліпропіленові та нейлонні. Зазвичай їх застосовують в підлогах та плитах у кількості від 0,45 до 0,90 кг/м³. Для армування бетонних покриттів можна використовувати сталеву фібру довжиною 50–80 мм діаметром 0,3–1,0 мм. Як матричний склад рекомендують використання бетону класу за міцністю В35 (С30/35). Покриття з сталевібробетону рекомендується товщиною 40–100 мм.

Автори зазначають [2–4], що поверхня бетону товщиною 5–10 мм відрізняється за властивостями від «об'ємного» бетону (внутрішня частина бетонної конструкції). Для покращення властивостей поверхні підлоги використовують декоративні та недекоративні мінеральні заповнювачі та металеві порошки (топпінгові суміші) [103]. Ці матеріали наносять у вигляді сухого порошку або рідини на поверхню бетону для підвищення стійкості до розтягування, ударостійкості, досягнення неслизьких поверхонь або отримання декоративного покриття підлоги. Рідкі ущільнювачі можуть бути на органічній та неорганічній основі. До групи органічних відносяться поліуретанові, акрилові, епоксидні склади. Заповнюючи пори бетону органічними молекулами, вони не тільки забезпечують ефективне знепилювання основи, але і значно покращують інші експлуатаційні якості покриттів, зокрема хімічну стійкість, водонепроникність і міцність.

Основою неорганічного рідкого ущільнювача бетону є неорганічні водорозчинні сполуки [103]. Після нанесення на поверхню, вони проникають в пори бетону на 3–5 мм. В основі технології знепилювання підлог з використанням складів цієї групи лежить принцип перетворення розчинних

сполук на поверхні покриття в нерозчинні. Наносити рідкий ущільнювач бетону можна як на стару основу, так і на свіже покриття. Разом з тим, в умовах впливу агресивних середовищ і при підвищених вимогах до безпильності рідкі склади застосовувати нераціонально.

Сухі топпінгові суміші створюють на основі портландцементу з додаванням наповнювачів, пластифікаторів, пігментів, що забезпечує необхідну адгезію основи та покриття [103, 115]. Верхній шар такої підлоги здатний витримати навантаження більше 70 МПа. Сухий ущільнювач наноситься на свіжовкладену та відшліфовану поверхню. Залежно від експлуатаційних вимог до підлоги використовують зміцнюючі суміші з різними наповнювачами: з кварцовим піском (для приміщень зі збільшеними виробничими навантаженнями); з корундовим наповнювачем (для підлоги, стійкої до стирання); з металевою стружкою (для покриття, що витримує часті ударні навантаження та характеризується підвищеними антистатичними характеристиками). Разом з тим, застосування топпінгових сумішей потребує виконання додаткової технологічної операції, що призводить до зростання трудомісткості та собівартості виконання промислової підлоги.

Конструкції і матеріали основ і покриттів підлог складських будівель і приміщень впроваджують з урахуванням сприйняття навантажень від складованих вантажів, виду та інтенсивності механічних впливів наземним транспортом, пилевиділення. Поверхні бетонних підлог піддаються впливу абразивних сил шляхом стрируючої або ковзаючої дії шин транспортних засобів [24, 26]. Низька здатність бетону протистояти стиранню призводить до зменшення товщини бетонної плити та підвищеного пилоутворення. Зменшення товщини бетонного покриття спричиняє зростання напружень розтягу матеріалу, що призводить до тріщиноутворення та скорочує термін експлуатації бетону. Згідно з європейськими нормами PN-EN 206+A1:2016 та DIN 1045-2:2008-08 корозійний вплив, спричинений стиранням, якому піддаються промислові підлоги, класифікується на класи XM1–XM3, що вимагає використання бетонів мінімального класу за міцністю C30/37–C35/45

та максимального водоцементного відношення 0,55-0,45 залежно від класу впливу. Стираність покриття підлоги не повинна перевищувати для монолітних покриттів підлог в приміщеннях класу беззапиленості 100 – 0,06 г/см², класу 1000 – 0,09 г/см² і класу 10000 – 0,12 г/см².

До основних факторів, що впливають на стійкість бетону до стирання, відносять міцність на стиск, тип та вміст заповнювачів [2, 26], умови навколишнього середовища, використання додаткових цементуючих матеріалів, зокрема пуцоланових добавок [13, 85]. Також на стійкість до стирання впливають такі важливі фактори, як обробка поверхні, догляд за бетоном та умови тверднення. При однаковому водоцементному співвідношенні властивості грубого заповнювача є визначальним фактором стійкості до стирання. Так, Laplante P. та ін. [126] виявили, що гранітні заповнювачі забезпечували одержання бетону більш стійкого до стирання, ніж заповнювачі доломіту або вапняку.

Пилоутворення бетонних покриттів спостерігається при використанні важких бетонів низьких класів, особливо класів нижче С12/15. Дворкіним Л.Й. показано [26], що при використанні заповнювачів високої якості, бетон класу за міцністю не нижче В25 (С20/25) буде стійким до дії абразивних матеріалів. Встановлено [151], що при міцності на стиск близько 120-150 МПа бетон характеризується приблизно такою ж стійкістю до стирання, як і граніт.

Отже, сучасні технології промислових, складських та транспортних технологій вимагають створення бетонних основ, здатної витримувати інтенсивні впливи різних видів навантажень: статичних, динамічних, температурних, хімічних. Для забезпечення надійної експлуатації промислової підлоги без ремонту та реконструкції протягом тривалого часу, досягнення економії трудових та матеріальних ресурсів необхідно впровадження ефективних технічних, технологічних та організаційних рішень, що базуються на використанні високоміцних бетонних підлог з необхідними фізико-механічними і естетичними властивостями, що вимагає

розроблення високоміцних бетонів з стабільними експлуатаційними властивостями протягом життєвого циклу.

1.2. Основні принципи одержання високоміцних бетонів

У сучасному будівництві впроваджуються концепції менеджменту якості (quality management) бетонів та “життєвого циклу” (Life Cycle Approach) будівельних конструкцій, що зумовлює поширення тенденції застосування високоміцних бетонів, в т.ч. у конструкціях промислових підлог [76, 117]. Використання бетонів вищих класів дозволить знизити витрату матеріалів, власну вагу конструкцій, зменшити їх перетин, густоту армування, створити більш раціональні конструктивні форми елементів, підвищити зносостійкість конструкцій та виробів на їх основі [3, 13]. Знижена деформативність високоміцного бетону під дією короткочасного і тривалого навантаження покращує жорсткість елементів конструкції і дозволяє зменшити втрати попереднього натягу від повзучості бетону. Усадка високоміцного бетону, як правило, не перевищує в порівнюваних умовах аналогічних деформацій бетону звичайної міцності [94].

Згідно з визначенням СЕВ Bulletin of Information 197 – FIP, High strength concrete – State of the art report; SR 90/1-1990 до високоміцних важких та надважких бетонів належать бетони з міцністю на стиск 60-130 МПа. Базуючись на цьому, відповідно до діючих в Україні та Європейському союзі стандартів, високоміцний бетон відповідає класу за міцністю C50/60 та вище, тобто характеристична міцність бетону, що визначається на зразках-кубах з ребром 150 мм, повинна становити не нижче 60 МПа. У той же час, середня міцність бетону згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008 повинна перевищувати 77 МПа, а згідно Європейських норм EN 206-1:2000 – 64 МПа. За вимогами [151] Американського інституту бетону (ACI), до високоміцних належать бетони, міцність яких вища 6000 psi, тобто більше 41 МПа.

Під час експлуатації цементний бетон промислових підлог може піддаватися статичним і динамічним навантаженням, поперемінному зволоженню і висушуванню, заморожуванню і відтаванню у поєднанні з агресивним впливом ґрунтових вод. Стандарт EN 206-1 та український ДСТУ Б В.2.7-176:2008 передбачають 18 класів впливу зовнішніх факторів на бетон, в залежності від яких до складу бетонів встановлені граничні вимоги. Вони включають: вибір компонентів, максимальне водоцементне відношення В/Ц, мінімальний вміст цементу та мінімальний клас міцності при стиску. Бетонне покриття підлоги потребує застосування бетону з підвищеними характеристиками міцності та довговічності, тоді як нижні шари проектуються з використанням бетону нижчої міцності, що є економічно ефективним та доцільним.

Серед високоміцних бетонів останнього покоління найбільшу увагу привертають бетони, отримані на основі портландцементу, модифікування структури яких здійснене за рахунок використання суперпластифікаторів і мінеральних добавок. Міцність при стиску таких матеріалів досягає 100 МПа. У зарубіжній фаховій літературі такі бетони відомі під назвою DSP (Densified Small Particles) [21]. Крім того, відомі портландцементні бетони, які містять в своєму складі водорозчинні полімери (наприклад, гідроксиполімерцеллюлозу і гідролізований поліхлоридвініл), які підвищують ступінь ковазання частинок і тому забезпечують їх високу щільність. Такі композити характеризуються високою міцністю при стиску до 150 МПа і згині, модуль Юнга становить 40-50 ГПа, опір утворенню тріщин – 1 кДж·м². Вони можуть містити наповнювачі, які дозволяють отримувати матеріали зі спеціальними властивостями (підвищеною твердістю, електропровідністю, зносостійкістю) [40, 97].

У бетонних покриттях промислових підлог, крім навантажень стиску діють і згинальні, що зумовлює виникнення напружень розтягу при проїзді транспорту, при гальмуванні і наборі швидкості, а також стоянці. За Толмачовим С.М. та ін. [88, 156] для отримання високоміцних бетонів з

підвищеною міцністю бетону на розтяг при згині слід використовувати високоактивні за міцністю на розтяг при згині портландцементи.

За твердженням Гамеляка І.П. [16, 22], значення В/Ц для високоміцних бетонів при активності цементу на розтяг при згині $\geq 6,0$ МПа не повинно перевищувати 0,33, що зумовлює вищу витрату цементу (більше 400 кг/м³). У зв'язку з цим, для одержання високоміцних бетонів слід застосовувати ефективні комплекси суперпластифікаторів з водоредукуючим ефектом більше 25 %.

У СЕВ Bulletin of Information 197 – FIP виділено три напрямки одержання високоміцних бетонів: зниження загальної пористості, зниження максимального середнього розміру пор та збільшення кількості гідросилікатного гелю в структурі бетону. У зв'язку з цим, основними умовами отримання високоміцних бетонів є використання високоактивних в'язучих речовин (портландцемент, лужні цементы, в'язучі речовини з низькою водопотребою, полімерні в'язучі речовини), крупних і дрібних заповнювачів відповідної якості і гранулометричного складу. Також важливим для проектування високоміцних бетонних сумішей є використання пластифікуючих добавок, в тому числі суперпластифікаторів, а також мікронаповнювачів та пуцоланових мінеральних добавок.

Одним з методів радикального підвищення міцності бетонів є зменшення В/Ц за рахунок застосування жорстких та наджорстких бетонних сумішей. Разом з тим, у такому випадку потрібно передбачати додаткові засоби і механізми силового та/або вібраційного впливу для їх ущільнення та формування [2, 10, 24]. Завдяки даним технологіям міцність бетону підвищується в 1,5–2,0 рази, також значно збільшуються водонепроникність, морозостійкість, опір стиранню бетону і зчеплення з арматурою, проте такі технології ущільнення неможливо застосувати при бетонуванні промислових підлог [115].

До матеріалів, що використовуються для приготування високоміцного бетону, висувуються підвищені вимоги, що забезпечують отримання бетоном

потрібних властивостей при мінімальних витратах вихідних матеріалів [3, 37]. Збільшення міцності цементного каменю відкриває широкі можливості зниження витрат портландцементу при виробництві бетонних виробів з нормованими показниками міцності. Як в'яжуче для високоміцних бетонів доцільно застосовувати високоактивні портландцементи з мінімальною нормальною густиною. Рекомендуються цементы, у яких нормальна густина цементного тіста не більше 25–26% і активність не нижче 50–60 МПа. Швидке наростання міцності в ранньому віці дозволяє скоротити до мінімуму використання прискорювачів тверднення бетону [24].

Збільшення питомої поверхні цементу, його реакційної здатності (активності) значно впливає на формування структури бетону, швидкість тверднення і кінцеві характеристики. Використання активованого цементу дозволяє сформувати більш щільну і однорідну структуру бетону, що дає різкий приріст добової міцності і подальше її збільшення через 28 діб тверднення. Підвищення міцності цементного каменю в початкові терміни тверднення значною мірою обумовлюється саме тониною помелу [14, 21]. Авторами досліджено, що зростання питомої поверхні портландцементу з 300 м²/кг до 400–500 м²/кг дозволяє збільшити міцність бетону з 40–50 МПа до 60–75 МПа [50]. Однак виготовлення тонкомелених портландцементів супроводжується суттєвим (до 40–50%) зниженням продуктивності помольних агрегатів, зростанням витрат електроенергії на розмелювання, а механоактивовані в'яжучі характеризуються швидким зниженням активності при зберіганні [21].

Основою технічних та технологічних рішень сучасних напрямків створення і виготовлення високоміцних бетонів є використання і застосування багатокомпонентних в'яжучих речовин, які поєднують мінеральні добавки різних типів та комплексні модифікатори багатофункціональної дії, а також високотехнологічні процеси [16, 43, 61, 70].

Перспективним напрямком є використання наномодифікованих портландцементних систем, розроблених під керівництвом Саницького М.А.

[53, 75, 143]. Надшвидкотверднучі високоміцні цементуючі системи, одержані за технологією наномодифікування „знизу-вверх” шляхом введення суспензії активних нанорозмірних частинок гідросилікатів кальцію, які є центрами кристалізації C-S-H фаз в міжзерновому просторі, та полікарбоксилатних суперпластифікаторів, класифікуються як швидкотверднучі високоміцні, на їх основі запроектовано високоміцні бетони з швидким наростанням міцності в нормальних умовах тверднення та при тепловологій обробці ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,55-0,62$) та високою міцністю в проектному віці – клас за міцністю C 55/67–C60/75 [65, 68].

Саницьким М.А. та Кропивницькою Т.П. [123, 124] встановлено принципи наномодифікування цементного каменю на мікро- та наномасштабному рівнях і за методом золь-гель технології синтезовано лужний нанокомпозит N-C-S-H-PCE, що забезпечило одержання лужноактивованих високоміцних портландцементних композицій з високою ранньою міцністю. На їх основі отримано наномодифіковані швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони класу міцності C50/60 з покращеними експлуатаційними властивостями.

Пушкарьовою К.К., Суханевич М.В. [86] розроблено гідроізоляційні розчини з покращеними експлуатаційними властивостями, в тому числі з високою водонепроникністю, тріщиностійкістю та корозійною стійкістю на основі цементів з добавками алюмосилікатів шаруватої та каркасної будови, наномодифікованих енергетично активними нанорозмірними вуглецевими добавками, при цьому створюються умови для синтезу низькоосновних гідросилікатів та гідроалюмінатів кальцію на поверхні вуглецевих нанодобавок. Разом з тим, введення вуглецевих нанодобавок потребує застосування диспергування для їх рівномірного розподілення в об'ємі цементної матриці.

В.Д. Глуховським, П.В. Кривенком, Р.Ф. Руновою, К.К. Пушкарьовою та ін. [14, 43, 49] розроблені особливошвидкотверднучі високоміцні лужні цементы, які одержують при замішуванні меленого шлаку водними розчинами

солей лужних металів, а в якості активатора додатково вводять 2–6 мас.% портландцементного клінкеру. Бетони на основі шлаколуужних в'язучих характеризуються високою водо- та сульфатостійкістю, водонепроникністю та довговічністю, проте вони мають обмежене застосування у будівництві.

У формуванні властивостей високоміцного бетону зростає роль заповнювачів. При цьому використовуються природні, штучні (або їх суміші) фракціоновані піски, що поставляються у вигляді двох фракцій - крупної (розмірами зерен від 1,25 до 5 мм) і дрібної (розмірами зерен від 0,16 до 0,63 мм) [71, 89]. Згідно з ДСТУ Б В 2.7-43 для бетонів класу за міцністю вище В45 (С35/45) слід використовувати щебінь з метаморфічних порід марки не нижче 1200. Вміст у крупних заповнювачах зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми не повинен перевищувати 25% за масою. Як дрібний заповнювач високоміцних бетонів використовують кварцовий пісок з модулем крупності не менше 2,1. Для приготування високоміцних бетонів класу С55/67 застосовують чисті крупно- або середньозернисті піски, крива просіювання яких знаходиться в межах області, рекомендованої стандартами [37], що вимагає раціонального підбору фракцій заповнювачів у складі бетонів.

З метою випуску високоякісних бетонів розроблені новітні методи пластифікування бетонних сумішей, а також отримані найбільш активні пуцоланові добавки з високою кількістю наночастинок верхнього нанометричного рівня (100-300 нм) – мікрокремнеземи, високодисперсні золи і дегідратовані каоліни [4, 70, 141, 150].

Одержання високоміцних бетонів з високорухомих сумішей ґрунтується на зниженні водоцементного відношення за рахунок використання добавок-пластифікаторів. Пластифікатори – це поліелектроліти органічного походження (поверхнево-активні речовини – ПАВ), їх ефективність виявляється в здатності знижувати водопотребу на 10-40%, а також зберігати технологічні властивості бетонних сумішей протягом не менше 30 хв. Як відомо [2, 5, 10, 144], суперпластифікатори поділяються на чотири основні види: сульфовані продукти конденсації нафталіну з

формальдегідом (СНФ), меламінсульфокислоти з формальдегідом (СМФ), модифіковані лігносульфонати технічні (МЛСТ) і полікарбоксилатні ефіри.

Ефективність хімічних добавок пов'язана з різними чинниками, такі як вид добавки, тип цементу, його мінералогічний і хімічний склад, відсотковий вміст добавки та точність дозування, наявність інших добавок, кількість води у суміші, зерновий склад та вид заповнювача, температура тверднення, час перемішування в міксері, спосіб, момент введення добавок [18, 28]. Встановлення сумісності системи “цемент–добавка” є необхідним алгоритмом підбору добавки та дасть змогу оптимізувати рішення з погляду економічної та технологічної ефективності [89].

Водоредукуючий ефект сучасних суперпластифікаторів на основі модифікованих полікарбоксилатних ефірів становить 30–40%, в той час як для модифікованих лігносульфонатів, як правило, не перевищує 15%, а для сульфованих нафталін формальдегідних конденсатів – 25% [24, 63]. Згідно з DIN 1045-2:2008-08 для високоміцних бетонів кількість добавок пластифікуючої групи обмежена до 70 г/кг або 70 мл/кг цементу при забезпеченні мінімально необхідної рухомості бетонної суміші класу F3 (розплив конуса 420-480 мм), що вимагає використання суперпластифікаторів IV покоління.

Диспергування і стабілізація цементного тіста при використанні поліакрилатів і полікарбоксилатів забезпечується в основному за рахунок значного стеричного ефекту відштовхування [4]. За рахунок бокових гідрофобних поліефірних ланцюгів молекул полікарбоксилатів тривалість їх пластифікуючої дії в 3-4 рази довша порівняно з сульфомеламіновими [24, 95]. При взаємодії полікарбоксилатів із цементними зернами щільність адсорбції ПАР на поверхні цементного зерна є меншою в результаті цього зберігається частина активних центрів, що забезпечує доступ води для гідратації клінкерних мінералів, на відміну від пластифікаторів на основі сульфованих меламін- і нафталінформальдегідних смол [18, 30, 42].

У працях дослідників [18, 63] зазначено, що підвищення редукуючої дії суперпластифікаторів відбувається із зростанням дисперсності компонентів, що досягається за рахунок збільшення частки ультрадисперсних складових додаванням до цементу активного високодиспергованого мікрокремнезему.

При розробленні високоміцних матеріалів на основі портландцементу автори [92, 125, 130] звертають увагу на необхідність застосування принципів формування надщільної упаковки. Така концепція реалізується шляхом використання мінеральних добавок, зокрема золи-винесення, метакаоліну та мікрокремнезему, при введенні яких до складу портландцементу відбувається самоущільнення на мікрорівні і значне підвищення характеристик портландцементу [97].

Мінеральні добавки вже давно стали обов'язковим компонентом високоміцного бетону [147, 154]. Розрізняють декілька груп високодисперсних матеріалів [24]:

- мікронаповнювачі або інертні добавки (пилоподібні відходи при дробленні гірських порід і т.д.);
- активні мінеральні добавки з невеликою пуцоланічною активністю (золи ТЕС);
- високоактивні добавки (мікрокремнезем, природні пуцолани, сланцеві золи).

Такий поділ є умовним, оскільки добавки, інертні при звичайній дисперсності ($200\text{--}500\text{ м}^2/\text{кг}$) стають високоактивними при надтонкому подрібненні (більше $1500\text{ м}^2/\text{кг}$). У зв'язку з цим, Саницьким М.А. запропоновано проводити оцінку мінеральних добавок за інтегральним коефіцієнтом поверхневої активності, який дозволяє враховувати вплив кожної фракції у сумарну питому поверхню [74, 104]. З врахуванням цього, запроєктовано швидкотверднучі цеолітвмісні цементы [73, 74], а також високофункціональні бетони (клас В80 (С60/75) і вище) на основі мультимодальних портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками (механоактивованих до $S_{\text{пит}} \geq 1000\text{ м}^2/\text{кг}$ піску та золи-

винесення) з швидким наростанням міцності в нормальних умовах тверднення ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,5$), підвищеною морозостійкістю (F300), водонепроникністю (W20), атмосферостійкістю [71].

Мінеральні добавки вводять в бетонну суміш у кількості 50–200 кг/м³, їх вплив на структуру і властивості бетону є багатоаспектним. Автори виділяють основні механізми дії мінеральних добавок [77, 93, 150]: обмеження утворення гідроксиду кальцію на межі розділу цемент-заповнювач за рахунок зв'язування гідроксиду кальцію в гідросилікати, ущільнення перехідної зони цемент-заповнювач, зниження внутрішнього водовідділення, посилення дії суперпластифікаторів, підвищення початкової щільності цементної матриці за рахунок ефекту щільної упаковки.

Зола-винесення використовується в бетоні з метою заміни частини цементу (при типових показниках заміщення близько 15% від маси цементу), збільшуючи довготривалу міцність і довговічність бетону. Разом з тим, для одержання високоміцних бетонів золу-винесення рекомендують використовувати разом з мікрокремнеземом [142, 147].

На думку Баженова Ю.М., Чернишова Е.М., Коротких Д.Н. [4, 46] основна структурна роль мікронаповнювача полягає в ущільненні цементної системи. Так, поєднання мікрокремнезему (10%) і нанокремнезему ($d = 15$ нм, 2%) забезпечує покращення консистенції бетонної суміші: знижується водовідділення і розшарування [120]. На структурному рівні цементної матриці ультрадисперсні мінеральні добавки (частинки, розмір яких на один-два порядки менше, ніж цемент), наприклад мікрокремнезем, крім цієї прямої функції виконують також фізико-хімічну структуроутворюючу функцію [97]. Авторами [153] показано, що із введенням пуцоланових добавок зростає їх ударна в'язкість, що зумовлено наявністю води в гелевих порах, яка працює як амортизатор під час випробувань на вигин.

Мінеральна добавка активізує процеси гідратації в'язучого, сприяє збільшенню кількості гідратів, серед яких зростає частка міцніших і стійкіших низькоосновних гідросилікатів кальцію типу CSH (I) з співвідношенням

$C/S \leq 1,0$ замість первинних кристалогідратів типу портландиту і високоосновних гідросилікатів кальцію, що сприяє ущільненню структури на контакті з добавкою зі значним підвищенням мікротвердості гідратних зростків [97, 124]. Для забезпечення отримання високоякісних бетонів необхідно постійно контролювати пуцоланову активність використовуваних мінеральних добавок, яка зростає із збільшенням дисперсності добавки. У цьому плані інтерес представляє використання нанокремнезему [120].

Разом з тим, одним із недоліків ультрадисперсних добавок вважають підвищену водопотребу та здатність до агрегації, внаслідок чого портландцементні системи втрачають рухливість, що призводить до застосування підвищеної кількості суперпластифікаторів для забезпечення пластифікуючого ефекту [24]. Добавка метакаоліну одержується із спеціальної сировини та з використанням спеціального обладнання, що збільшує його собівартість.

Особливий інтерес представляє вивчення впливу спільного введення суперпластифікатора і мінеральної добавки, оскільки при цьому може змінюватися не тільки пористість цементного каменю, а й співвідношення між продуктами гідратації, модуль пружності яких різний [136, 140]. За даними Несветаєва Г.В. [63] суперпластифікатор на основі ефіру полікарбоксилатів змінює величину відносного модуля пружності цементного каменю на 10%, в той час як при спільному застосуванні з мінеральною добавкою досягається більш істотне підвищення величини відносного модуля пружності на 20%.

Авторами [52] розроблено високоміцні бетони з литих сумішей класів В50-В70 (С40/50-С55/67) з використанням комплексної добавки на основі метакаоліну та суперпластифікатора С-3, разом з тим, такі бетони характеризуються підвищеною витратою портландцементу – 500 кг/м³. Авторами [33] показано, що з технологічної точки зору для досягнення високої міцності бетону (до 78 МПа) при збереженні високої легкоукладальності бетонної суміші (Р4) у часі доцільно використовувати в складі бетонної суміші 0,8 % суперпластифікатора та 15% суміші наповнювачів, що складається з 70%

золи винесення і 30% метакаоліну або 40...60%, крім цього такий бетон характеризується підвищеною стійкістю до хімічних агресивних середовищ.

Соболь Х.С. та ін. [82, 114, 133] розроблено високоміцні бетони для транспортного будівництва класу рухомості бетонної суміші S3, міцністю бетону 66-71 МПа, стиранистю 0,29 г/м² з використанням полікарбонатного суперпластифікатора, повітрязахоплюючої добавки та полідисперсного цеолітового компонента для реалізації внутрішнього догляду за бетоном. Проте відсутні дані про ударну в'язкість розроблених бетонів.

Термін „високофункціональний” бетон об'єднує під собою поняття багатокомпонентних бетонів з високими фізичними та експлуатаційними властивостями, довговічністю, міцністю, ударною в'язкістю і стиранистю, надійними захисними властивостями у відношенні до залізної арматури, високою хімічною стійкістю [93, 94]. Високофункціональний бетон, що виготовлений із литих і високорухливих бетонних сумішей з проектним органічним водоутриманням, характеризується міцністю при стиску у віці 2 доби 30–50 МПа, у віці 28 діб – 60–150 МПа, морозостійкістю – F600, 700 і більше, водопоглинанням – менше 1–2 %, стиранистю – не більше як 0,25–0,4 г/см². У реальних умовах експлуатації прогнозована довговічність конструкцій і споруд з таких бетонів перевищує 200 років. Можливе отримання і супердовговічних конструкцій з бетонів із довговічністю до 500 років.

Технічна і технологічна реалізація випуску високоміцних бетонів для бетонування промислових підлог дасть змогу комплексно та системно вирішити питання економії цементу та інших ресурсів, забезпечити зниження трудомісткості робіт під час вкладання бетонних сумішей. Розроблені комплексні модифікатори різної дії з використанням суперпластифікаторів нової генерації дають змогу покращити технологічні властивості сумішей, а отримані на їх основі високоміцні бетони характеризуватимуться високими експлуатаційними показниками. Разом з тим, при цьому різко зростає крихкість бетону, що вимагає застосування способів підвищення стійкості

бетонів промислових підлог до ударних та динамічних експлуатаційних навантажень.

1.3. Шляхи підвищення ударної в'язкості бетонів

Бетонне покриття промислових підлог часто піддається динамічним діям, деформації при яких набагато вищі, ніж у стандартних квазістатичних випробуваннях. Особливістю ударних навантажень є короткочасність їх впливу 10^{-2} – 10^{-5} с. При дії на бетон ударних навантажень прийнято виділяти звичайні і високошвидкісні ударні впливи [115]. Дія звичайних ударних навантажень відбувається за 10^{-2} – 10^{-3} с зі швидкістю до 5 м/с, що відповідає вільному падінню вантажу з висоти 1–3 м. Швидкість зростання напружень становить при цьому 10^2 – 10^3 МПа/с. Високошвидкісне ударне навантаження діє протягом 10^{-4} – 10^{-5} с зі швидкістю 10–15 м/с і більше. При такому динамічному впливі напруження в бетоні зростають зі швидкістю понад 10^5 МПа/с [91]. Виходячи з цього, на промислові підлоги діятиме ударне навантаження вільно падаючого вантажу, тобто навантаження зі звичайними швидкостями.

Авторами показано [15, 86], що початкові дефекти в структурі бетону (особливо мікротріщини) значно більше впливають на динамічну, ніж на статичну міцність бетону за рахунок зменшення можливостей перерозподілу напружень, що зумовлено запізненням розвитку мікропластичної деформації. Бетон характеризується неоднорідною структурою, що визначається значною відмінністю складових бетону за пружними і міцнісними характеристиками, пористістю на всіх рівнях, якості і гранулометрії заповнювачів [3, 43, 87]. Дефектність структури бетону включає дефектність цементного каменю, яка визначається мікротріщинами термомеханічної і усадочної природи, і

недосконалістю контактного шару між цементним каменем і заповнювачем [118].

Проведені дослідження з оцінки впливу неоднорідності структури цементного каменю і бетону на механізм руйнування, міцність, ударостійкість показали, що існує ряд способів вдосконалення структури з метою підвищення фізико-механічних властивостей бетону. Вировим В.М., Коробко О.О. [1, 44] визначено, що підвищення механічних та деформативних властивостей бетону можна досягнути за рахунок направленої організації структури на макрорівні шляхом забезпечення різноманітних умов взаємодії матричної складової з заповнювачами, а стійкість бетону під впливом різного виду навантажень визначається співвідношенням інтенсивності структурної переорганізації та швидкості реакцій на тих чи інших складових структури.

Регулювання ударної в'язкості бетону на мікрорівні структури пов'язано з можливістю керувати характеристиками порової структури матеріалу [6, 90]. Усунення дефектів структури на мікрорівні досягається забезпеченням фізичної оптимізації за рахунок високої щільності упакування зерен цементуючої системи при введенні дрібнодисперсних добавок; хімічною оптимізацією при реалізації пуцоланових взаємодій; оптимізацією мезоструктури бетону за рахунок збільшення зчеплення між цементною матрицею та заповнювачем [72, 74, 93, 94]. Авторами показано зростання ударної в'язкості із зростанням кількості гідросилікатної фази, що утворюються внаслідок пуцоланових реакцій між активними мінеральними добавками та кальцію гідроксидом у цементній матриці [4, 153].

Гальмування росту та поширення тріщин у бетоні можна забезпечити зміною умов концентрації напружень шляхом використання компонентів, що створюють додаткові границі розділу фаз, які змінюють траєкторію поширення тріщин [39, 44, 83].

Одним з таких способів є введення в бетонну суміш маложорстких пористих мінеральних компонентів (демпфуючих добавок) різної дисперсності, дослідженню цього напрямку присвячені роботи

Давлетшина М.Б., Капітонова С.М., Комохова П.Г., Мохова В.Н., Якушина В.А. [109, 110]. Такий прийом дозволяє значною мірою оптимізувати структуру бетону, підвищивши його міцність на розтяг, тріщиностійкість, ударну витривалість, морозостійкість. Компоненти пониженої жорсткості на шляху тріщини дають можливість знизити рівень напружень в її вершині пропорційно співвідношенню модулів пружності фаз матриці і демпфера, при цьому рівень густини пружної енергії знизиться пропорційно квадрату модулів пружності за рахунок зміни напружень. В ідеальному випадку висока деформативність і високі пружно-в'язкі властивості демпфуючої фази при доброму зчепленні з матрицею можуть зумовити енергетичну невідповідність тріщиноутворення і його локалізацію [68, 91].

Запропонована класифікація демпфуючих компонентів за ступенем жорсткості [68]. До групи підвищеної жорсткості (модуль пружності $(1,0-1,8) \cdot 10^4$ МПа) відносять керамзитовий пісок, пісок з порід осадового походження, до групи помірної жорсткості (модуль пружності $(0,1-1,0) \cdot 10^4$ МПа) – перлітовий пісок, до групи низької жорсткості (модуль пружності 10^2-10^3 МПа) – подрібнена гума, пінополістирол. У роботі [61] як демпфуючий компонент використано керамзитовий пісок різної дисперсності і характеристик, а також дисперговану гуму з отриманням бетонів з 2–3-кратною ударною витривалістю порівняно з вихідним варіантом дрібнозернистих і важких бетонів, що є недостатнім показником.

У граничному випадку демпфером при ударному навантаженні є включення з нульовою жорсткістю, якими є пори. Однак такі включення, будучи вираженими концентраторами напружень, формують власне поле напруг високої інтенсивності [66, 69, 94]. Локальне підвищення напружень навколо низькомодульного включення інтенсифікує процес тріщиноутворення за механізмом взаємодії зростаючої тріщини з областю концентрації напружень. У зв'язку з цим, демпфуючий компонент з низькою жорсткістю може не забезпечити зупинки тріщини через порушення рівноваги внаслідок перерозподілу напружень і перевантаження протилежного берега

фази основного матеріалу з подальшим руйнуванням за силовим механізмом через перевантаження або за енергетичним – за рахунок ініціювання нових рівноважних тріщин.

Фіцом С. [91] показано, що при оцінці здатності бетону протистояти ударним навантаженням необхідно враховувати його вологісний стан. Так, ударна в'язкість знижується на 30–85%, в той час, як міцність на стиск та модуль пружності знижуються на 10–60%. Бетони, насичені водою, більш чутливі до імпульсивних навантажень, ніж до статичних, що необхідно враховувати при проектуванні складів бетонів для конструкцій, які експлуатуються в зонах підвищеної вологості і схильних до ударного навантаження. Дослідження показали, що для підвищення ударної стійкості бетонів, експлуатація яких передбачається в таких умовах, слід обмежувати вміст сумішей в межах В/Ц = 0,40–0,45, а також забезпечити заходи, які б знизили відкриту пористість бетону.

Одним з шляхів підвищення ударної стійкості є підвищення статичної міцності бетону [45, 62]. Однак вказані бетони забезпечують відносно помірне підвищення ударної витривалості у 2–4 рази, що не є достатнім для бетонів, які працюють в умовах динамічного впливу [45, 61]. Крім цього, автори [13, 40] відзначають, що з підвищенням міцності бетону зростає і його крихкість, знижуються пластично-деформаційні властивості, що визначає практично миттєве руйнування матеріалу при досягненні ним граничного стану. Тому виникає необхідність введення підвищених коефіцієнтів безпеки і надійності при проектуванні конструкцій з високоміцного бетону та необхідність підвищення в'язкості руйнування (тріщиностійкості) високоміцного бетону [39, 47].

Застосування традиційних методів армування бетонних сталевих плоских або тривимірних каркасів може призводити до неоднорідності структури, утворення пустот у бетоні, погіршення деформаційних характеристик структури [58, 112]. Найбільш ефективне рішення цієї проблеми лежить в площині застосування дисперсного армування, здатного

забезпечити тривимірне армування, підвищення механічних характеристик бетону (міцності, тріщиностійкості, ударостійкості і т. д.), експлуатаційної надійності конструкцій, можливість скорочення робочих перетинів конструкцій, зменшення витрат стрижневої арматури за рахунок збільшення несучої здатності матеріалу [31, 32, 58]. Переваги дисперсно-армованих бетонів, на відміну від традиційних матеріалів, визначаються високим співвідношенням жорсткості та міцності до маси [20, 100].

Вирішення проблеми підвищення тріщиностійкості бетонів значною мірою полягає у сповільненні розвитку тріщин на всіх структурних рівнях шляхом введення дискретних армувальних елементів. При цьому відбувається зміна умов і енергетики формування тріщин у структурі матеріалу [34, 102, 105]. Армувальними елементами на макромасштабному рівні є волокна зі співвідношенням довжина/діаметр частинки $(l/d) > 1$, а на мікромасштабному рівні цементуючої матриці – ультрадисперсні мінеральні добавки, для яких l/d становить близько одиниці [46]. У цьому випадку дисперсна арматура, розташовуючись в бетонній матриці, створює просторовий каркас, який перешкоджає утворенню, зростанню і поширенню тріщин, при цьому підвищується не тільки міцність, але й в'язкість руйнування бетону [139].

Для ефективного використання армувального компоненту необхідно, щоб його модуль пружності був вищий, ніж модуль пружності бетонної матриці [69, 93]. Ефективність дисперсного армування залежить від структури, міцності матриці, а також від параметрів волокон і їх властивостей. Ефективність дисперсного армування залежить від об'ємного вмісту фібри і її механічних і термохімічних властивостей, співвідношення між параметрами волокнистої арматури і параметрами структури бетонної матриці, довжини фібри і рівня дисперсності армування [27, 117].

У роботах [111, 119] показано, що міцність при стиску бетону істотно не залежить від довжини фібри, а залежить тільки від її кількості в суміші. При цьому міцність на згин бетону визначається довжиною дисперсної фібри, і

найбільше її значення досягається при армуванні розтягнутої частини довгою фіброю, а стиснутої частини – короткою фіброю.

Встановлено [110, 131], що в разі застосування дисперсного армування виникають додаткові механізми підвищення в'язкості руйнування, пов'язані з появою значної кількості поверхонь розділу, які викликають дисипацію енергії руху тріщин. Такі механізми зростання тріщиностійкості пояснюються послідовними процесами «гальмування» поширення тріщин за рахунок руйнування границь розділу між волокном і матрицею; витягування волокон з матриці. У випадку відносно високої швидкості деформації, час ударного навантаження надзвичайно короткий, і динамічна міцність на стиск дисперсно-армованих бетонів збільшується за рахунок збільшення енергії для утворення тріщин [116].

За природою матеріалу дисперсні волокна класифікуються на металеві, полімерні або природні [109, 132]. Згідно з іншою класифікацією армувальні волокна поділяються на високомодульні і низькомодульні [58]. Низькомодульні волокна характеризуються значним відносним подовженням при розриві, в цьому випадку спостерігається підвищення ударної в'язкості бетону. Застосування високомодульних волокон дозволяє досягти також збільшення міцності при розтягу, жорсткості і опору динамічним впливам. До високомодульних відносяться волокна: сталеві, базальтові, скляні, вуглецеві. До низькомодульних волокон відносяться органічні фіброволокна, представлені поліетиленовими, поліпропіленовими, поліефірними [132].

Серед різних типів волокон сталеве волокно використовується для більшості будівельних конструкцій [141, 149]. Застосування сталевих волокон у високоміцних бетонах може зменшити крихкість бетону і змінити механізм руйнування бетонної конструкції [129, 162]. Широке використання сталевих волокон зумовлене економічною ефективністю, виробничими потужностями, армувальним ефектом [102, 129]. Металеві волокна характеризуються міцністю на розтяг в діапазоні 200–2600 МПа. Проте експериментальні результати показують, що використання волокон суттєво не

впливає на модуль пружності бетону, особливо при низькому вмісті волокна [99].

Хіе Т. та ін. [162] досліджено динамічну поведінку ультрависокофункціонального бетону, армованого гібридним сталевим волокном - довгим (1,5%) і коротким (0,5%) при цьому такий бетон характеризується найвищими динамічними механічними властивостями. Луо У. та ін. [129] дослідили поведінку бетону, армованого спіральними сталевими волокнами, під дією динамічних навантажень і виявили, що здатність поглинати енергію динамічних впливів збільшувалася із збільшенням дозування сталевих волокон.

Дворкінім Л.Й. та ін. [13] розроблено сталефібробетони міцністю на стиск 80–100 МПа, з підвищеною тріщиностійкістю конструкцій в 1,5 рази. Слід відзначити, що проблемою при застосуванні сталевих фібри для приготування бетонної суміші є здатність до утворення "їжаків", що спричиняє нерівномірне розподілення фібри. Цей факт вимагає рівномірної подачі фібри до складу бетонної суміші, а також її приготування у змішувачах примусової дії з підвищеним енергоспоживанням, що призводить до здорожчання бетону. Крім того, виникає необхідність захисту металевих арматур від корозії, а застосування у промислових підлогах може зумовити пошкодження автомобільних шин.

У зв'язку з цим, важливо використовувати інші типи волокон, зокрема синтетичну фібру, щоб підвищити стійкість до динамічних впливів бетонів, а також стійкість до корозії, забезпечуючи довговічність конструкцій. Введення волокнистих компонентів чинить також модифікуючий вплив, покращуючи структуру і, як наслідок, механічні характеристики матричної системи композиту [101]. Застосування синтетичних волокон сприяє інтенсифікації процесу набору міцності на ранніх термінах тверднення [51]. Даний факт обумовлений впливом фібри на структуроутворення суміші, підвищенням внутрішнього тертя і обмеженим переміщенням складових матриці при наявності волокон. Армувальні волокна на ранній стадії тверднення є

каркасом, що підвищує стійкість і пластичну міцність матеріалу, нейтралізуючи деструктивні процеси при наборі міцності [108].

Плугінім А.А., Костюк Т.О. та ін. [64, 121] встановлено, що скловолокно характеризується негативним поверхневим зарядом і є підложкою для кристалізації продуктів гідратації з позитивним поверхневим зарядом – портландиту, гідроалюмінатів, еtringіту, що забезпечує корозійну стійкість фібри в лужному середовищі, сприяє зростанню електрогетерогенних контактів, ущільненню цементного каменю на субмікрорівні і як наслідок підвищення міцності на стиск, згин, водонепроникності, морозостійкості композитів.

Конструкційний базальтофібробетон характеризується міцністю на розтяг при згині 20–100 МПа; ударною міцністю 1,0–2,5 МПа, модулем пружності 21–60 ГПа [9, 96, 160]. Разом з тим, суттєвим недоліком базальтового волокна є підвищена собівартість, спричинена використанням дорогих сировинних матеріалів при його виробництві. Базальтове волокно руйнується у лужному середовищі цементного каменю, тому для дисперсного армування необхідно використовувати заходи для захисту від корозійного руйнування, що призводить до збільшення собівартості композиту.

В останні десятиліття волокно з поліпропілену все частіше застосовується в бетоні завдяки його перевагам, зокрема низькій густині та високій корозійній стійкості [157, 158]. Введення поліпропіленового волокна ефективно зменшує усадку та покращує ударну стійкість матриці [158, 159]. Zhang Н. [159] встановлено, що динамічну поведінку розчину, армованого поліпропіленовим волокном, визначає швидкість деформації та показано зростання ударної в'язкості дисперсно-армованої матриці.

Використання волокон у високоміцному бетоні сприяє збільшенню міцності на згин, зумовлене забезпеченням фіброю несучої здатності за рахунок міжфазного зв'язку з матрицею після її руйнування [98]. Тому волокна протистоять поширенню тріщин і зменшують можливість раптового руйнування, та підвищують несучу здатність бетону [119].

Дерев'яно В.М. [27] показав, що фібра знижує крихкість, характерну для цементного каменю, за рахунок сприйняття розтягуючих зусиль, а також перешкоджає зміщенню блоків матриці при навантаженні.

Zhang W. та ін. [163] провели випробування, які показали, що використання поліпропіленових волокон у бетоні підвищує його стійкість до ударів, хоча спостерігалася крихка картина руйнування. Fu та ін. [110] виявили, що введення поліпропіленових волокон покращило здатність енергопоглинання бетонної матриці. Однак слід враховувати оптимальний вміст поліпропіленового волокна в бетонній матриці при динамічному навантаженні з високою швидкістю деформації.

Солодким С.Й. та ін. встановлено [34], що основний армувальний ефект введення поліпропіленової фібри виявився в закритичній стадії руйнування, що зумовлено стримуванням фіброю процесу руйнування від моменту розвитку магістральної тріщини і до повної його дефрагментації. Авторами [161] також показано ефективність гібридного армування поліпропіленовою фіброю різної довжини для підвищення тріщиностійкості високоміцного бетону.

Застосування поліпропіленової фібри запобігає утворенню деформаційних тріщин, які виникають внаслідок механічного впливу або усадки [117, 138]. Використання поліпропіленового волокна дозволяє підвищити вогнестійкість конструкцій, за рахунок зниження ймовірності вибухового відколювання при дії вогню [119]. Недоліком поліпропілену є недостатньо висока адгезія до цементної матриці [127].

Автори [132] вказували, що введення $0,6 \text{ кг/м}^3$ поліпропіленового волокна в бетон призвело до збільшення до 9,7% міцності на розтяг порівняно з контрольним бетоном. Chen M. та ін. [111] досліджено вплив вмісту поліпропіленового волокна на стійкість до динамічних навантажень. Показано, що на здатність поглинати енергію та деформації при піковому напруженні суттєво впливає швидкість навантаження. При невисокій швидкості деформації поліпропіленові волокна ефективно контролювали

тріщиноутворення, проте у випадку відносно високої швидкості деформації (близько 120 c^{-1}) волокна не були ефективними. Введення поліпропіленового волокна забезпечило підвищення динамічних властивостей бетонів (міцності на стиск на 5,6%, поглинання енергії руйнування на 40,3%), проте призвело до значного зниження технологічності бетонної суміші та незначного зниження статичної міцності на стиск.

Враховуючи отримання необхідної міцності на стиск та динамічних характеристик бетону, практичний інтерес представляє комплексне модифікування цементної матриці бетону органо-мінеральними комплексами та армування структури бетону дисперсними волокнами [12, 46, 141]. Клуєв S.V. та ін. [155] для збільшення міцності і деформативних характеристик розробено склади дрібнозернистого фібробетону на основі техногенної сировини (відсів кварцового піску) і композиційних в'язучих із застосуванням нанодисперсного порошку. Встановлено, що застосування композиційних в'язучих і високощільної упаковки зерен заповнювача значно підвищують показники міцності. Оптимальний підбір заповнювача та дисперсне армування сталевую хвильовою фіброю дозволило отримати на техногенних пісках дрібнозернистий фібробетон з міцністю при стиску - 160,2 МПа, при згині 31,2 МПа.

Мірошниченком К.К. [59] показано, що ударна міцність бетону зростає із збільшенням ступеня армування фіброю, а також зроблено висновок, що суттєвий вплив на ударну міцність має пористість цементної матриці. З метою зниження пористості контактної зони матриця-дисперсне волокно запропоновано використання напружувального цементу. Разом з тим, використання спеціального напружувального цементу викликає збільшення собівартості бетону.

Авторами [113] розроблено в'язучу систему «портландцемент – кремнезем (аморфної та кристалічної форми) - вапняк - суперпластифікатор», використання якої у поєднанні з фіброю дало змогу підвищити коефіцієнт

ударної в'язкості фібробетонів у 5,5-6,0 разів за рахунок оптимізації матриці цементного каменю і поглинання енергії удару волокнами.

Саницьким М.А. та ін. [12, 84] показана ефективність застосування дисперсного армування базальтовим волокном у поєднанні з використанням мінеральної алюмосилікатної добавки метаколіну для підвищення ударної в'язкості, що у цьому випадку досягається за рахунок явища самоармування на мікроструктурному рівні з утворенням волокнистих продуктів гідратації та армування на макро- та мезорівні фіброю.

Мішутіним А.В. [60] розроблено фібробетони класу за міцністю В60 (С50/60) і вище з високорухомих сумішей ($OK \geq 16$ см) для тонкостінних конструкцій плавучих і гідротехнічних споруд, які працюють в складних умовах експлуатації, зазнаючи динамічного впливу. Показано, що поліпропіленова фібра компенсує поздовжні зусилля при навантаженні, що підвищує стійкість бетону до розвитку дефектів структури та виявлений загасаючий характер розкриття тріщин. Введення корозійностійкої поліпропіленової фібри і комплексної добавки на основі Пенетрону та суперпластифікатора С-3 забезпечило формування адаптаційної здатності структури бетону, що дозволило підвищити його тріщиностійкість на 40%, ударостійкість у 3 рази, морозостійкість на 150-200 циклів та водонепроникність у 1,5-2,0 рази. Разом з тим, витрата цементу при виготовленні таких високоміцних бетонів становила 600-800 кг/м³.

Спеціальний тип високофункціональних фіброармованих цементних композитів (High-performance fiber reinforced cement composites – HPFRCC), який називають інженерними цементуючими композитами (Engineered Cementitious Composites ECC), розроблений К. Лі [127]. На відміну від звичайного бетону та дисперсно-армованого бетону, ECC характеризуються множинним утворенням тріщин при навантаженні з стабілізованою шириною не більше 60 мкм і деформаційним зміцненням при розтягу. ECC демонструють певну несучу здатність, що перевищує пікове навантаження, і характеризуються меншою крихкістю та вищою енергією руйнування, ніж

звичайний бетон, що важливо при динамічних навантаженнях. При багаторазовому тріщиноутворенні композитне навантаження може навіть зростати і перевищувати міцність утворення першої тріщини [93, 112]. Цей композит вважається псевдо-загартованим. Унікальна поведінка ЕСС, що характеризує розтяг та високу пластичність, є результатом складного дизайну з використанням моделі мікромеханіки з урахуванням взаємодій між поверхнею волокон, матриці та волоконно-матричних матеріалів [101, 148].

Деформаційне зміцнення ЕСС повинно забезпечуватись при мінімізації вмісту волокна, оскільки використання фібри вище критичного значення призводить до підвищення вартості та створює труднощі при обробці матеріалів. Рівномірний розподіл волокон необхідний для забезпечення ізотропних властивостей, тому їх вміст обмежують до 2 об.% [108]. Вміст піску повинен бути ретельно підібраний для проектування деформаційно-зміцненого композиту. Показано, що в'язкість руйнування зросла на 39% при збільшенні відношення пісок:цемент з 1,0 до 2,0, а міцність на розрив збільшилася на 33% [101]. Модель мікромеханіки передбачає використання золи-винесення для зменшення витрати в'язучого [108, 112]. Разом з тим, введення золи-винесення внаслідок низької реакційної здатності призводить до зниження міцності як в ранні, так і пізні терміни тверднення, що зумовлює застосування ультрадисперсних активних мінеральних добавок з підвищеною пуцолановою активністю, зокрема мікрокремнезему, метакаоліну.

Підсумовуючи вище наведене, можна стверджувати, що актуальними із теоретичної і практичної точок зору є дослідження, спрямовані на розроблення високоміцних бетонів, армованих дисперсними волокнами, шляхом направленою формування структури зі збільшенням кількості гідросилікатних фаз при введенні ультра- та нанодисперсних мінеральних компонентів, високоефективних полікарбосилатних суперпластифікаторів, а також дисперсних волокон. Використання фібробетону дає змогу забезпечити економію арматурної сталі і трудовитрат на арматурні роботи, підвищити при цьому зносостійкість і міцність бетонної підлоги.

1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза

Вирішення пріоритетних завдань забезпечення необхідних показників промислових підлог з врахуванням екстремального характеру виробничих впливів та підвищення їх довговічності, що має важливе значення для надійної та ефективної експлуатації приміщень протягом всього життєвого циклу, спрямовано на розроблення високоміцних бетонів з покращеними технологічними та експлуатаційними властивостями, зокрема підвищеною стійкістю до ударних навантажень. У роботах вітчизняних та закордонних вчених Ю.М. Баженова, І.В. Барабаша, З.Я. Бліхарського, В.М. Вирового, І.П. Гамеляка, В.І. Гоца, Л.Й. Дворкіна, В.М. Дерев'янка, П.В. Кривенка, А.В. Мішутіна, А.М. Пługіна, А.А. Пługіна, К.К. Пушкарьової, Р.Ф. Рунової, М.А. Саницького, Х.С. Соболев, С.Й. Солодкого, В.П. Сопова, О.В. Ушерова-Маршака, С.М. Толмачева, Л.О. Шейніча, Р.С. Aitcin S. Fitts, Z. Giergiczny, W. Kurdowski, Р.К. Mehta, А. Neville та ін. розглянуто принципи підвищення експлуатаційної надійності та довговічності бетонів у різних умовах зовнішніх впливів.

Узагальнення результатів досліджень в області технології високоміцних бетонів свідчать, що забезпечення підвищених показників міцності, довговічності та ударної в'язкості вимагає комплексного підходу до створення малодфектної, упорядкованої мікро- та мезоструктури бетону, шляхом модифікування органо-мінеральними комплексами на основі полідисперсних пуцоланових компонентів та високоредуруючих суперпластифікаторів полікарбонатного типу, а також шляхом тривимірного зміцнення цементної матриці дисперсним армуванням.

На підставі детального і всебічного аналізу наукових літературних джерел і патентних матеріалів вітчизняних та зарубіжних вчених, присвячених розробленню модифікованих високоміцних бетонів, а також закономірностей розвитку тріщин у бетонах (Ю. М. Баженов, В.Г. Батраков, І.В. Барабаш, В.М.

Вировой, В.І. Гоц, Л. Й. Дворкін, В.М. Дерев'янку, В.С. Дорофєєв, В.І. Калашніков, П.В. Кривенко, С.М. Леонович, Я. Малолепши, А.В. Мішутін, М.І. Нетеса, А.А. Плугін, К.К. Пушкарьова, Р.Ф. Рунова, М. А. Саницький, Х.С. Соболю, С.Й. Солодкий, В.І. Соломатов, К. Соболев, С.М. Толмачов, О.В. Ушеров-Маршак, Л. Чарнецки, М.В. Шпирько, Л.О. Шейніч, Й. Штарк та ін.), можна зробити висновок щодо можливості створення високоміцних бетонів з покращеними експлуатаційними показниками, зокрема ударною в'язкістю, за рахунок направлено керування формуванням оптимізованої мікроструктури каменю при введенні добавок різного функціонального призначення в поєднанні з дисперсним армуванням, що створює умови гальмування утворення тріщин, зростання енергії тріщиноутворення, передавання та розподілення деформацій по об'єму матеріалу, що виникають при зовнішніх механічних впливах.

Аналіз даних у області технології високоміцних бетонів, а також відомих закономірностей формування структури композитів із заданими властивостями дозволяє висунути наукову гіпотезу про доцільність розроблення високоміцних бетонів з підвищеною ударною в'язкістю за рахунок модифікування органо-мінеральними добавками з оптимізованим заповненням системи та армування низькомодульними дисперсними волокнами із забезпеченням направлено структуроутворення цементної матриці з формуванням однорідної дрібнокристалічної малодефектної структури бетону, тривимірного зміцнення поліпропіленовою фіброю, що зумовлює зміну умов і енергетики тріщиноутворення.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика вихідних матеріалів

Високі показники міцності, а також основні будівельно-технічні та експлуатаційні властивості високоміцних бетонів визначаються формуванням малодефектної структури цементної матриці та перехідної зони «заповнювач-цементна матриця», що досягається використанням якісних матеріалів та модифікуванням добавками різного функціонального призначення. Як в'язуче для розроблення високоміцних композитів застосовано портландцемент загальнобудівельного призначення ПЦ І-500Р-Н ДСТУ Б В 2.7-46 (портландцемент ДСТУ EN 197-1 СЕМ І 42.5R) виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент». Хімічний склад портландцементного клінкеру наведено в таблиці 2.1, а мінералогічний – в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад портландцементного клінкеру ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

Вміст оксидів, мас.%						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
21,44	5,22	4,84	66,18	0,95	0,72	0,65

Таблиця 2.2 – Характеристика мінералогічного складу портландцементного клінкеру

Мінерал	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Вміст, мас. %	64,20	12,88	5,65	14,62

Як свідчать результати випробувань (таблиця 2.3), використовуваний портландцемент ПЦ І-500Р-Н задовольняє вимоги діючих стандартів щодо термінів тужавіння, тонини розмелювання, ранньої та стандартної міцностей для марки 500 [38]. Питома міцність використаного портландцементу через 2 доби тверднення в нормальних умовах становить 0,6.

Таблиця 2.3 – Фізико-механічні властивості портландцементу ПЦ І-500Н

$S_{\text{пит.}}$, м ² /кг	A_{008} , %	НГТ, %	Терміни тужавіння, хв		Границя міцності при стиску, МПа, у віці, діб		
			початок	кінець	2	7	28
352	0,5	31,5	150	230	31,9	45,8	53,1

За даними лазерної гранулометрії визначено гранулометричний склад портландцементу ПЦ І-500-Н (рисунок 2.1). Об'ємному вмісту 10, 50 та 90% відповідають діаметри частинок 2,8; 14,8 та 43,0 мкм відповідно. Об'ємний середній діаметр частинок $D[4;3]$ відповідає 19,3 мкм, а максимум середнього діаметра $D[3;2]$ за розподіленням питомої поверхні становить 4,65 мкм.

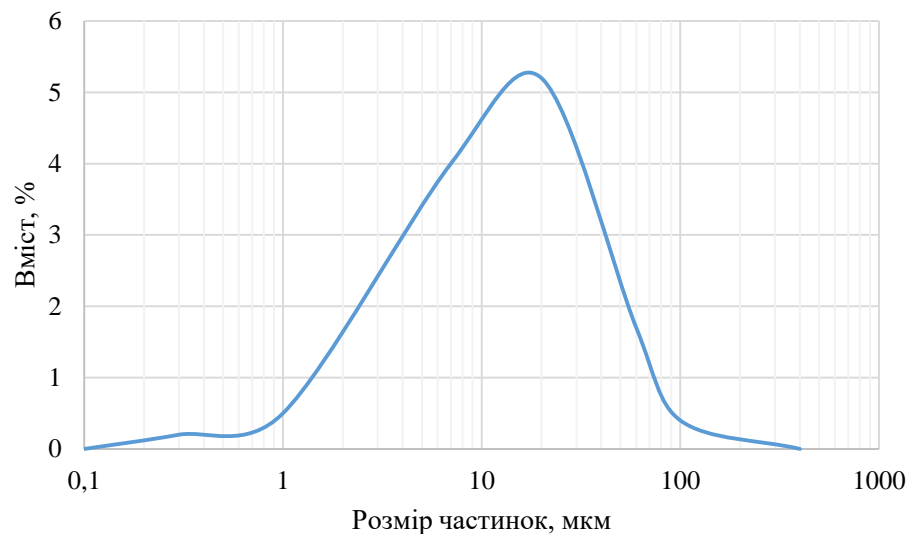


Рисунок 2.1 – Гранулометричний склад цементу ПЦ І-500Р-Н

З метою покращення мікроструктури високоміцного бетону використовували активні мінеральні добавки пуцоланічної дії мікрокремнезем, метакаолін, зола-винесення та аеросил. Хімічний склад мінеральних добавок наведений в таблиці 2.4. За хімічним складом активні мінеральні добавки задовольняють вимоги ДСТУ Б В.2.7-128-2006.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад мінеральних добавок

Мінеральна добавка	Вміст оксидів, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
Зола-винесення	52,12	24,05	13,74	3,65	2,38	0,95	3,11
Метакаолін	54,34	44,33	0,83	0,47	0,30	-	-
Мікрокремнезем	94,53	0,41	2,19	0,80	0,89	-	1,18
Аеросил А-380	99,8	-	0,2	-	-	-	-

Зола-винесення – пилоподібний залишок, який утворюється із мінеральних частин палива при повному його згорянні. У дослідженнях використано золу-винесення Бурштинської ТЕС. Результати гранулометричного розподілу (рисунок 2.2, а) свідчать, що розмір частинок золи-винесення коливається в межах 0,2 – 700 мкм. Питома поверхня – 360 м²/кг. Ефективні діаметри D₁₀; D₅₀; D₉₀ становлять 3,16 мкм; 16,0 мкм; 98,1 мкм відповідно. . Об'ємний середній діаметр частинок D[4;3] відповідає 42,0 мкм, а максимум середнього діаметра D[3;2] за розподіленням питомої поверхні становить 6,13 мкм.

Високоактивний метакаолін – матеріал, що утворюється в результаті термічної обробки каолінових глин, що містить аморфний силікат алюмінію. Високоактивний метакаолін має найвищий вміст оксидів кремнію і алюмінію серед інших пуцоланових добавок. За результатами гранулометричного аналізу (рисунок 2.2, б) питома поверхня метакаоліну становить 1390 м²/кг. Ефективні діаметри частинок D₁₀; D₅₀; D₉₀ становлять 2,96 мкм; 18,19 мкм; 33,46 мкм відповідно. Середній розмір частинок становить 30,59 мкм.

Мікрокремнеземом називається ультрадисперсний матеріал, що складається з окремих частинок сферичної та еліпсоїдної форм, які отримуються в процесі газоочистки при виробництві кремнійвмісних сплавів. Основним компонентом матеріалу є діоксид кремнію SiO_2 аморфної модифікації. У дослідженнях використано мікрокремнезем фірми Elkem Microsilica Grade 940-U. За результатами гранулометричного аналізу (рисунок 2.2, в) ефективні діаметри частинок D_{10} ; D_{50} ; D_{90} становлять 0,07 мкм; 0,16 мкм; 0,41 мкм відповідно. Разом з тим, при зберіганні дрібнодисперсні частинки агрегуються в агрегати ефективними діаметрами D_{10} ; D_{50} і D_{90} відповідно 7,02; 104 та 396 мкм. Питома поверхня мікрокремнезему становить $19000 \text{ м}^2/\text{кг}$.

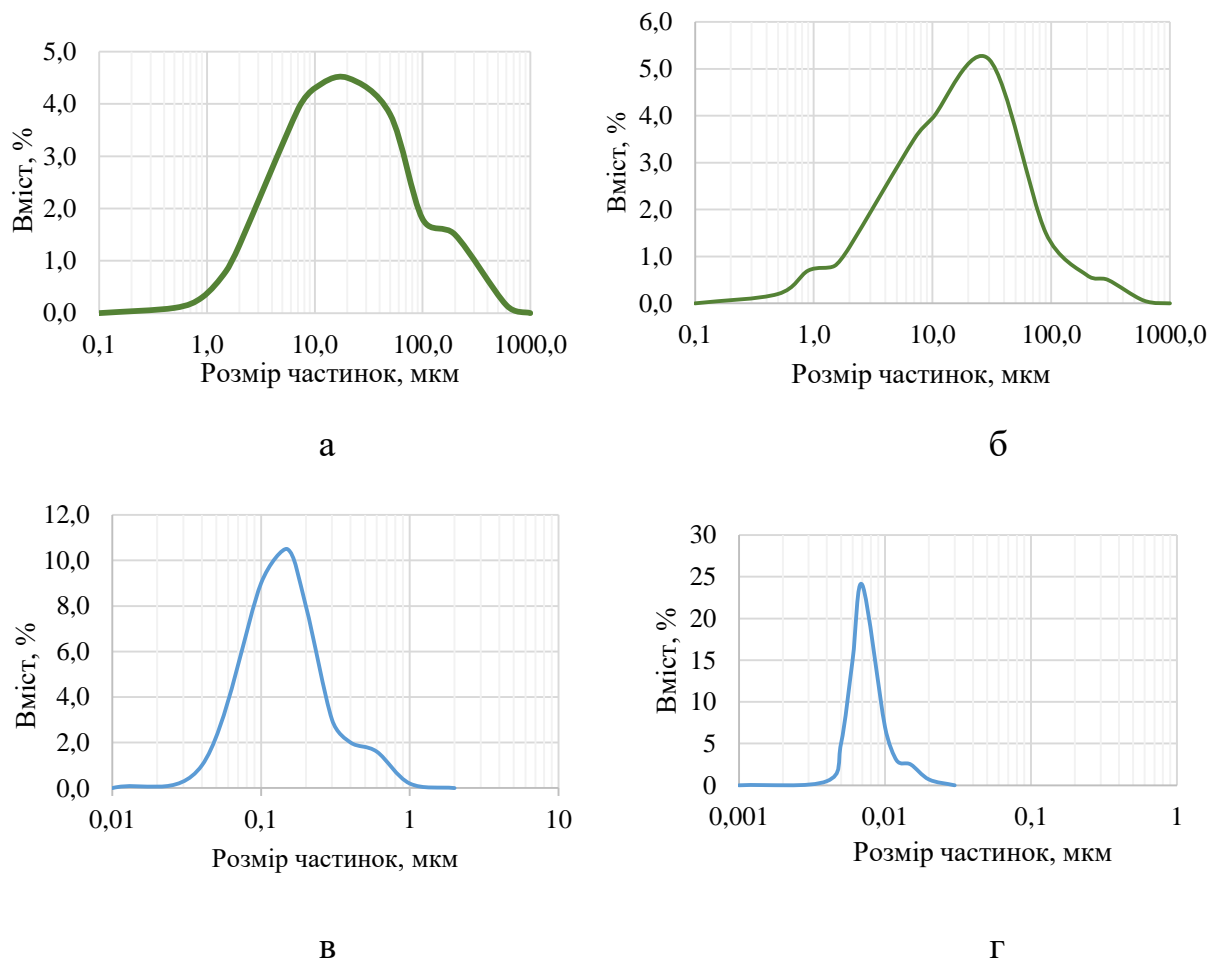


Рисунок 2.2 – Гранулометричний склад дисперсних добавок: а – зола-винесення; б – метакаолін; в – мікрокремнезем; г – аеросил

Пірогенний діоксид кремнію – дуже легкий ультрадисперсний порошок. Аеросил – це торгова назва першого розробника – німецької хімічної компанії «Evonik Degussa AG». Його отримують взаємодією газоподібного чотирихлористого кремнію з водяною парою. У роботі використано Aerosil-380 насипною густиною 50 кг/м^3 . Пітома поверхня $300 \pm 30 \text{ м}^2/\text{г}$. Розмір частинок згідно гранулометричного аналізу (рисунок 2.2, г) коливається від $0,003 \text{ мкм}$ до $0,02 \text{ мкм}$, а середній розмір – $0,007 \text{ мкм}$.

Для приготування високоміцних будівельних композитів як дрібний заповнювач використано піски Рогатинського родовища Івано-Франківської області та Жовківського, Велико-Глібовецького родовищ Львівської області, які використовують для одержання бетонів у Західному регіоні.

Аналіз кривих розсіювання пісків Велико-Глібовецького та Рогатинського родовищ визначаються підвищеним вмістом зерен $0,16 \text{ мм}$ (рисунок 2.3), тому їх відносять до дрібних пісків. Це створює необхідність коректування гранулометричного складу цих пісків для одержання високоміцних бетонів. Проте згідно з принципами мікромеханіки дрібні піски забезпечують зростання міцності на згин і використовують для проектування складів інженерних цементуючих композитів. Показники якості (таблиця 2.5) та крива розсіювання (рисунок 2.4, а) кварцового піску Жовківського родовища відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95 для важких бетонів.

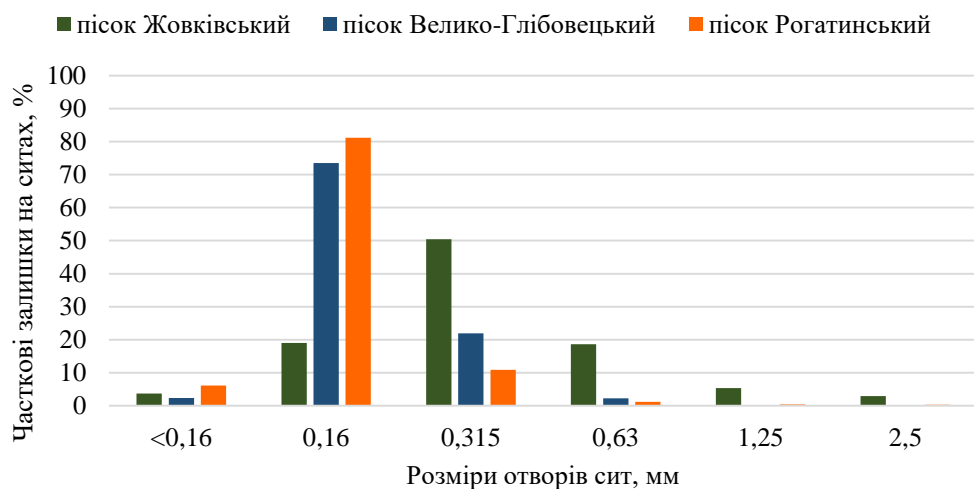


Рисунок 2.3 – Залишки на ситах використовуваних дрібних заповнювачів

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

Заповнювач	Модуль крупності, M_k	Істинна густина, $\rho_{іст.}$, $г/см^3$	Насипна густина, $\rho_{нас.}$, $кг/м^3$	Порожнистість, $V_{пр}$, %	Вміст глинистих і пиловидних частинок, %
Жовківський пісок	2,12	2,62	1480	43,5	0,5
Рогатинський пісок	1,29	2,62	1410	46,2	0,9
Велико-Глібовецький пісок	1,24	2,62	1390	46,9	0,8

Як крупний заповнювач використано гранітний щебінь Вирівського родовища фракції 5-20 мм. Його характеристика згідно з ДСТУ Б В.2.7-71-98 наведена в таблиці 2.6. На рисунку 2.4, б представлено криву розсіювання крупного заповнювача, який за зерновим складом відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 для виготовлення бетонів. Пустотність щебеню Вирівського родовища становить 44,5 %. За вмістом глинистих та пиловатих домішок, а також зерен пластинчатої (лещадної) та голчатої форми використаний заповнювач відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-74-98 для виготовлення важких бетонів.

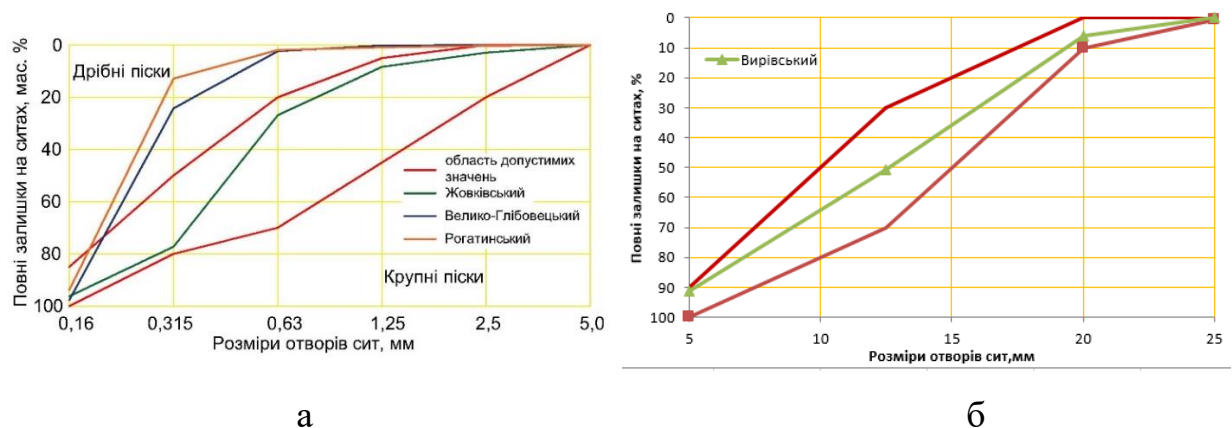


Рисунок 2.4 – Криві розсіювання дрібних (а) та крупного (б) заповнювачів

Таблиця 2.6 – Показники якості крупного заповнювача

Показник				Значення
Зерновий склад	Розмір отворів сит, мм	d	Часткові залишки	41,7
		0,5(d+D)		44,6
		D		6,0
		1,25D		–
Вміст пиловидних і глинистих частинок, %				0,9
Вміст зерен пластинчастої і голчастої форм, %				10,9
Насипна густина, кг/м ³				1455
Істинна густина, г/см ³				2,62
Вологість, W, %				0,9

Згідно з рекомендаціями ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1) проектування та виготовлення бетонів з бетонних сумішей консистенцією S4 та вище здійснюють із застосуванням суперпластифікуючих добавок. У зв'язку з цим, у роботі використано Master Glenium ACE 430 – суперпластифікатор на основі ефірів полікарбоксилатів, який забезпечує отримання високорухомих, в т.ч. самоущільнювальних бетонних сумішей. Для порівняльних досліджень використовували пластифікатор на основі лігносульфонатів - Centrament N3 (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 – Технічна характеристика хімічних добавок

Назва добавки	Основа	Колір	Густина, г/см ³	Рівень рН	Дозування, мас.%
Centrament N3	лігносульфонати	темно-коричневий	1,13–1,19	3,7–5,7	0,2–1,5
MasterGlenium ACE 430	полікарбоксилат	світло-коричневий	1,04–1,08	3,7–7,5	0,2–2,0

Для підвищення міцності на згин, стійкості до тріщиноутворення та ударної в'язкості як армувальні елементи на макромасштабному рівні використано модифіковану базальтову фібру РБР-18-т10 ТзОВ „Технобазальт-Інвест” (м. Київ) довжиною 12 мм, виготовлену з базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009 (рисунок 2.5, а) та поліпропіленову фібру довжиною волокон 12 мм (ВСМ-П-20/12) виробництва ТзОВ «MicroArm» (рисунок 2.5, б). Основні характеристики використаних армувальних волокон наведені в таблиці 2.8, з якої видно, що поліпропіленове волокно відноситься до низькомодульних, а базальтове – до високомодульних.



а



б

Рисунок 2.5 – Дисперсні волокна: а – базальтове; б – поліпропіленове

Таблиця 2.8 – Характеристика дисперсних волокон

Параметр	Волокно	
	Поліпропіленове	Базальтове
Довжина, мм	12	12
Діаметр, мкм	18–20	18–20
Густина, кг/м ³	910	2600
Границя міцності на розтяг, МПа	260–450	1600–3300
Температура плавлення, °С	160	1450
Модуль пружності, ГПа	3,5–5,5	75–95
Коефіцієнт лінійного видовження, %	150–250	150

2.2. Фізико-механічні випробування

Визначення фізичних та фізико-механічних властивостей портландцементу ПЦ І-500Р-Н проводили згідно з ДСТУ Б.В. 2.7-185:2009 ДСТУ Б.В. 2.7-187:2009, ДСТУ Б.В. 2.7-188:2009 та мали на меті встановлення відповідності нормальної густоти, термінів тужавлення, границі міцності при стиску, тонини помелу портландцементу вимогам ДСТУ Б.В. 2.7-46:2010 для розроблення високоміцних бетонів на його основі.

Вивчення впливу добавок-модифікаторів та дисперсної фібри на нормальну густоту, терміни тужавлення проводили згідно з ДСТУ Б.В. 2.7-185:2009, водоутримувальну здатність – ДСТУ Б.В. 2.7-186:2009, міцність при стиску та згині згідно з стандартними методиками на зразках цементного каменю 2x2x2 см, цементно-піщаного розчину та інженерних цементуючих композитів 2x2x8 см та 4x4x16 см.

Проектування складів модифікованих високоміцних дисперсно-армованих бетонів проводили методом абсолютних об'ємів з урахуванням рекомендацій від ДСТУ Б В.2.7-215:2009 та ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Введення хімічних активних мінеральних та інших добавок до складу цементної матриці та бетонної суміші на її основі, визначення їх ефективності та ефектів дії проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-69-98 та ДСТУ Б В.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001), ДБН В.2.7-64-97. Для оцінки впливу витрати портландцементу та поліпропіленової фібри на властивості бетонів проведено математичне планування експерименту. При цьому застосовували один з методів статистичної обробки результатів – метод ортогонального центрально-композиційного планування (ОЦКП) [8, 25].

Рухомість бетонної суміші високоміцного бетону визначали за ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Для визначення показників високоміцного бетону та фібробетону виготовляли зразки згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 у сталевих кубах–формах розміром 100x100x100 мм – для визначення міцності на стиск,

водопоглинання, пористості, водонепроникності; 100x100x400 см – для міцності на розтяг при згині, призмової міцності, модуля пружності; 70,7x70,7x70,7 мм – для стираності, атмосферостійкості, ударної в'язкості. Зразки тверднули в нормальних умовах (температура $20 \pm 3,0$ °C, відносна вологість 95+5%).

Міцність на стиск та розтяг при згині модифікованих високоміцних бетонів та фібробетонів визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Випробування дисперсно-армованих високоміцних бетонів на розтяг при згині проводили на зразках-призмах за схемою, наведеною на рисунку 2.6.

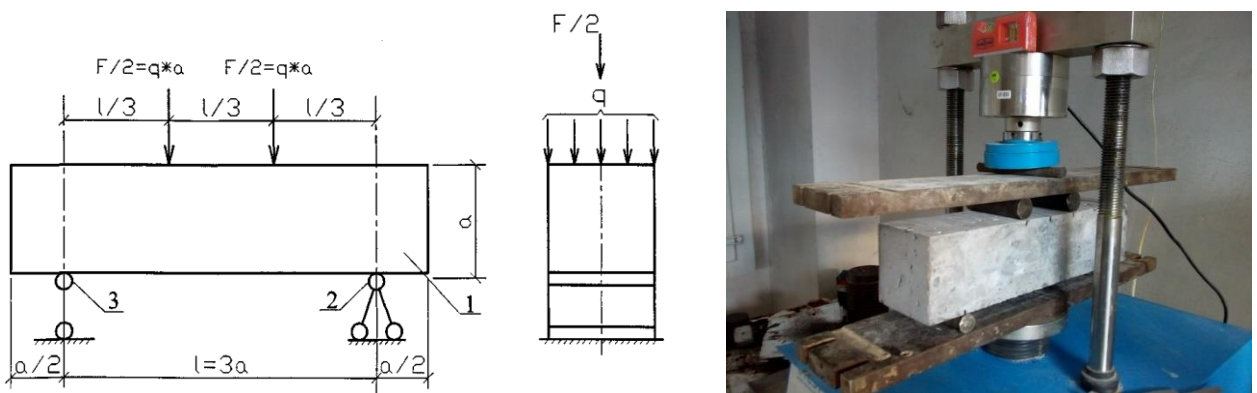


Рисунок 2.6 – Схема випробувань на розтяг при згинанні: 1 – призма–зразок; 2 – опора нерухома; 3 – опора рухома.

Середню густину, пористість, водопоглинання, водонепроникність розроблених високоміцних дисперсно-армованих бетонів визначали відповідно до ДСТУ Б В.2.7-170:2009. Характер пористої структури високоміцних фібробетонів досліджували за показником динаміки водопоглинання зразків-кубів через 2 та 28 діб тверднення в нормальних умовах, використавши дискретний метод зважування згідно із ДСТУ Б В.2.7-170:2008.

Для визначення ударної витривалості розроблених високоміцних бетонів для промислових підлог при дії навантаження зі звичайною швидкістю використано метод оцінки величини питомої ударної в'язкості, рекомендований АСІ Committee 544. Опір бетону ударному навантаженню

встановлювали як здатність витримувати повторювані удари, з врахуванням поглинутої енергії E_A , до моменту руйнування зразка. Випробування бетонів на низькошвидкісний удар (швидкість в момент удару 4,5 м/с) полягало у повторювальному вільному киданні вантажу маси 1-2 кг з постійної фіксованої висоти (1 м) до руйнування зразка. Питому ударну в'язкість визначали як відношення сумарної потенціальної енергії, затраченої на утворення першої тріщини та руйнування зразка, до його об'єму.

Стійкість до ударних впливів також визначали згідно із ДСТУ Б В.2.7-57-96 на дослідних зразках-плитах розміром 500×500×100 мм, які встановлювали на піщану основу. Перед випробуванням дослідну плиту умовно ділили на 4 частини (зони). У кожній зоні позначали 9 точок прикладення удару (рисунок 2.7). У кожену визначену точку зони наносили один удар. Випробування починали з гирі масою 0,5 кг. В наступні точки наносили удар гирею послідовно більшої маси: 1; 2; 3 кг і т. д. аж поки глибина вм'ятини, виміряної індикаторним глибиноміром, не перевищувала допустиму за вимогами до конкретних підлог.

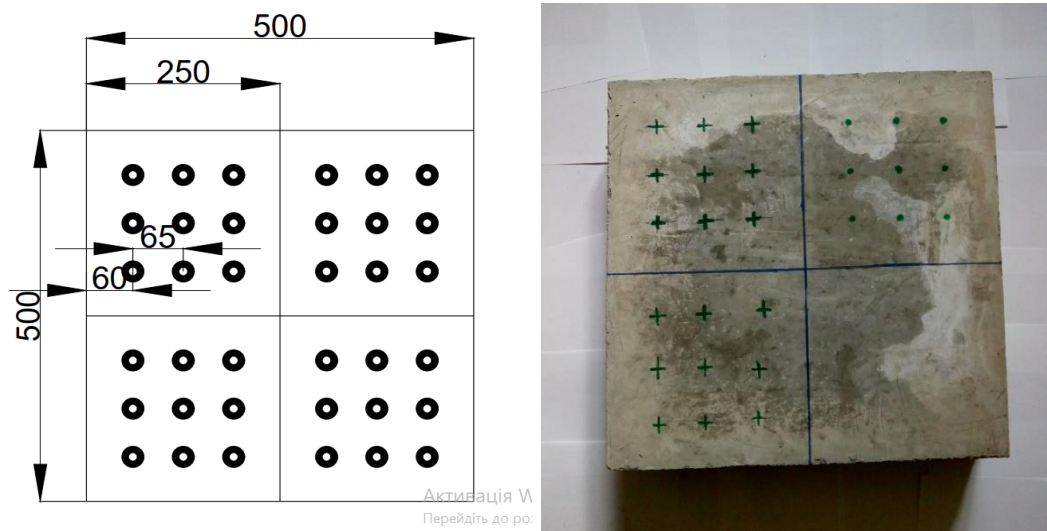


Рисунок 2.7 – Схема випробувань на стійкість до ударних впливів

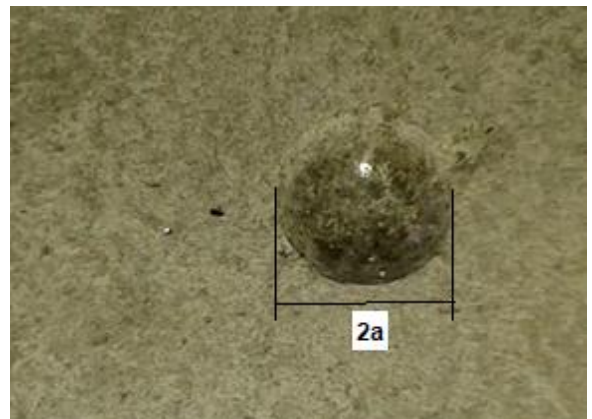
Призмову міцність, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона високоміцних фібробетонів визначали згідно із ДСТУ Б В.2.7-217:2009 на призмах-зразках розміром 100x100x400 мм. Деформації зсідання розроблених

фібробетонів визначали на зразках розміром 40x40x160 мм за допомогою компаратора з індикатором круглого годинникового типу, в торцях балок яких були закладені металеві анкери [21]. Границю тріщиностійкості визначили за критичними значеннями умовного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{sc}^* при максимальних критичних навантаженнях згідно з ДСТУ БВ 2.7-227:2009 на зразках 40x40x160 мм із первинним початковим надрізом при випробуванні на згин.

Визначення статичної твердості розроблених високоміцних бетонів проводили з допомогою випробувального пристрою Brinell (рисунок 2.8, а) з використанням індентора діаметром 10 мм при навантаженні 1000 кгс. Діаметри залишкових відбитків (рисунок 2.8, б) вимірювали мікроскопом ПМБ-2 зі збільшенням у 8 разів.



а



б

Рисунок 2.8 – Пристрій Brinell (а) та відбиток індентора на поверхні бетону (б)

Динамічну (ударну) твердість визначали з використанням склерометра ОМШ-1 за висотою пружного відскоку бойка з радіусом сфери індентора 25 мм від поверхні зразків розроблених бетонів. Енергія удару при цьому становила не менше 1,8 Дж, а зусилля стиску пружини при ударі не більше 70 Н. Визначення проводили перед випробуваннями зразків на міцність при

стиску в горизонтальному напрямку на двох паралельних вертикальних сторонах куба розміром 100 мм, затиснутого в гідравлічному пресі.

Визначення стираності, розроблених високоміцних фібробетонів для промислових підлог, проводили згідно за ДСТУ Б В.2.7-212:2009 на крузі стирання ЛКИ-3 (рисунок 2.9). Як абразивний матеріал використовували монодисперсний пісок з модулем крупності $M_k=2,30$.

Атмосферостійкість розроблених бетонів досліджували прискореним методом поперемінного зволоження–висушування стандартних зразків–кубів з ребром 70,7 мм та зразків балочок 40x40x160 мм [11].



Рисунок 2.9 – Визначення стиранності високоміцного фібробетону на крузі стирання ЛКИ-3

Зразки через 28 діб тверднення висушували при температурі 105–110 °С протягом 6 год і визначали міцність основних зразків. Контрольні зразки занурювали у воду температурою $20\pm 2^\circ\text{C}$ на 6 год, після чого висушували в сушильній шафі. Через кожні 50 циклів зволоження–висушування висушені зразки випробовували на міцність при стиску та згині, а також на ударну в'язкість.

2.3. Фізико-хімічні дослідження

Розподілення частинок за розмірами порошкоподібних дисперсних систем досліджували за допомогою лазерного аналізатора Malvern Mastersizer MASTERSIZER 3000 та Cilas 990 Liquid з діапазоном вимірювань 0,1 до 500 мкм. Для оброблення даних використовувався програмний комплекс Size Expert Software. Вимірювання полягало в проходженні проби порошкоподібного матеріалу перпендикулярно до лазерного пучка та визначення розподілу дисперсності за розмірами в дифракційному спектрі.

Хімічні склади портландцементного клінкеру та активних мінеральних добавок визначали рентгеноспектрометром ARL 9800 XP, в основі роботи якого лежить рентгено-флюоросцентний метод: на радієву рентгенівську трубку подається висока напруга, проходить вибивання електронного пучка, який попадає на пробу та вибиває електрони, які попадають на кристал. Від кристалу пучок заломлюється і поступає на детектор, який зчитує інтенсивність хвилі кожного елемента. Результати надходять до розрахункової програми в комп'ютер, котрий видає кількісний аналіз.

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

Дослідження особливостей мікроструктури каменю на основі ПЦ І-500Р-Н, модифікованого ПЦ І-500Р-Н, дисперсно-армованих інженерних цементуючих композитів в нормальних умовах тверднення проводили за допомогою растрових електронних мікроскопів РЕМ-106И і JEOL JSM-T220A. На поверхню свіжих сколів зразків для збільшення контрасту рельєфу

наносили тонку електропровідну плівку міді шляхом вакуумного термічного випаровування на вакуумному універсальному пості ВУП-5 [23].

Висновки до розділу

1. Як вихідні матеріали для розроблення високоміцних бетонів з підвищеною ударною в'язкістю використовували портландцемент загальнобудівельного призначення ПЦ І-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент», природні кварцові піски, крупний заповнювач (щебінь), мінеральні добавки різної дисперсності, полікарбоксилатний суперпластифікатор та поліпропіленова фібра для дисперсного армування. За результатами випробувань усі матеріали задовольняють вимоги нормативних документів для приготування важких бетонів.

2. Фізико-механічні, будівельно-технічні та експлуатаційні характеристики розроблених фібробетонів визначали згідно з діючими стандартами та загальноприйнятими методиками. Ударну в'язкість дисперсно-армованих композитів оцінювали за величиною питомої ударної в'язкості, рекомендованою АСІ Committee 544 та за глибиною вмятини згідно з ДСТУ Б В.2.7-57-96 як для промислових підлог. Оцінку впливу рецептурних факторів (витрата портландцементу та поліпропіленової фібри) на властивості бетонів проводили за допомогою методів експериментально-статистичного моделювання з використанням дисоціативно-крокового методу оптимізації.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МОДИФІКОВАНОЇ ЦЕМЕНТНОЇ МАТРИЦІ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ, АРМОВАНИХ ДИСПЕРНИМИ ВОЛОКНАМИ

3.1. Вплив пластифікаторів та мінеральних добавок на властивості портландцементу

Важливою характеристикою бетонної суміші для влаштування промислових підлог є підвищена рухомість, що забезпечить якісне вкладання суміші з мінімальними енергетичними затратами, а також здатність утримувати воду для попередження утворення усадочних тріщин за рахунок випаровування вологи. У зв'язку з цим, досліджено рухомість та водоутримуючу здатність цементного тіста з добавками різної природи.

Реологічні властивості цементуючих систем на основі ПЦ I-500 оцінювали за розпливом циліндра Суттарда (РЦ), при цьому водовміст систем становив 0,5 (рисунок 3.1). Мінеральні добавки (зола-винесення, мікрокремнезем, метакаолін) вводили у кількості 5 мас.% від маси цементу, дозування аеросилу складало 1 мас.%. Як видно з результатів випробувань, введення мінеральних добавок з питомою поверхнею вище 1000 м²/кг спричиняє зниження рухливості цементного тіста. Так, при використанні метакаоліну розплив цементного тіста зменшується з 170 мм до 145 мм, введення мікрокремнезему, що характеризується вищою питомою поверхнею, спричинило зменшення рухливості до 120 мм. Введення нанорозмірного аеросилу у кількості 1 мас.% зумовлює різке зниження розпливу до 100 мм.

Зниження рухомості портландцементних систем з мінеральними добавками вимагає використання добавок пластифікуючої групи. Так, введення полікарбоксилатного суперпластифікатора у кількості 1 мас.% у систему ПЦ I-500+метакаолін забезпечує збільшення розпливу тіста до

300 мм, у систему ПЦ І-500+мікрокремнезем – до 310 мм, у систему ПЦ І-500+аеросил – до 300 мм.

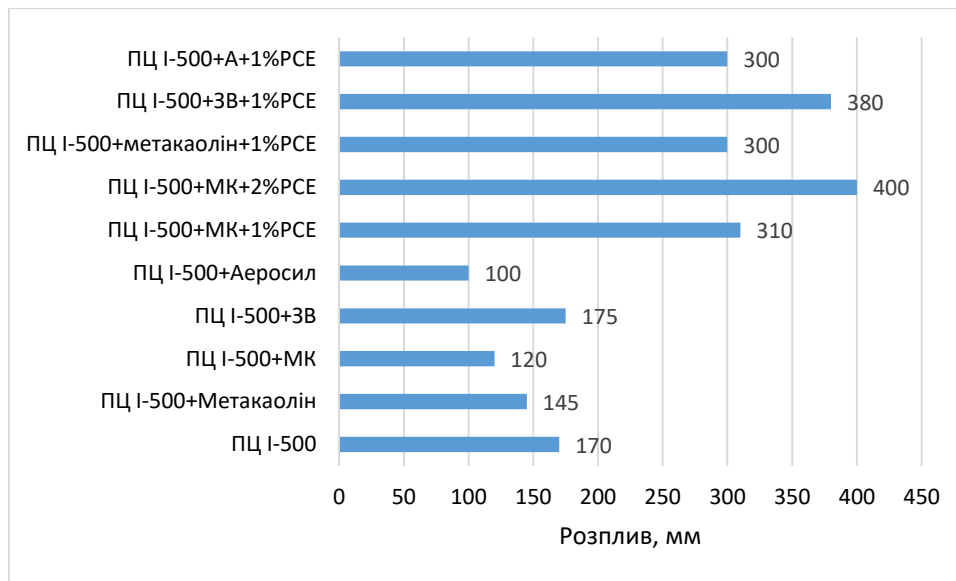


Рисунок 3.1 – Вплив добавок на рухливість портландцементу

Кінетика водовідділення суспензії добавок (В:Т=2:1) вказує на стабілізацію значень водовідділення для добавок золи-винесення та метакаоліну через 3 год. Наявність ультрадисперсних частинок у мікрокремнеземі та аеросилі зумовлює їх значну водопотребу та седиментаційну стійкість суспензій. Об'ємні коефіцієнти водовідділення для добавок золи-винесення, метакаоліну та мікрокремнезему через 3 год при досягненні стабілізації становлять відповідно 60,0; 30,8; 0,2 об.% (таблиця 3.1). Через 24 год седиментаційні процеси у дисперсних системах прискорюються і коефіцієнти водовідділення зростають до 67,2% та 39,5% для золи-винесення, і метакаоліну відповідно, у той час як суспензії мікрокремнезему та аеросилу залишилися стабільними з незначною зміною коефіцієнта водовідділення.

Модифікування ультрадисперсних систем мінеральних добавок суперпластифікатором полікарбоксилатного типу забезпечує їх стабілізацію, збереження стійкості протягом тривалого часу та зменшення водовідділення золи-винесення до $K_v = 18,6\%$ і метакаоліну до $K_v = 0,6\%$, що зумовлено

необоротною адсорбцією молекул добавки суперпластифікатора з довгими бічними ланцюгами на поверхні частинок завдяки адитивній дії електростатичного, структурно-механічного, адсорбційно-сольватного факторів стабілізації.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти водовідділення мінеральних добавок

Добавка	Коефіцієнт водовідділення, K_v , %, через год	
	3	24
Зола-винесення (ЗВ)	60,0	67,2
Метакаолін	30,8	39,5
Мікрокремнезем (МК)	0,2	0,5
Аеросил	0	0,2
Зола-винесення+PCE	18,6	51,2
Метакаолін+ PCE	0,6	35,6

Початкове водоцементне відношення визначає концентрацію частинок цементу в одиниці об'єму і відстань між ними до моменту формування структури – початку тужавіння. Результатами визначення нормальної густоти цементного тіста на основі ПЦ І-500 і модифікованих портландцементних композицій встановлено, що введення мікрокремнезему спричиняє незначне зниження водопотреби до 29,0%, що пов'язано з ущільненням упакування частинок. У той час як введення полікарбоксилатного пластифікатора забезпечує водоредукуючий ефект і зниження нормальної густоти до 23,5% (таблиця 3.2). Введення комплексної органо-мінеральної добавки виявляє синергетичний ефект і водопотреба системи знижується до 20,5%.

Використання у складі портландцементу ультрадисперсних мінеральних добавок спричиняє зменшення віддалі між частинками, що сприяє прискоренню гідратаційних процесів. Результати визначення термінів тужавіння показали, що для складу без добавок початок тужавіння становить 2 год 30 хв, кінець – 3 год 50 хв. При використанні комплексу добавок

мікрокремнезему та суперпластифікатора початок тужавіння прискорюється до 120 хв та скорочується кінець тужавіння (210 хв). Результати визначення термінів тужавіння модифікованих цементів вказують, що за даним показником вони відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Слід відзначити, що період між початком та кінцем тужавіння наномодифікованих композицій скорочується, що свідчить про прискорення процесів їх структуроутворення та синтезу ранньої міцності.

Таблиця 3.2 – Терміни тужавіння та відстань між частинками модифікованих портландцементів

Вид та вміст добавки, мас. %	НГТ, %	Відстань між частинками, мкм	Терміни тужавіння, год-хв	
			Початок	Кінець
б/д	30,5	1,94	2-30	3-50
1,0% PCE	23,5	1,5	3-50	6-20
5,0% МК	29,0	0,51	1-40	2-50
1,0% PCE+5,0% МК	20,5	0,31	2-00	3-30
1,0% PCE+5,0% МК+0,5%A	21,0	0,08	1-40	3-00

В повітряно-сухих умовах відбувається постійне зменшення маси зразків у зв'язку з їх висиханням. Це в подальшому може спричинити утворення тріщин та недобори міцності. Тому визначали зміну маси цих зразків (рисунок 3.2). Слід зауважити, що інтенсивна втрата води в камені в повітряно-сухих умовах відбувається протягом 7 діб. При цьому найбільша втрата вологовмісту спостерігається у зразках бездобавочного каменю і через 7 діб досягає 16,0%.

Зростання рухливості суперпластифікованих портландцементних систем пояснюється адсорбцією молекул суперпластифікатора на поверхні частинок в'язучого. При цьому зниження водовмісту портландцементу з добавкою полікарбоксилату (PK=280 мм) через 7 та 28 діб в повітряно-сухих

умовах становить 11,0 і 11,9%. Втрата вологовмісту каменю на основі портландцементу з добавкою МК+А+PCE через 4 доби становить 5,5%.

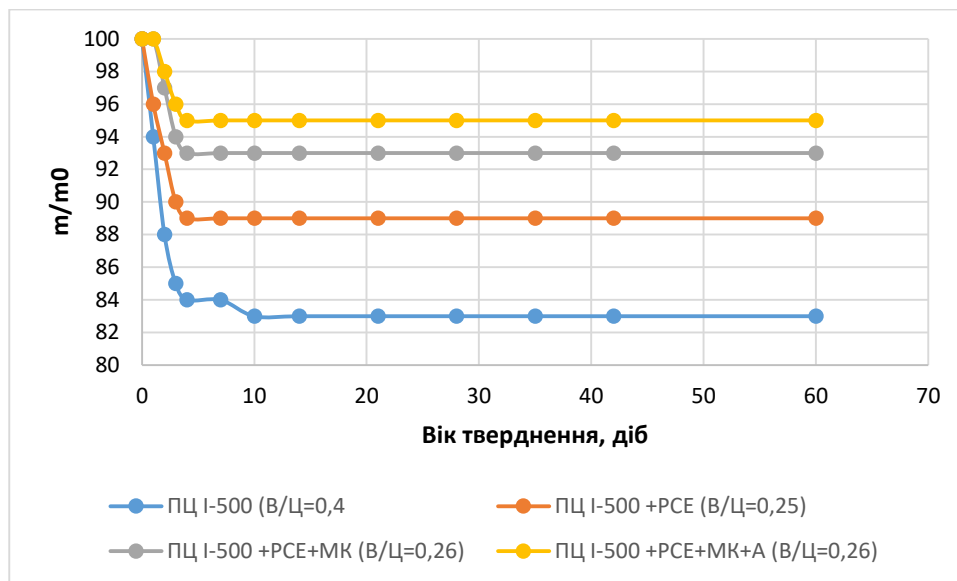


Рисунок 3.2 – Зміна маси каменю на основі портландцементу ПЦ І-500 з модифікаторами

Вплив мінеральних добавок пуцоланічної дії на міцнісні властивості портландцементу ПЦ І-500 досліджували, використовуючи методикау EN-450 визначення пуцоланової активності золи-винесення, що полягає у випробуванні зразків розміром 40x40x160 мм, виготовлених із цементно-піщаного розчину (співвідношення цемент : пісок = 1:3 при В/Ц=0,5) при заміні в складі в'язучої речовини 25% цементу добавкою. Для дослідження кінетики процесу тверднення в'язучих систем визначали міцність через 1, 3, 7, 28, 90 днів нормального тверднення. Показником пуцоланової реакційної здатності за цією методикою є коефіцієнт пуцоланічності $K_{пуц}$, який визначається як відношення міцності при стиску зразків, що містять добавку золи ($R_{зол}$) у кількості 25 мас.% до міцності бездобавочного аналога ($R_{без зол}$):

$$K_{пуц} = (R_{зол} / R_{без зол})$$

Відповідність золи як пуцоланової добавки визначали за величиною коефіцієнта пуцоланічності, який через 28 діб тверднення повинен бути не менше ніж 0,75, а через 90 діб - не менше ніж 0,85 активності зразків на основі портландцементу без добавок. У роботі досліджено вплив мінеральних добавок в діапазоні від 10 до 25% . Оскільки для тріщиностійкості важливою характеристикою є міцність при згині.

Відомо [147], що використання мінеральних добавок впливає не тільки на показники міцності цементних систем і бетонів, але й на реологічні характеристики розчинових і бетонних сумішей. У зв'язку з цим, у роботі досліджено рухомість цементно-піщаних розчинів за ДСТУ Б В 2.7-188. Введення золи-винесення сприяє зростанню рухливості дрібнозернистого бетону з 154 мм до 183 мм при 20% заміні портландцементу на золу, що зумовлено ефектом ролико-підшипника сферичних частинок добавки [77].

При дослідженні рухливості цементних систем з добавкою мікрокремнезему (таблиця 3.3) встановлено, що при відсутності добавки розплив конуса після 15 струшувань становить 120 мм, розплив конуса зменшується із збільшенням вмісту мікрокремнезему від 125 мм (при 10 мас.% добавки) до 107 мм (при 25 мас.% добавки мікрокремнезему). Після 30 струшувань розплив конуса при відсутності добавки становив 140 мм і зменшився від 140 мм (при 10 мас.% мікрокремнезему) до 112 мм (при 25 мас.% добавки).

При дослідженні рухливості дрібнозернистих бетонів з добавкою метакаоліну встановлено, що при відсутності добавки розплив конуса після 15 струшувань становить 120 мм, розплив конуса зменшується із збільшенням вмісту метакаоліну від 125 мм (при 10 мас.% добавки) до 106 мм (при 25 мас.% добавки метакаоліну). Після 30 струшувань розплив конуса при відсутності добавки становив 140 мм і зменшився від 135 мм (при 10 мас.% метакаоліну) до 111 мм (при 25 мас.% добавки).

Рухливість дрібнозернистих бетонів з добавкою аеросилу після 15 струшувань зменшується із збільшенням вмісту аеросилу від 120 мм (при відсутності добавки) до 107 мм (при 1,5 мас.% аеросилу). Після 30 струшувань розплив конуса зменшується від 140 мм (при відсутності добавки) до 112 мм (при 1,5 мас.% аеросилу).

Таблиця 3.3 – Розплив конуса (мм) портландцементних систем при $V/V=\text{const}=0,5$

		Заміна цементу, %			
		10	15	20	25
Пудцолан ова добавк	Зола-винесення	154	165	183	179
	Мікрокремнезем	132	118	115	109
	Метакаолін	135	120	117	111
	Аеросил	140	122	114	112
		Б/Д	0,5	1	1,5
		Заміна цементу на аеросил, %			

Результати міцності на стиск дрібнозернистих бетонів з мікрокремнеземом показали (рисунок 3.3), що міцність через три доби зменшується від 39,6 МПа (при відсутності мікрокремнезему) до 32,4 МПа (при 25 мас.% добавки). Через 7 діб міцність знижується від 50,8 МПа (без добавки) до 43,2 МПа (з 25 мас.% мікрокремнезему). Через 28 діб міцність становить 63,6 МПа (без добавки) і знижується від 74,4 МПа (з 10 мас.% мікрокремнезему) до 68,2 МПа (із 25 мас.% добавки).

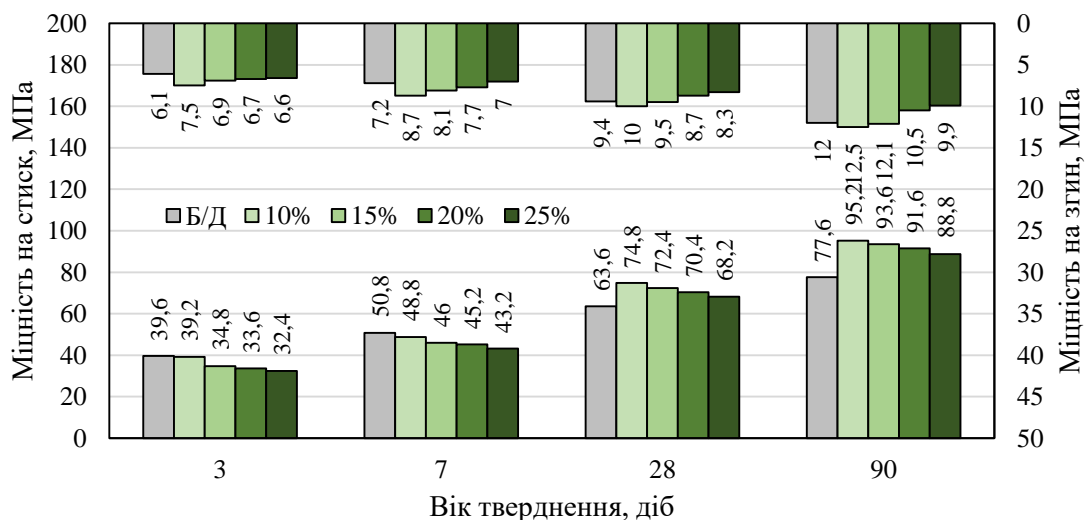


Рисунок 3.3 – Вплив мікрокремнезему на міцність портландцементу

Міцність на згин дрібнозернистого бетону через три доби при відсутності мікрокремнезему становить 6,1 МПа, при 10 мас.% добавки міцність зростає до 7,5 МПа, із збільшенням кількості добавки до 25 мас.% міцність на згин знижується до 6,6 МПа. Через 28 діб міцність при відсутності мікрокремнезему становить 12,0 МПа, при 10 мас.% міцність зростає до 12,5 МПа, із збільшенням кількості мікрокремнезему до 25 мас.% міцність знижується до 9,9 МПа.

Коефіцієнт пуцолановості для добавки мікрокремнезему із збільшенням кількості добавки до 25 мас.% знижується порівняно з вмістом мікрокремнезему 10 мас.%, при чому коефіцієнт пуцолановості через 3 доби зменшується на 18%; через 7 діб – на 15%; через 28 діб - до 1,08.

При дослідженні інженерних композитів з добавкою метакаоліну встановлено (рисунок 3.4), що міцність на згин через три доби при відсутності метакаоліну становить 6,1 МПа, при 10 мас.% метакаоліну міцність зростає до 6,9 МПа, із збільшенням кількості добавки до 25 мас.% міцність на згин знижується до 6,1 МПа. Через 28 діб міцність при відсутності метакаоліну становить 9,4 МПа, при 10 мас.% міцність знижується до 9,2 МПа, із збільшенням кількості метакаоліну до 25 мас.% міцність знижується до 8,3 МПа.

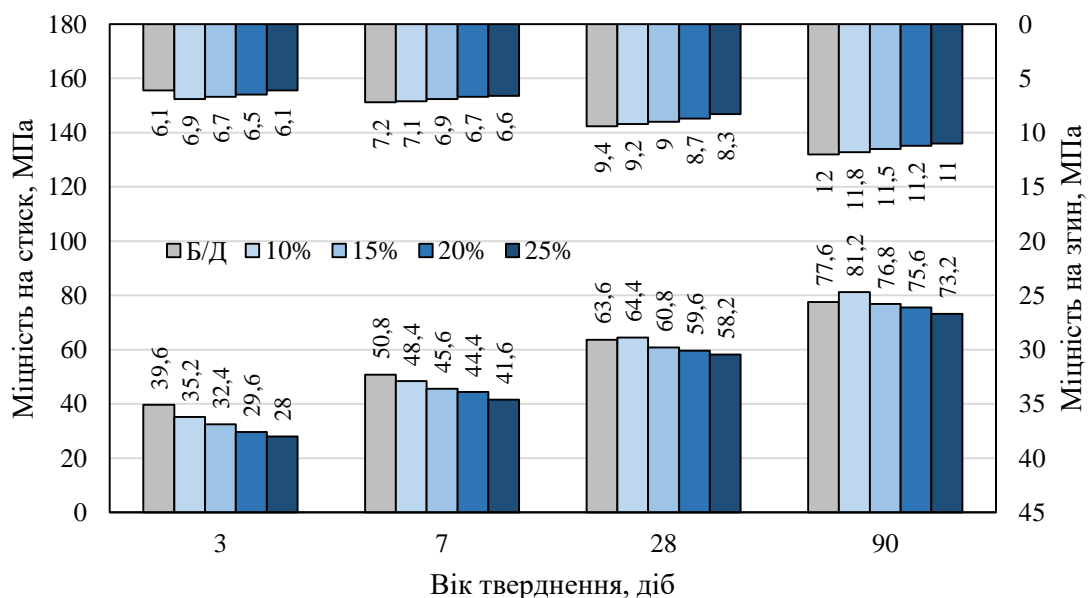


Рисунок 3.4 – Вплив метакаоліну на міцність портландцементу

При дослідженні міцності на стиск дрібнозернистих бетонів з метакаоліном показано, що міцність через три доби зменшується від 39,6 МПа (при відсутності метакаоліну) до 28,0 МПа (при 25 мас.% метакаоліну). Через 7 діб міцність знижується від 50,8 МПа (без добавки) до 41,6 МПа (з 25 мас.% метакаоліну). Через 28 діб міцність становить 63,6 МПа (без добавки) і знижується від 64,4 МПа (з 10 мас.% метакаоліну) до 58,2 МПа (із 25 мас.% добавки). Коефіцієнт пуцолановості для добавки метакаоліну із збільшенням кількості метакаоліну до 25 мас.% через 3 доби зменшується на 29%; через 7 діб – на 18%; через 28 діб з 1,16 – до 1,06.

При дослідженні інженерних композитів з добавкою золи-винесення встановлено (рисунок 3.5), що міцність на згин через три доби при відсутності золи-винесення становить 6,1 МПа, при 10 мас.% добавки міцність знижується до 5,5 МПа, із збільшенням кількості золи до 25 мас.% міцність на згин знижується до 4,4 МПа. Міцність на стиск дрібнозернистих бетонів із золою винесення через три доби зменшується від 39,6 МПа (при відсутності золи) до 25,6 МПа (при 25 мас.% добавки). Через 7 діб міцність знижується від 50,8 МПа (без добавки) до 36,4 МПа (з 25 мас.% золи).

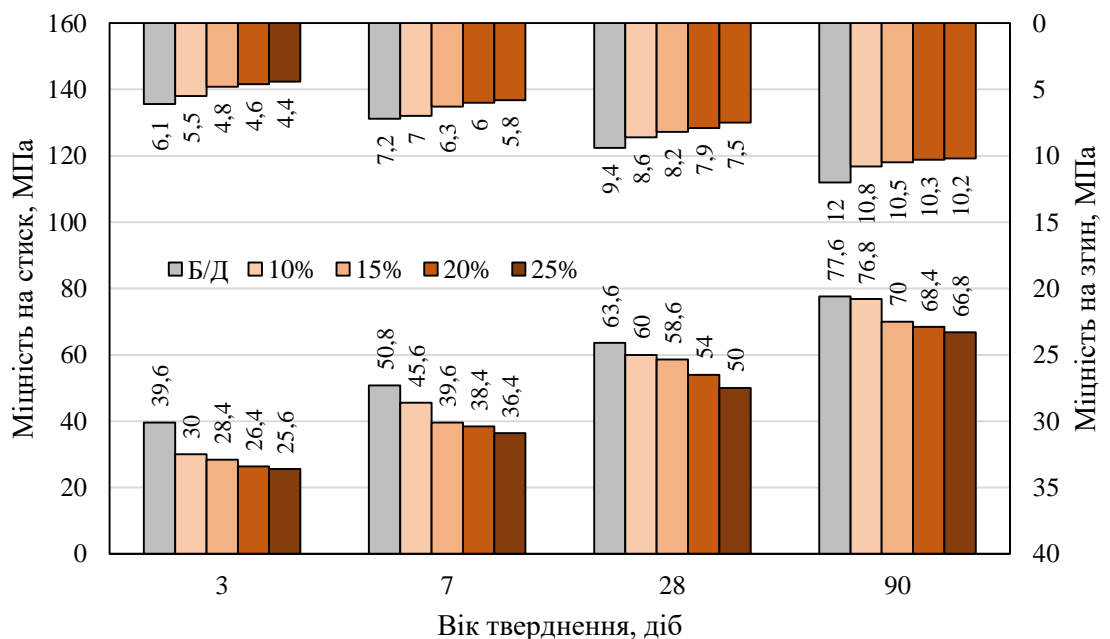


Рисунок 3.5 – Вплив золи-винесення на міцність портландцементу

Коефіцієнт пуцолановості для добавки золи-винесення із збільшенням кількості золи-винесення до 25 мас.% коефіцієнт пуцолановості через 3 доби зменшується з 0,76 до 0,65; через 7 діб зменшується на 28%.

При дослідженні портландцементу з добавкою аеросилу встановлено (рис. 3.4), що міцність на згин через 3 доби при відсутності аеросилу становить 6,1 МПа, при 0,5 мас.% добавки міцність зростає до 6,4 МПа, із збільшенням кількості аеросилу до 1,5 мас.% міцність на згин знижується до 5,7 МПа.

При дослідженні міцності на стиск портландценту із аеросилом (рис. 3.4) показано, що міцність через три доби зменшується від 39,6 МПа (при відсутності аеросилу) до 26,4 МПа (при 1,5 мас.% добавки). Через 7 діб міцність знижується від 50,8 МПа (без добавки) до 47,2 МПа (з 1,5 мас.% аеросилу). Коефіцієнт пуцолановості для добавки аеросилу в кількості 0,5 мас.% становить 0,85, а через 7 діб зростає до 0,93.

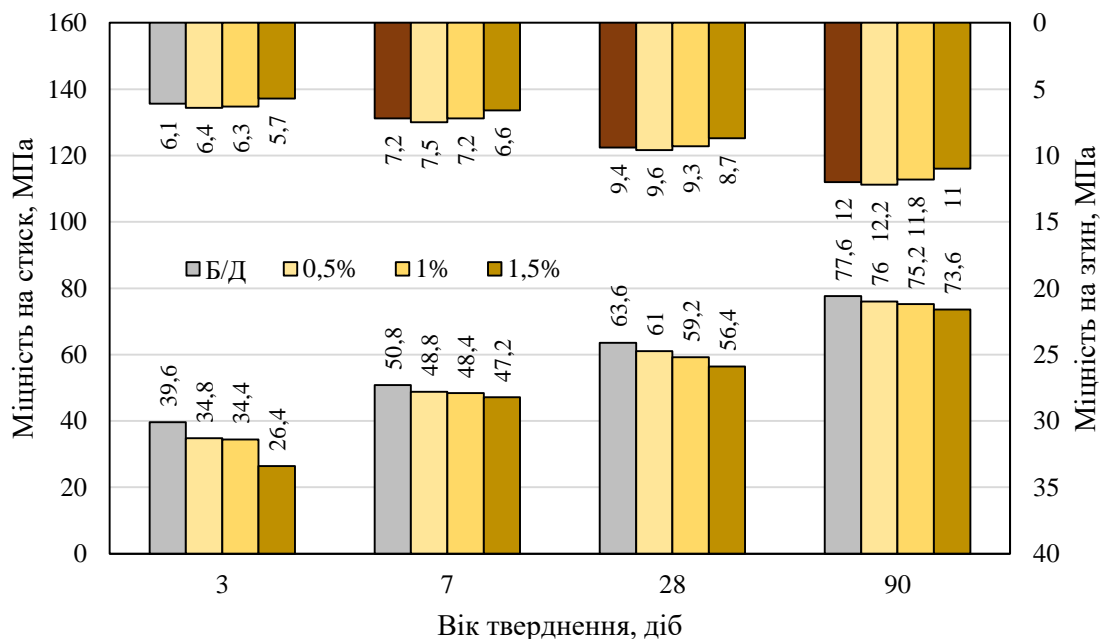


Рисунок 3.6 – Вплив аеросилу на міцність портландцементу

Отже, мінеральні добавки, що містять ультрадисперсні частинки характеризуються високою водоутримувальною здатністю, а також

інтенсивною взаємодією з продуктами гідратації портландцементу, призводячи до зростання міцності як у ранній, так і пізній період тверднення.

3.2. Вплив виду та кількості фібри на фізико-механічні властивості модифікованих цементів

Одним із ефективних способів підвищення показників міцності та покращення деформативних характеристик бетонів є дисперсне армування. Волокна за своєю природою здатні сприймати більші напруження, ніж матриця розчину, тим самим зміцнюючи матеріал. Властивості дисперсно-армованого бетону визначаються властивостями його компонентів, а сам матеріал є композиційним матеріалом з додатково розподіленою в об'ємі фібровою арматурою. Основною функцією волокон у бетоні є зменшення в ньому концентрації напружень, при цьому введення дисперсної арматури буде суттєво впливати на рухливість бетонних сумішей. Дослідження особливостей впливу фібри на властивості модифікованої матриці високоміцних бетонів проводили на дрібнозернистому бетоні Ц:П=1:1,5, що характеризує рівень мезоструктури. Кількість мінеральної добавки становила 5 мас.%, кількість полікарбоксилатного суперпластифікатора – 1,0 мас.%.

При дослідженні рухливості дрібнозернистих бетонів з добавкою мікрокремнезему (рисунок 3.7) встановлено, що із збільшенням вмісту фібри до 3 мас.% розплив конуса, що характеризує рухливість бетонної суміші, зменшується від 210 до 115 мм порівняно з вмістом фібри 0,5 мас.%, що обумовлено створенням початкової зв'язної структури, додатковою витратою води на змочування фібри при введенні дисперсних волокон. Рухливість модифікованого дрібнозернистого бетону з добавкою золи-винесення із збільшенням вмісту фібри до 3 мас.% зменшується від 200 до 170 мм. При збільшенні вмісту фібри до 2,5 мас.% розплив конуса модифікованого

дрібнозернистого бетону з добавкою метакаоліну зменшується від 200 до 120 мм.

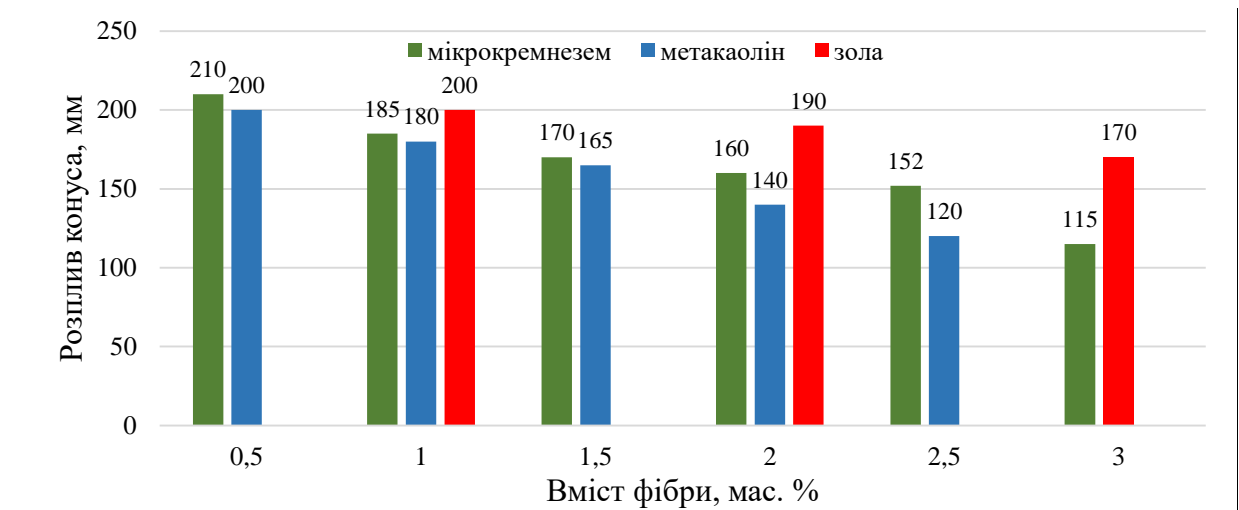


Рисунок 3.7 – Вплив мінеральних добавок та фібри на рухливість дрібнозернистого бетону

При дослідженні міцності модифікованих дрібнозернистих бетонів з добавкою мікрокремнезему (рисунок 3.8) встановлено, що із збільшенням кількості фібри до 3 мас.% міцність на згин через дві доби зростає в 1,7 рази порівняно з композитом із вмістом фібри 0,5 мас.%. Через 7 діб міцність на згин зростає в 1,8 рази, а через 28 діб – на 67%.

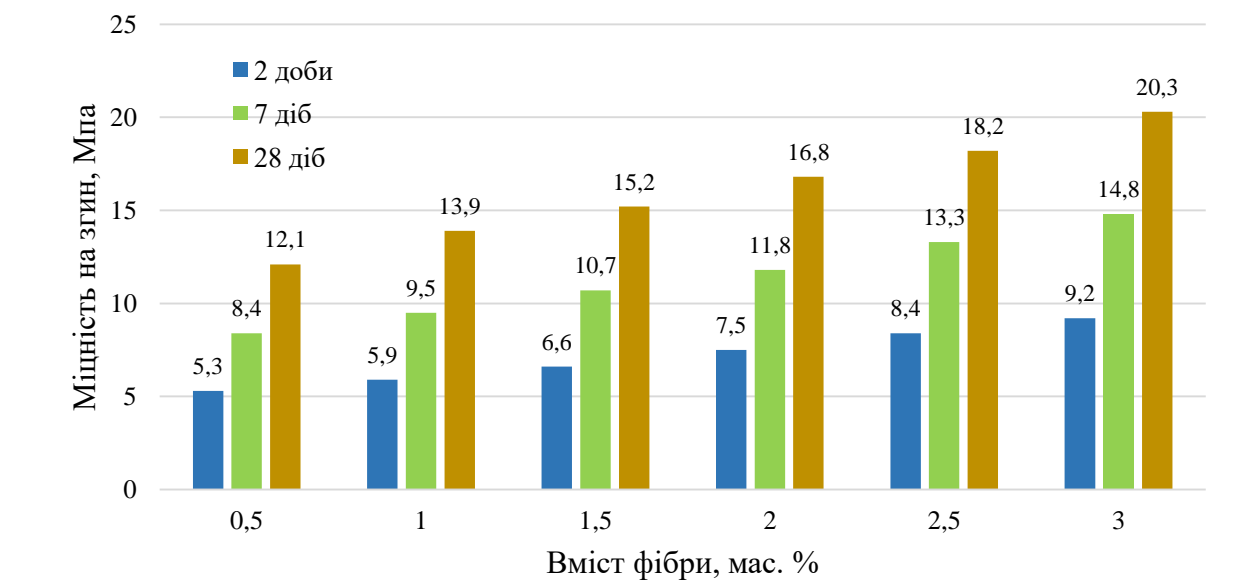


Рисунок 3.8 – Вплив фібри на міцність на згин дрібнозернистого бетону із добавкою мікрокремнезему

Результати визначення міцності на стиск дрібнозернистих бетонів з добавкою мікрокремнезему (рисунок 3.9) показали, що міцність через 2 доби зростає із збільшенням вмісту фібри від 33,4 МПа (при 0,5 мас.% фібри) до 42,1 МПа (при 3,0 мас.% фібри). Через 7 діб міцність на стиск зростає від 54,3 МПа (при 0,5 мас.% фібри) до 67,6 МПа (при 3,0 мас.% фібри). Через 28 діб міцність на стиск зростає від 79,2 МПа (при 0,5 мас.% фібри) до 92,5 МПа (при 3 мас.% фібри).

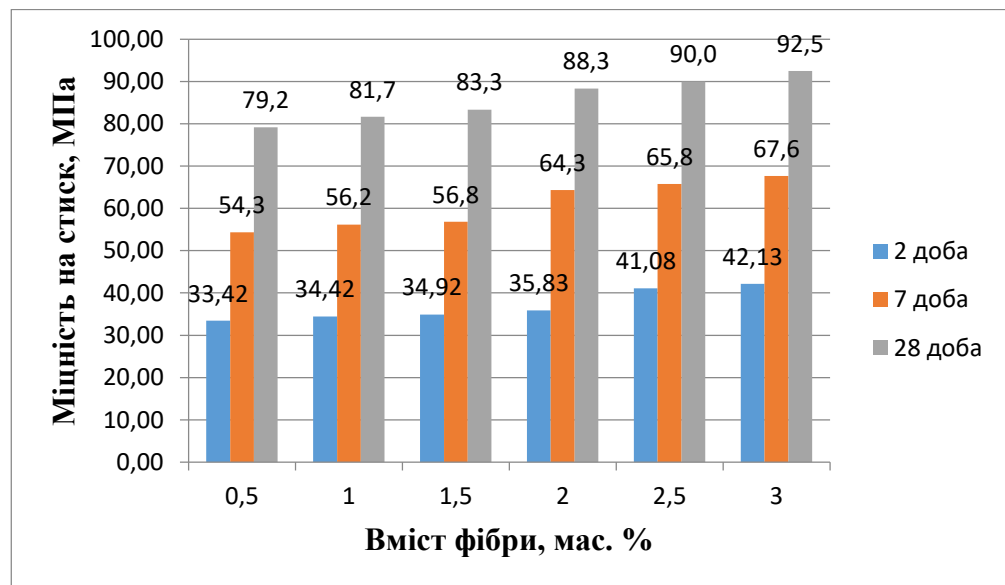


Рисунок 3.9 – Міцність на стиск дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів із добавкою мікрокремнезем

При введенні поліпропіленової фібри до складу модифікованого дрібнозернистого бетону з добавкою метакаоліну (рисунок 3.10) міцність на згин через дві доби тверднення зростає із збільшенням кількості фібри до 1,0 мас.% на 11,5% порівняно з дрібнозернистим бетоном, армованим 0,5 мас.% фібри, через 7 діб тверднення приріст міцності становить 12,3%, а через 28 діб – 15,3%. При збільшенні дозування фібри до 3% міцність на згин через 2 доби зростає в 1,6 рази порівняно з композитом із вмістом фібри 0,5 мас.%, а через 28 діб тверднення – в 1,5 рази.

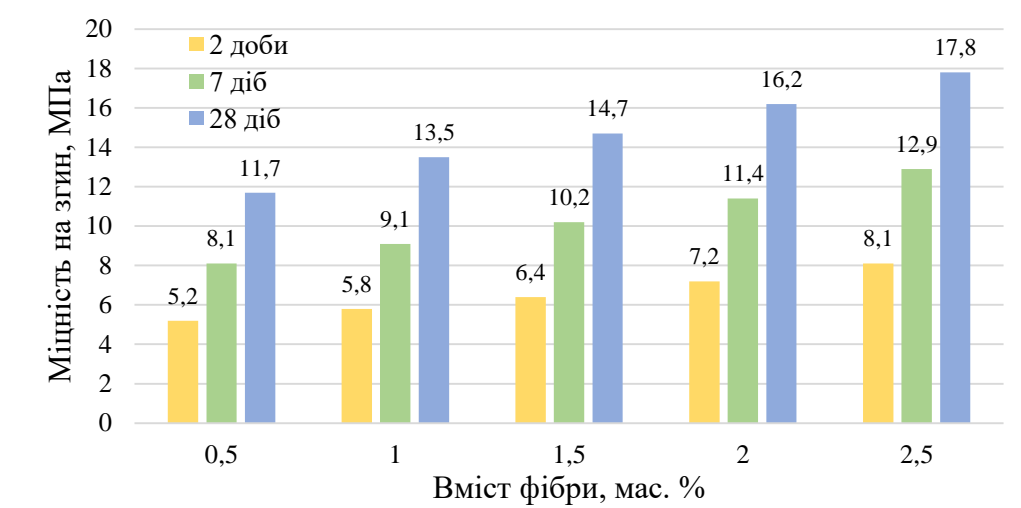


Рисунок 3.10 – Міцність на згин дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів із добавкою метакаоліну

При дослідженні міцності на стиск дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів з метакаоліном (рисунок 3.11) показано, що їх міцність через 2 доби зростає із збільшенням вмісту фібри від 31,0 МПа (при 0,5 мас.% фібри) до 36,1 МПа (при 3 мас.% фібри). Через 7 діб міцність на стиск зростає від 48,0 МПа (при 0,5 мас.% фібри) до 60,7 МПа (при 3 мас.% фібри). Через 28 діб міцність на стиск зростає від 73,3 МПа (при 0,5 мас.% фібри) до 87,5 МПа (при 3 мас.% фібри).

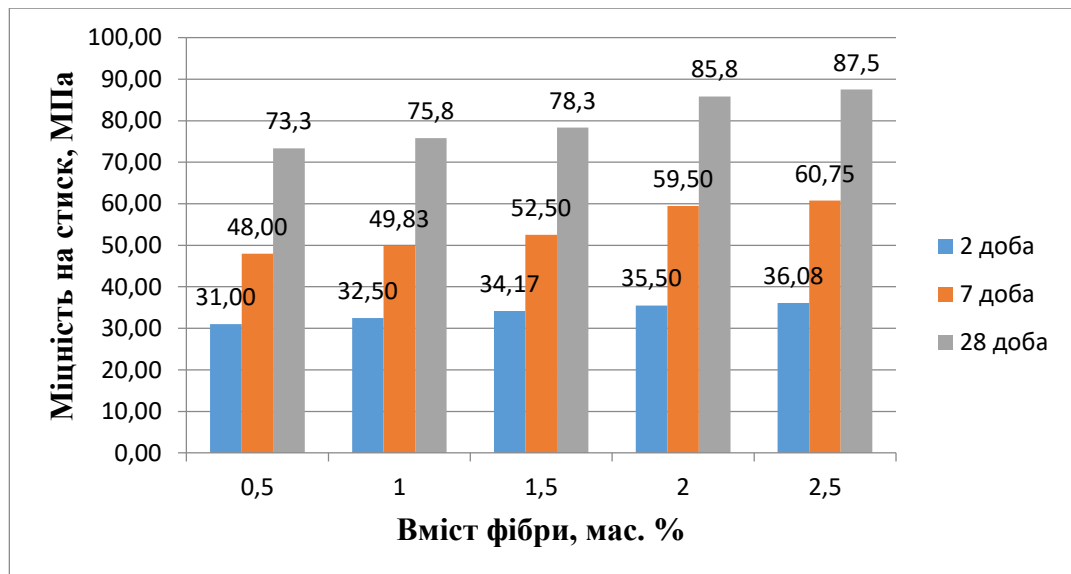


Рисунок 3.11 – Міцність на стиск дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів із добавкою метакаоліну

Введення фібри до складу модифікованого дрібнодисперсного бетону з добавкою золи-винесення встановлено (рисунок 3.12), що із збільшенням кількості фібри до 2,0 мас.% міцність на згин через 2 доби зростає на 30,2% порівняно з композитом із вмістом фібри 1 мас.%. Через 7 діб міцність на згин зростає в 1,3 рази, а через 28 діб – в 1,2 рази і становить 15,8 МПа.

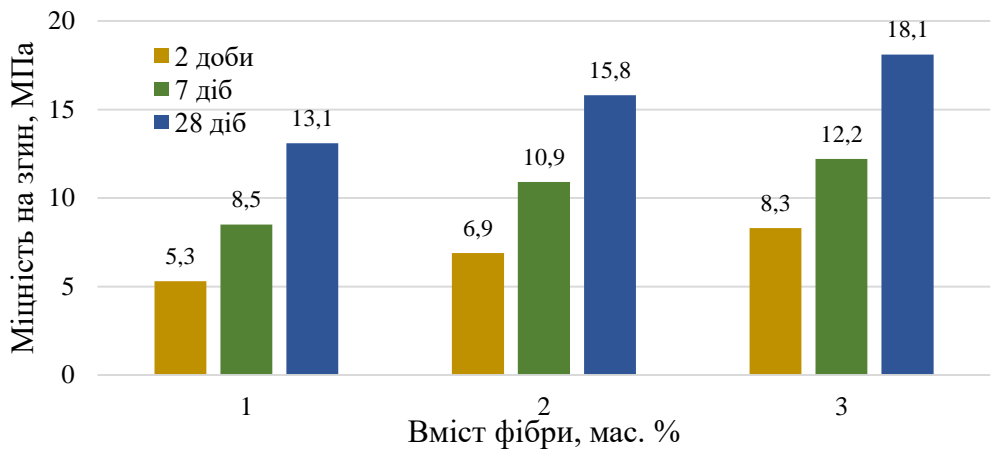


Рисунок 3.12 – Міцності на згин дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів із добавкою золи-винесення

При дослідженні міцності на стиск дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів із добавкою золи-винесення показано (рисунок 3.13), що міцність через 2 доби зростає із збільшенням вмісту фібри від 25,3 МПа (при 1,0 мас.% фібри) до 26,3 МПа (при 3,0 мас.% фібри).

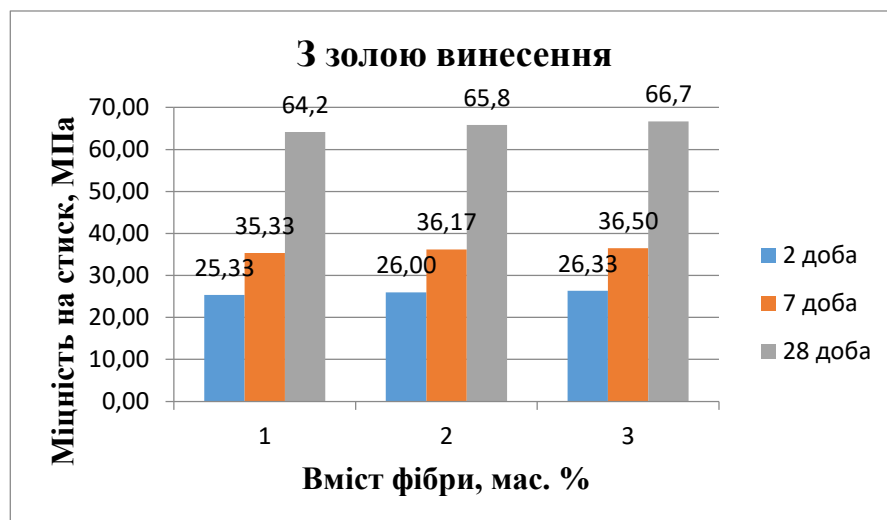


Рисунок 3.13 – Міцність на стиск дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів із добавкою золи-винесення

Через 7 діб міцність на стиск зростає від 35,3 МПа (при 1,0 мас.% фібри) до 36,5 МПа (при 3,0 мас.% фібри). Через 28 діб міцність на стиск зростає від 64,2 МПа (при 1 мас.% фібри) до 66,7 МПа (при 3,0 мас.% фібри).

Для орієнтовної оцінки тріщиностійкості модифікованих дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів за показниками міцності на стиск та згин розраховували умовний коефіцієнт тріщиностійкості (крихкості). Показник крихкості бетону – коефіцієнт крихкості $K_{\text{КРИХ}}$, який дорівнює співвідношенню міцності на згин зразків ($R_{\text{ЗГИН}}$, до міцності на стиск ($R_{\text{СТ}}$), визначали за формулою:

$$K_{\text{КРИХ}} = (R_{\text{ЗГИН}}/R_{\text{СТ}}) \quad (3.2)$$

При розрахунку коефіцієнта крихкості для композиту з добавкою мікрокремнезему встановлено (рисунок 3.14), що із збільшенням кількості фібри до 3 мас.% порівняно з бетоном, армованим 0,5 мас.% фібри, коефіцієнт крихкості через 28 діб зростає у 1,7 рази (до 0,219). Усі показники коефіцієнтів тріщиностійкості перевищують значення 0,125, що дозволяє класифікувати їх як некрихкі.

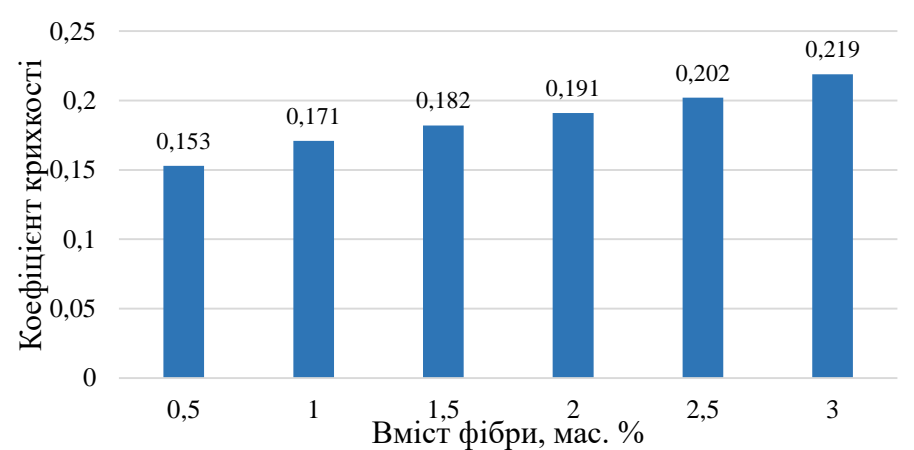


Рисунок 3.14 – Коефіцієнт крихкості дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів з добавкою мікрокремнезему

Коефіцієнт крихкості для дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів з добавкою метакаоліну із збільшенням кількості фібри до 2,5 мас.% через 28 діб зростає від 0,159 (вміст фібри 0,5 мас.%) до 0,208 (вміст фібри 2,5 мас.%) (рисунок 3.15).

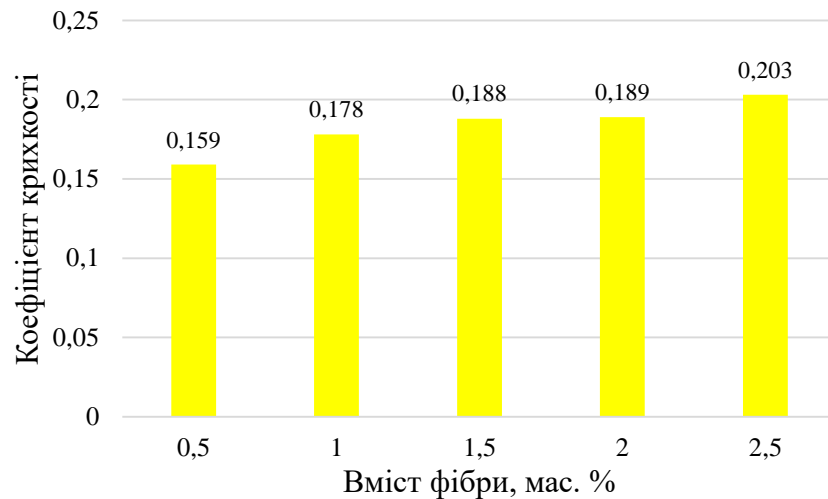


Рисунок 3.15 – Коефіцієнт крихкості дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів з добавкою метакаоліну

Результати розрахунку коефіцієнта крихкості для дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів з добавкою золи-винесення показали (рисунок 3.16), що із збільшенням кількості фібри до 3,0 мас.% порівняно з вмістом фібри 1,0 мас.% коефіцієнт крихкості через 28 діб зростає від 0,204 (вміст фібри 1,0 мас.%) до 0,271 (вміст фібри 3,0 мас.%).

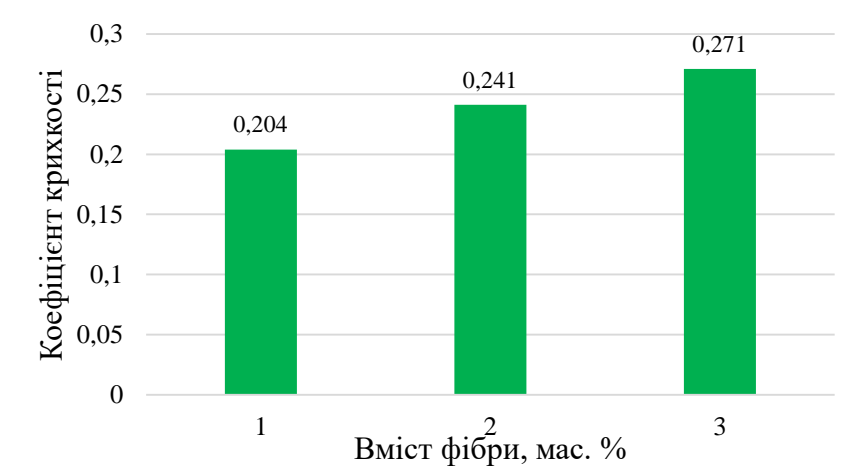


Рисунок 3.16 – Коефіцієнт крихкості дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів з добавкою золи-винесення

Як показали результати випробувань модифікованих дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів, найвищими показниками міцності на стиск характеризуються композити з добавкою мікрокремнезему. У зв'язку з

цим, у подальших дослідженнях використовували добавку мікрокремнезему та полікарбонатного суперпластифікатора. Для оптимізації структури на нанорівні вводили добавку аеросил у кількості 0,5 мас. %.

Одним з видів механічного впливу на поверхню бетонної промислової підлоги є ударні навантаження. Традиційно опір матеріалу ударним навантаженням характеризується мірою одного з наступних критеріїв [141, 159, 163]: кількість ударів під час повторного випробування на удар для досягнення заданого рівня енергії, необхідної для руйнування зразка, та розміру пошкодження, виміряного за допомогою розміру відбитка. Результати таких випробувань використовують для порівняння відносних переваг різних матеріалів. Однак вони залежать від геометрії зразка, відповідності випробувальної системи, конфігурації навантаження, швидкості навантаження.

Додаткову інформацію про поведінку бетону при ударних навантаженнях можна отримати, виконуючи інструментальні та снарядні випробування на удар. Однак ці методи випробування вимагають використання високотехнологічних вимірювальних приладів [159].

Враховуючи умови експлуатації промислових підлог для випробування на ударну в'язкість використано методику, запропоновану комітетом АСІ 544, яка пов'язана з визначенням кількості ударів, що призвели до появи першої видимої тріщини на поверхні зразка, реєструється як перша міцність тріщини. Навантаження продовжують доти, поки зразок не зруйнується. Кількість ударів, що спричинили руйнування зразка, реєструється як гранична міцність.

У роботі проведено дослідження впливу базальтової та поліпропіленової фібри, які відрізняються за модулем пружності, на міцнісні властивості та ударну в'язкість дрібнозернистого бетону (Ц:П=1:1,5) на основі портландцементу, модифікованого мікрокремнеземом, аеросилом та полікарбонатним суперпластифікатором. Кількість фібри варіювали у межах 0,5-2,0 мас. %, оскільки більша кількість фібри призводить до різкого зниження рухливості сумішей.

Випробування модифікованих дрібнозернистих бетонів на міцність на згин показали, що при введенні базальтової фібри міцність зразків є меншою на 5-8 %, порівняно зі зразками, армованими поліпропіленою фіброю у всі терміни тверднення (рисунок 3.17). Слід відзначити, що приріст міцності на згин дрібнозернистих бетонів, модифікованих комплексною добавкою на основі мікрокремнезему, аеросилу, полікарбосилату порівняно з бетонами, модифікованими добавкою мікрокремнезем+PCE, на 5-10 %.

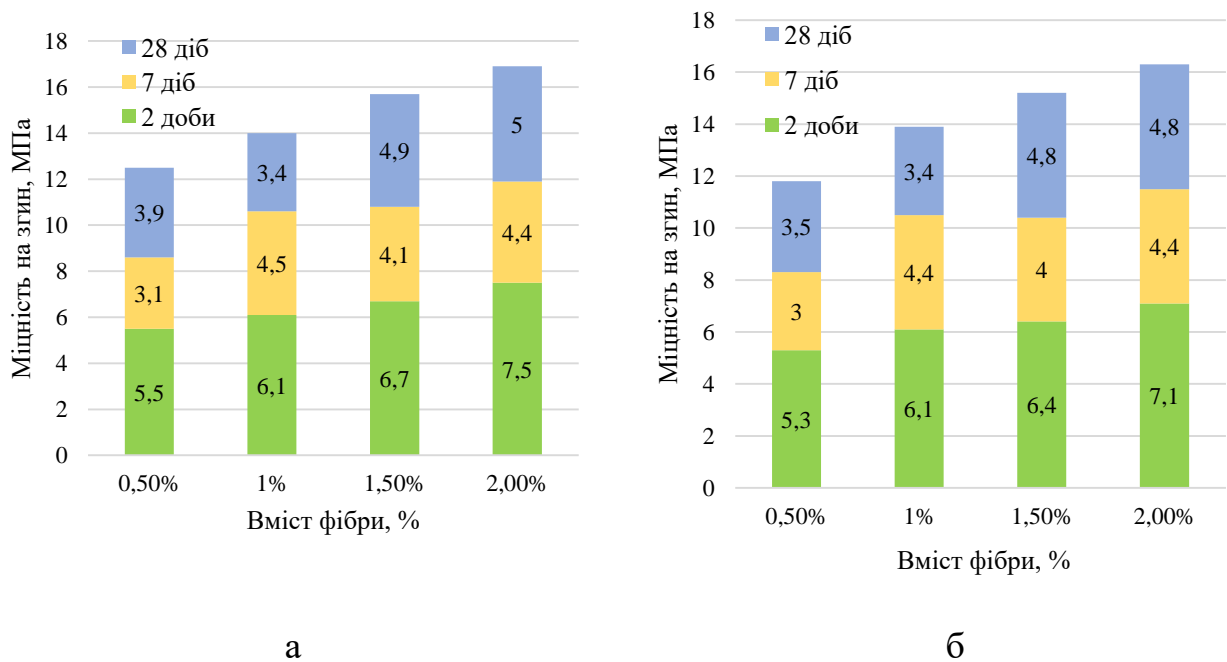


Рисунок 3.17 – Міцність на згин модифікованих дрібнодисперсних бетонів, армованих з поліпропіленою (а) та базальтовою (б) фіброю

Досліджено ударну в'язкість дрібнозернистого бетону (Ц:П=1:1,5) на основі портландцементу, модифікованого мікрокремнеземом, аеросилом та полікарбосилатним суперпластифікатором через 28 діб тверднення. Показано, що дрібнозернистий бетон без дисперсного армування характеризується показниками ударної в'язкості на рівні 8,3 Дж/см³, що у 2,7 рази перевищує ударну в'язкість немодифікованого дрібнозернистого бетону однакової рухливості.

Як видно з результатів випробувань, введення фібри суттєво підвищує ударну в'язкість дрібнозернистих бетонів. Так, введення 1 мас.% базальтової

фібри забезпечує зростання ударної в'язкості до повного руйнування в 6,1 рази порівняно з модифікованим дрібнозернистим бетоном без фібри (рисунок 3.18). При цьому зростання кількості фібри до 2 мас.% зумовлює зростання ударної в'язкості в 8,1 рази. Використання дисперсних волокон змінює механізм руйнування матеріалу після появи першої тріщини. Так, для неармованого композиту різниця між ударною в'язкістю, що характеризує появу першої тріщини та повного руйнування становить 2,5 Дж/см³, у той час як для композиту, армованого 1 мас.% базальтової фібри, - 15 Дж/см³, що свідчить про здатність матеріалу протистояти динамічним навантаженням.

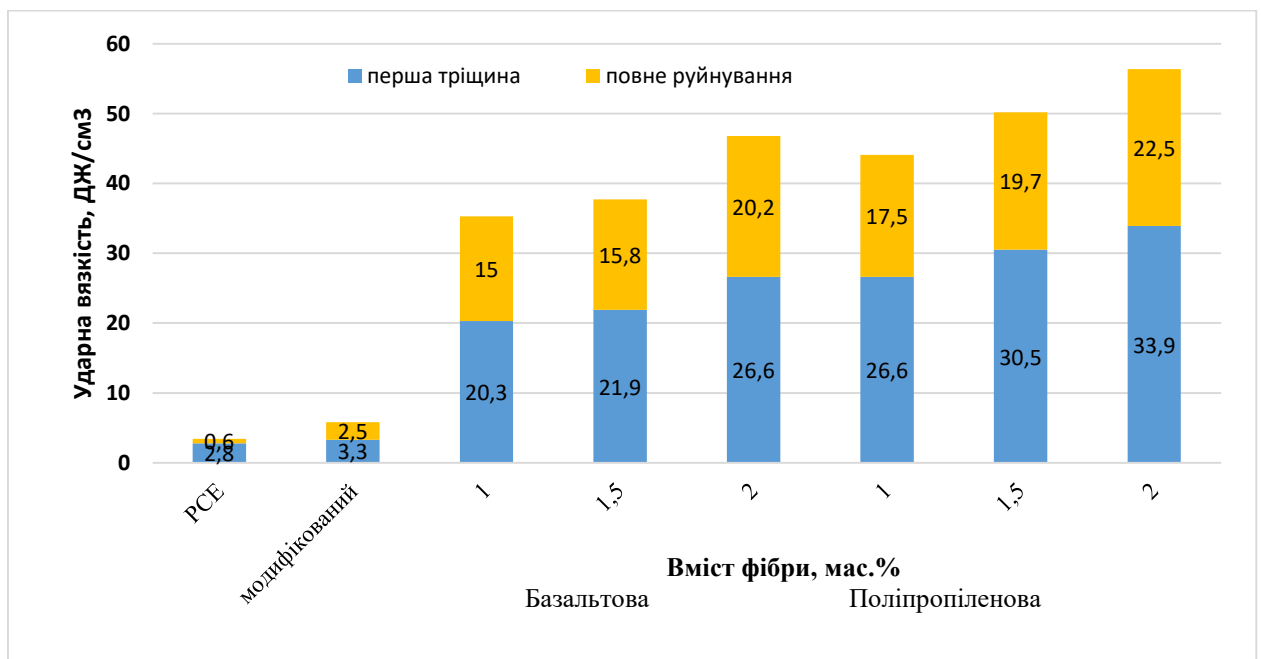


Рисунок 3.18 – Вплив виду та кількості фібри на ударну в'язкість дрібнозернистих бетонів

Використання поліпропіленової фібри при дозуванні 2 мас.% дозволяє підвищити ударну міцність модифікованого дрібнозернистого бетону у 9,7 рази порівняно з неармованим бетоном. Слід відзначити, що при армуванні базальтовою фіброю (1 мас.%) досягається показник ударної в'язкості 35,3 Дж/см³, а при використанні поліпропіленової фібри – 44,1 Дж/см³, що

свідчить про перевагу використання поліпропіленової фібри для проектування бетонів, що піддаються дії ударних навантажень.

Отже, отримані експериментальні результати підтверджують необхідність застосування ультрадисперсних мінеральних добавок, полікарбоксилатних суперпластифікаторів та армувальних поліпропіленових волокон для отримання високоміцних бетонів з метою забезпечення підвищених експлуатаційних характеристик, зокрема стійкості до динамічних навантажень, що вимагає дослідження процесів їх структуроутворення.

3.3. Особливості процесів структуроутворення модифікованих портландцементів, армованих дисперсними волокнами

Встановлення закономірностей цілеспрямованого регулювання параметрів цементних систем на стадії взаємодії цементу з водою є обов'язковою умовою створення бетонів з заданими будівельно-технічними властивостями. Суттєвий вплив на структуроутворення цементних систем і формування структури цементного каменю має характер модифікування продуктів гідратації цементу на наноструктурному рівні. Ультрадисперсні частинки розміром менше, ніж 1 мкм та наночастинки розміром менше ніж 100 нм, які характеризуються запасом вільної поверхневої енергії, можуть прискорювати хімічні реакції, впливати на каталітичну активність та істотно збільшувати вплив поверхневих атомів на синтез міцності цементних систем.

Використання модифікаторів зумовлює зміну процесів раннього структуроутворення, фазового складу, ущільнення мікроструктури й зростання міцності цементної матриці. Так, міцність каменю на основі ПЦ І-500 без добавок ($\text{НГТ} = 0,305$) через 1 та 3 доби тверднення в нормальних умовах становить 19,1 та 44,5 МПа, а каменю на основі ПЦ І-500, модифікованого полікарбоксилатним суперпластифікатором – 40,2 та 46,3

МПа відповідно при забезпеченні водоредукуючого ефекту 26,2%. При подальшому твердненні міцність цементуючої системи зростає на 15-35% і у віці 7 діб становить 60,2 – 76,8 МПа (таблиця 3.4).

Високими міцнісними показниками характеризується склад №4 що містить комплексний наномодифікатор: через 1 добу – 46,1 МПа, та через 3 доби – 68,2 МПа. Міцність каменю на основі ПЦ І-500 з використанням мікрокремнезему та полікарбосилатного пластифікатора через 1 добу зростає у 2,3 рази порівняно з складом без добавок, у той же час вже через 3 доби активізуються процеси, пов'язані з пуцолановою активністю, і міцність композиції становить 69,8 МПа.

Таблиця 3.4 – Міцність цементного каменю, модифікованого добавками-модифікаторами (тісто 1:0)

№ з/п	Вид та кількість добавок	НГТ, %	Міцність при стиску, у віці діб, МПа			
			1	3	7	28
1	Без добавки	30,5	19,1	44,5	61,3	74,9
2	1,0 мас. % Glenium	23,0	40,2	46,3	72,2	78,8
3	5 мас.% МК + 1,0 мас. % Glenium	22,0	43,4	69,8	70,3	82,6
4	5 мас.% МК + 1,0 мас. % Glenium+0,5 мас.% аеросил	24,8	46,1	68,2	76,8	89,7

Модифікатори в складі портландцементу відіграють важливу роль у формуванні структури цементного каменю в початкові терміни тверднення. У зв'язку з цим, для дослідження структуроутворення та особливостей гідратації портландцементів, модифікованих модифікаторами різної природи та комплексним, використано рентгенофазовий аналіз.

На дифрактограмі каменю на основі портландцементу ПЦ І-500 через 1 добу гідратації (рисунок 3.19) з'являються характеристичні лінії основних гідратних фаз – еtringіту ($d/n = 0,973; 0,561; 0,388; 0,348; 0,256$ нм) і портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n = 0,493; 0,263; 0,193; 0,179$ нм).

Спостерігаються лінії негідратованих алітової та белітової фаз ($d/n = 0,302; 0,276; 0,218$ нм), трикальцієвого алюмінату та чотирікальцієвого алюмофериту ($d/n = 0,268; 0,725$ нм). Слід відзначити, що на дифрактограмі каменю на основі портландцементу з добавкою РСЕ інтенсивність лінії $d/n = 0,218$ нм, яка відповідає негідратованому трикальцієвому силікату, є вищою, а ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – нижчою, що свідчить про сповільнення процесів гідратації у ранній період в присутності полікарбоксилатів.

Проведеними дослідженнями встановлено, що при введенні в портландцементну систему суперпластифікатора нової генерації на основі полікарбоксилатів, підвищується рухливість системи. Він, адсорбуючись на поверхні високодисперсних цементних частинок, створює мономолекулярний шар і створює структурно-механічний бар'єр, який забезпечує стабільність системи в часі, з іншого боку спричиняє сповільнення гідратаційних процесів.

При введенні комплексного модифікатора РСЕ+мікрокремнезем інтенсивність ліній негідратованих клінкерних мінералів ($d/n = 0,279; 0,218$ нм) є слабшою, ніж на дифрактограмі портландцементу без добавок, що свідчить про прискорення процесів гідратації портландцементу. За результатами рентгенофазового аналізу цементного каменю без добавок та з добавкою суперпластифікатора РСЕ і використаних мінеральних компонентів хід процесів гідратації не змінюється, що свідчить про рентгеноаморфність утворених продуктів гідратації, зокрема низькоосновних гідросилікатів типу $\text{CSH}(\text{B})$. Слід відзначити, що інтенсивність ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n = 0,493; 0,263; 0,193; 0,179$ нм) на дифрактограмі портландцементу з добавками є слабшою, а інтенсивність ліній негідратованих клінкерних мінералів ($d/n = 0,279; 0,219$ нм) сильнішою, ніж на дифрактограмі портландцементу без добавок, що

свідчить про формування підвищеної кількості гідросилікатів кальцію і вказує на прискорення процесів гідратації та структуроутворення.

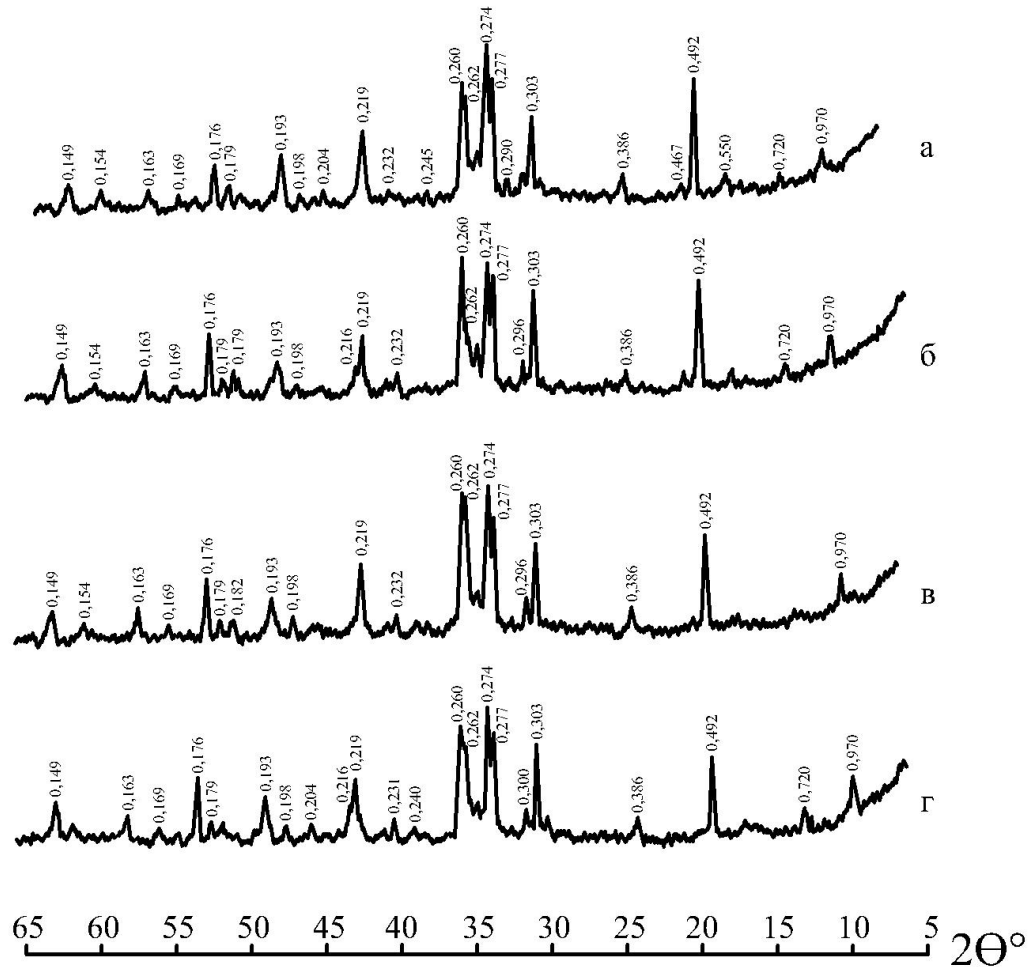


Рисунок 3.19 – Дифрактограми каменю на основі портландцементу ПЦ I-500, через 1 добу тверднення: без добавок (а), з добавками: PCE (б), мікрокремнезем+PCE (в), мікрокремнезем+аеросил+ PCE (г)

Вплив модифікаторів оцінювали за зміною ступеня гідратації композицій, який визначали за формулою:

$$CГ = \left(1 - \frac{I}{I_0} \right) \cdot 100\% \quad (3.2)$$

де I і I_0 – інтенсивність ліній C_3S ($d/n=0,218$ нм) відповідно гідратованої і негідратованої в'язучої речовини.

Методом рентгенофазового аналізу встановлено, що ступінь гідратації цементуючої матриці, модифікованої добавкою Мікрокремнезем+Аеросил+РСЕ, через 1 добу становить 46,1%, тоді як ПЦ І-500 Р – 37,1%.

З часом тверднення через 28 діб інтенсивність ліній негідратованих мінералів портландцементного клінкеру знижується, що свідчить про активний перебіг процесів гідратації портландцементу (рисунок 3.20). Низька інтенсивність ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n = 0,493; 0,263; 0,193; 0,179$ нм) на дифрактограмі каменю на основі портландцементу, модифікованого добавкою РСЕ+мікрокремнезем+аеросил, свідчить про активний перебіг пуцоланових реакцій із зв'язуванням портландиту в рентгеноаморфні гідросилікати кальцію.

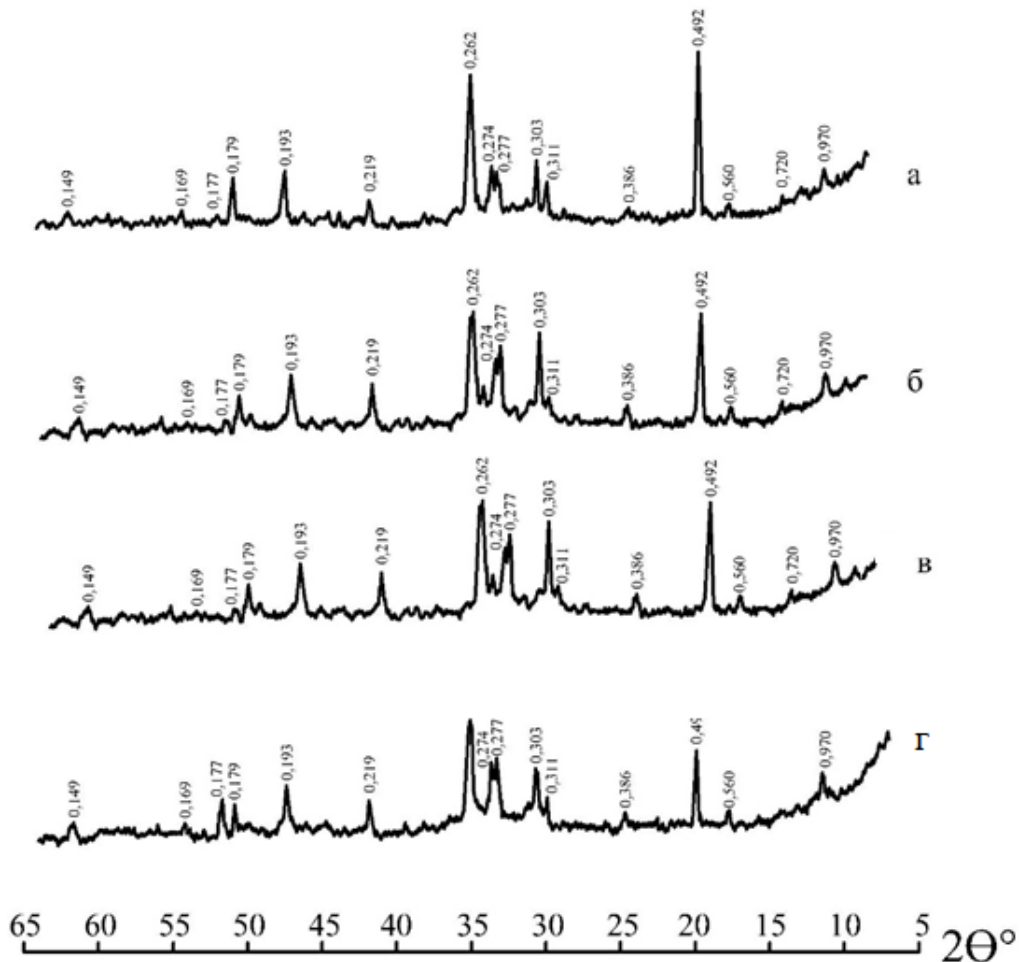


Рисунок 3.20 – Дифрактограми каменю на основі на основі портландцементу ПЦ І-500, через 28 діб тверднення: без добавок (а), з добавкою: РСЕ (б), мікрокремнезем+РСЕ (в), мікрокремнезем+аеросил+ РСЕ (г)

Реактивні мінеральні добавки, що містять ультра- та нанодисперсні частинки SiO_2 , крім фізичного моделювання міжзернового простору забезпечують швидку хімічну взаємодію з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням додаткової кількості гідросилікатних фаз C-S-H(I) у початковий період тверднення. Для вивчення процесів раннього структуроутворення в модельних системах CaO :мінеральна добавка=1,0:1,0 проведено їх рентгенофазові дослідження (рисунок 3.21).

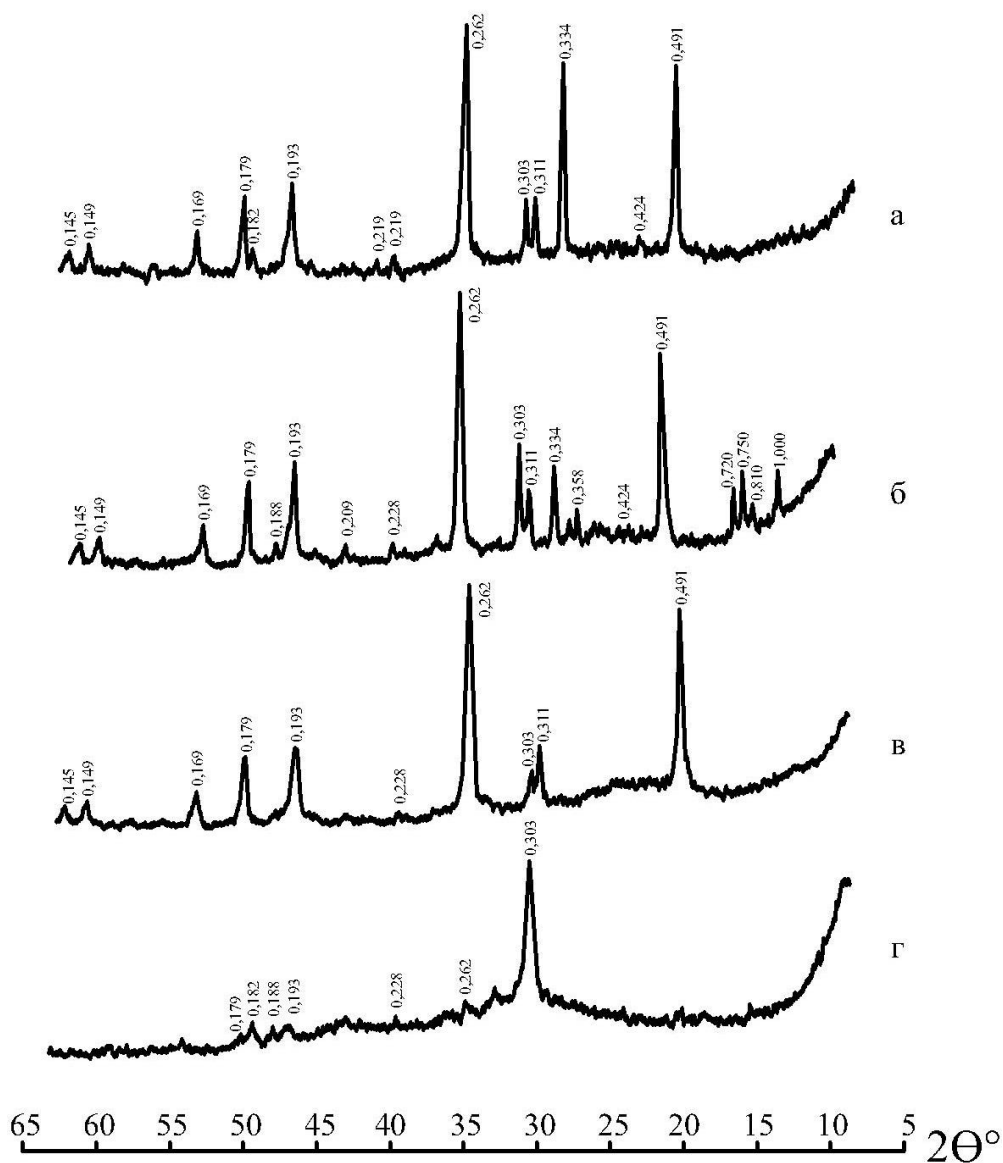


Рисунок 3.21 – Дифрактограми каменю на основі модельних систем через 1 добу тверднення: CaO :зола=1:1 (а) CaO :метакаолін =1:1 (б), CaO :мікрокремнезем =1:1 (в); CaO :аеросил=1:1 (г)

Слід відзначити, що на дифрактограмах модельних систем інтенсивність ліній кальцію гідроксиду ($d/n=0,493; 0,263$ нм) зменшується в ряді зола-винесення – метакаолін – мікрокремнезем – аеросил. Як видно з рисунку 3.21, на дифрактограмі модельної системи $\text{CaO}:\text{аеросил}=1,0:1,0$ через 1 добу взаємодії присутні лінії $d/n=0,307; 0,280; 0,183$ нм, які є характеристичними для C-S-H (I), що узгоджується з даними [120], що свідчить про формування низькоосновних гідросилікатів кальцію з відношенням $\text{Ca}/\text{Si}<1,5$ у ранній період тверднення.

Особливості впливу добавок на процеси гідrataції портландцементу можна судити за показниками тепловиділення [90]. Дослідженнями зміни температури в процесі гідrataції портландцементів встановлено (рисунок 3.22), що максимальна температура гідrataції ($t=100$ °C) портландцементу ПЦ І-500 досягається через 8,25 год. Під час гідrataції ПЦ І-500 з добавкою мікрокремнезему максимум температури дещо підвищується до 100,5 °C і настає через 7,75 год, що пов'язано з наявністю частинок нанорозмірного масштабу у складі мікрокремнезему, які є готовими центрами кристалізації і сприяють прискоренню процесів гідrataції. Портландцемент з добавкою аеросилу, наночастинки якого є ініціаторами прискорення гідrataційних процесів за гетерогенним механізмом зародкоутворення, характеризується температурним максимумом 90 °C через 6 год.

Введення добавки суперпластифікатора на полікарбоксилатній основі РСЕ у кількості 1,5 мас.% відтягує час досягнення температурного максимуму на 2,25 год порівняно з портландцементом ПЦ І-500 без добавок. При цьому температурні показники досягають значення 96,5°C. Використання комплексної добавки РСЕ+мікрокремнезем+аеросил відтягує час досягнення температурного максимуму, який становить 100,5°C до 10 год.

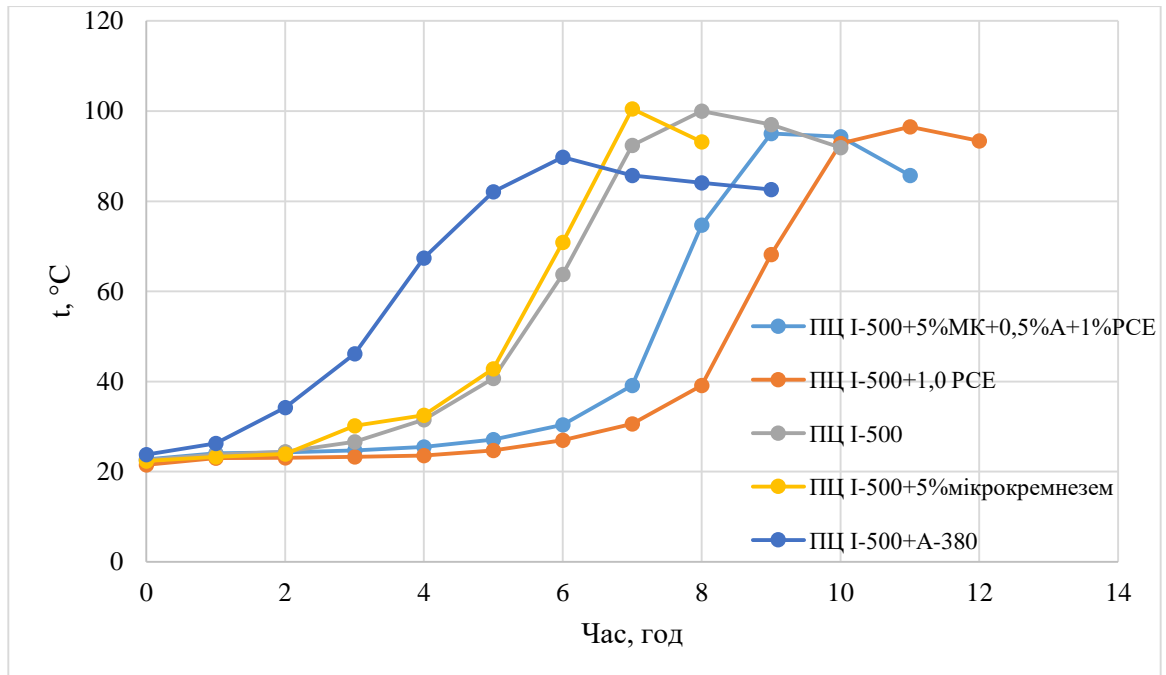
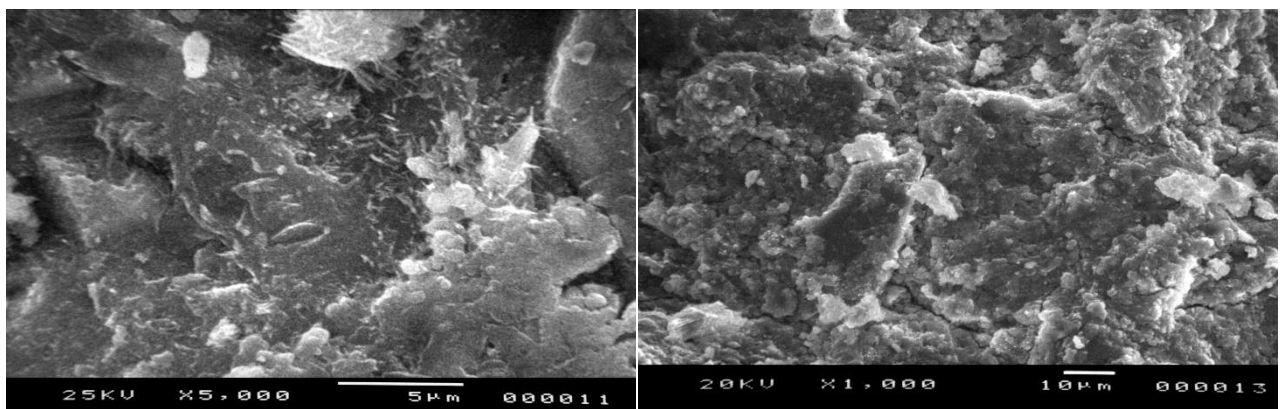


Рисунок 3.22 – Зміна температури при гідратації модифікованих портландцементів

Метод растрової електронної мікроскопії доповнює дані про формування структури каменю на основі портландцементу з органомінеральними добавками. Для каменю на основі наномодифікованої швидкотверднучої цементуючої системи з добавкою 2,5 мас. % X-SEED, гідратованого 1 добу, характерна щільна структура. При збільшенні спостерігаються волокнисті гідросилікати кальцію, які (рисунок 3.23, а).



а

б

Рисунок 3.23 – Мікроструктура цементного каменю, модифікованого добавкою PCE+мікрокремнезем+аеросил, гідратованого 1 добу (а) та 28 діб (б)

Мікроструктура каменю на основі модифікованого портландцементу через 28 діб є щільнішою з малою кількістю пор (рисунок 3.23, б). При цьому характерна менша закристалізованість продуктів гідратації – гідроксиду кальцію, що обумовлено адсорбційним модифікуванням продуктів гідратації добавкою полікарбоксилату із збільшенням їх дисперсності [143]. Утворення низькоосновних гідросилікатів CSH(I) волокнистої структури при використанні активних мінеральних добавок сприяє зшиванню зерен в неклінкерній частині, а з віком тверднення зумовлює кольматацію пор із забезпеченням однорідної щільної мікроструктури.

Отже, модифікування портландцементу комплексом добавок на основі полікарбоксилатного суперпластифікатора та активними мінеральними добавками, що містять нанорозмірні частинки, забезпечує направлене керування процесами гідратації клінкерних мінералів і реакцій хімічної взаємодії гідратних новоутворень в неклінкерній частині портландцементних систем з прискореним набором міцності у ранній період та формуванням однорідної малodefектної мікроструктури цементуючої матриці.

3.4. Підбір складу високофункціональних дисперсно-армованих композитів

Для вирішення проблеми тріщиноутворення високоміцного бетону та пов'язане з цим погіршення показників довговічності конструкцій розроблено клас високофункціональних дисперсно-армованих будівельних композитів (інженерні цементуючі композити – engineered cementitious composites (ECC)) [127]. Концепція ECC ґрунтується на теорії мікромеханіки, яка передбачає оптимізацію компонентного складу і мікроструктури матеріалу з врахуванням взаємодії волокон, цементної матриці, поверхні розділу волоконно-матричного матеріалу, що забезпечує зшивання структури. При цьому після

появи першої тріщини несуча здатність ЕСС не змінюється, що призводить до деформаційного зміцнення, яке супроводжується множинним тріщиноутворенням (multiple cracking). Для контролю цього процесу в інженерних цементуючих композитах не застосовують крупний заповнювач, а також характерна обмежена кількість дрібного заповнювача, оскільки вони призводять до збільшення ширини розкриття тріщин [148].

У зв'язку з цим, на першому етапі досліджували вплив співвідношення цемент:дрібний заповнювач. Результати випробувань рухливості цементно-піщаних композицій показали, що збільшення вмісту піску спричиняє зниження рухливості дрібнозернистої суміші. У цьому випадку водопотреба зростає на 13,3; 30,0 та 43,3% відповідно для сумішей із співвідношенням цемент: пісок =1: 0,5; 1: 1 та 1: 1,5 для отримання однакової консистенції суміші (150–158 мм) (рисунок 3.24).

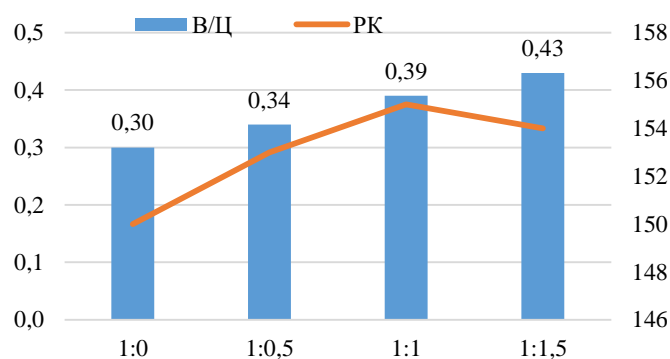


Рисунок 3.24 – Розплив конуса та водо-цементне відношення дрібнозернистих бетонів

Результат випробування на згин показує, що збільшення вмісту піску спричиняє зменшення міцності на згин дрібнозернистого бетону (рисунок 3.25). Міцність на згин дрібнозернистого бетону при співвідношенні цемент:пісок=1:1 знижується на 9,3% та 19,7% відповідно через 2 та 28 діб порівняно з цементним каменем. При співвідношенні цемент:пісок=1: 0,5 міцність дрібнозернистого бетону зменшується на 5-7%. Для подальших

досліджень використовували композиції із співвідношенням цементу та піску 1: 0,5 та 1: 1.

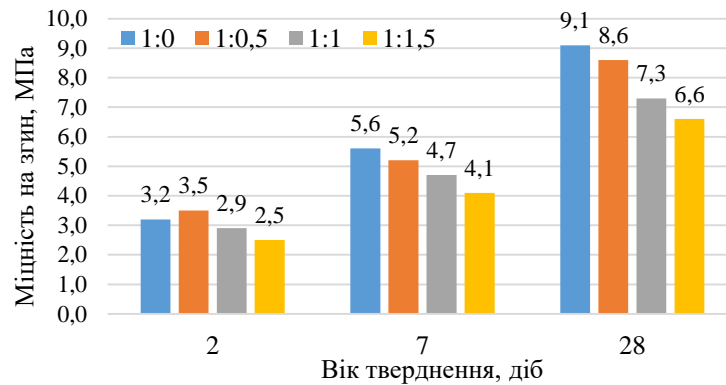


Рисунок 3.25 – Міцність на згин дрібнозернистих бетонів

Міцність на стик при введенні піску закономірно знижується (рисунок 3.26). При введенні в цементну композицію піску у співвідношенні 1:1 рання міцність знижується у 1,3 рази, а міцність через 28 діб в 1,4 рази. При аналізі результатів випробувань міцності дрібнозернистого бетону у співвідношенні 1:1,5 показано, що міцність через 2 доби тверднення такого бетону знижується у 1,4 рази, а через 28 діб – в 1,6 раза порівняно із цементним каменем. У подальших дослідженнях використовували співвідношення цемент:пісок=1:1.

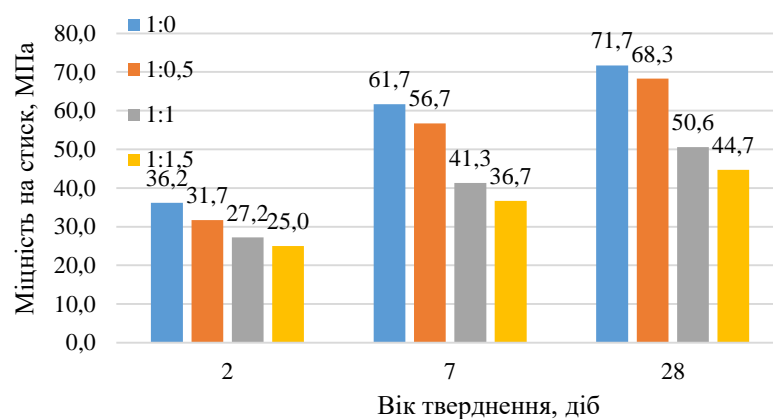


Рисунок 3.26 – Вплив дрібного заповнювача на міцність на стиск

Модель мікромеханіки передбачає використання золи-винесення для зменшення витрати в'язучого. Разом з тим, введення золи-винесення

внаслідок низької реакційної здатності призводить до зниження міцності як в ранні, так і пізні терміни тверднення. У зв'язку з цим, проведено експериментально-статистичне моделювання матриці інженерних цементуючих композитів. При цьому використаний один з методів статичної математичної обробки результатів – метод ортогонально-центрального композиційного планування (ОЦКП) [41].

Факторами оптимізації цементуючої матриці вибрана кількість золи-винесення ЗВ як співвідношення Ц:ЗВ ($X_1=0; 1; 2$) та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу РСЕ ($X_2 = 0; 0,75; 1,50$; мас.%) та за стабілізованих значень витрати регулятора в'язкості (0,1 мас. %). При зміні рецептурних рівнів вибраних факторів рухливість бетонної суміші стабілізували на рівні $R_K=150-180$ мм.

При плануванні експерименту були вибрані наступні контрольні параметри:

Y_1 – водов'язуче відношення;

Y_2, Y_3, Y_4 – границя міцності зразків на згин через 2, 7 та 28 діб тверднення відповідно, МПа;

Y_5, Y_6, Y_7 – границя міцності зразків на стиск через 2, 7 та 28 діб тверднення відповідно, МПа;

Y_8, Y_9, Y_{10} – коефіцієнт тріщиностійкості на стиск через 2, 7 та 28 діб тверднення відповідно

Метод ОЦКП дає можливість отримати математичний опис процесу у вигляді рівняння регресії (3.1):

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_{12}X_1X_2+b_{11}X_1^2+b_{22}X_2^2, \quad (3.1)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії.

Перевірку коефіцієнтів регресії на значимість та адекватність рівнянь регресії виконували з допомогою критеріїв Стьюдента та Фішера.

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

Таблиця 3.5 – Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

№	Умовні фактори		Натуральні фактори		В/Ц	Границя міцності на розтяг при згині, МПа, через, діб			Границя міцності на стиск, МПа, через, діб			Коефіцієнт тріщиностійкості, через, діб		
			Вміст, мас. %			2	7	28	2	7	28	2	7	28
	X ₁	X ₂	Зола	РСЕ		2	7	28	2	7	28	2	7	28
1	+1	+1	2	1,5	0,153	2,6	4,0	5,1	18,7	26,7	35,7	0,139	0,150	0,143
2	+1	0	2	0,75	0,175	2,3	3,7	4,7	15,4	24,1	30,3	0,149	0,154	0,155
3	+1	-1	2	0	0,25	1,5	2,8	3,4	11,6	15,6	23,4	0,129	0,179	0,145
4	0	+1	1	1,5	0,155	3,4	4,8	7,0	34,8	44,9	63,6	0,098	0,107	0,110
5	0	0	1	0,75	0,183	3,1	4,4	6,1	31,8	41,3	56,0	0,097	0,107	0,109
6	0	-1	1	0	0,27	2,8	3,8	5,1	21,2	37,5	46,8	0,132	0,101	0,104
7	-1	+1	0	1,5	0,2	3,7	5,6	7,9	48,3	66,2	89,9	0,077	0,085	0,088
8	-1	0	0	0,75	0,26	3,5	5,2	7,2	42,7	63,8	85,8	0,082	0,082	0,084
9	-1	-1	0	0	0,32	3,3	4,9	6,7	32,2	57,1	80,3	0,102	0,086	0,084

Для пошуку значень змінних факторів X_1 (співвідношення Ц:ЗВ) та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу X_2 (PCE), при яких досліджувані функції приймають максимальні значення, використали дисоціативно-кроковий метод оптимізації. Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії проведено з використанням матричного підходу до регресивного аналізу. Отримані рівняння регресії:

$$Y_1(B/C)=0,22+0,06X_2+0,01X_1^2+0,02X_2^2$$

$$Y_5(f_{cm2})=28,5-1,93X_1+ 6,63X_2-3,13X_1^2-5,73X_2^2+0,6X_1X_2$$

$$Y_6(f_{cm7})=41,9-3,82X_1 + 4,15X_2-3,85X_1^2-7,65X_2^2+1,9X_1X_2$$

$$Y_7(f_{cm28})=56,9-6,08X_1+2,7X_2-1,18X_1^2-5,08X_2^2+2,1X_1X_2$$

$$Y_{10}(f_{cf2}/f_{cm28})=0,113-0,01X_1-0,03X_2+0,03X_1^2-0,04X_2^2$$

За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні поверхні та діаграми, що адекватно описують залежність міцності при стиску, згині та коефіцієнта тріщиностійкості через 2 та 28 діб тверднення цементних систем від змінних параметрів (рис. 3.27, 3.28).

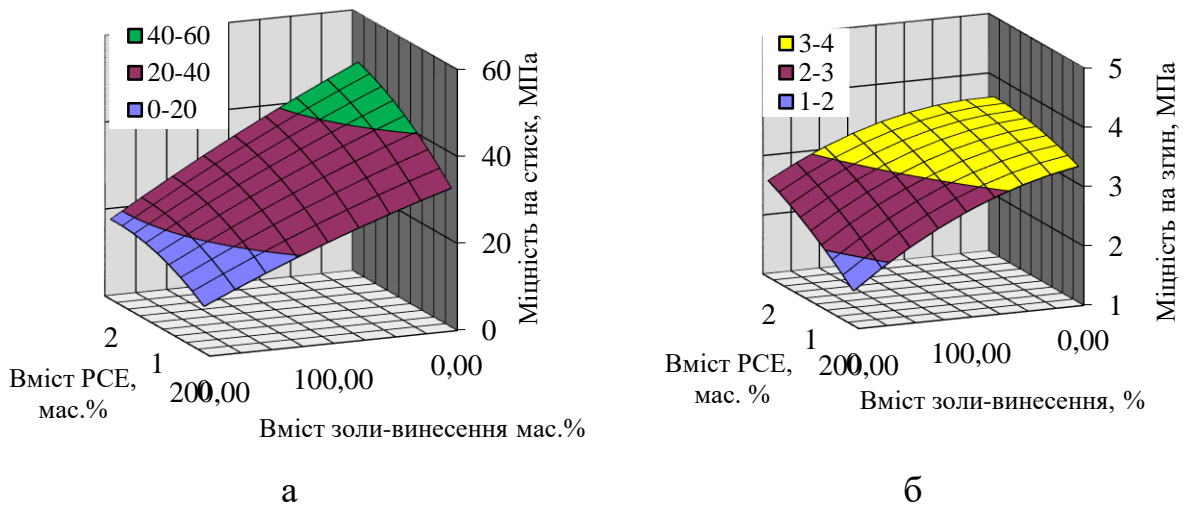
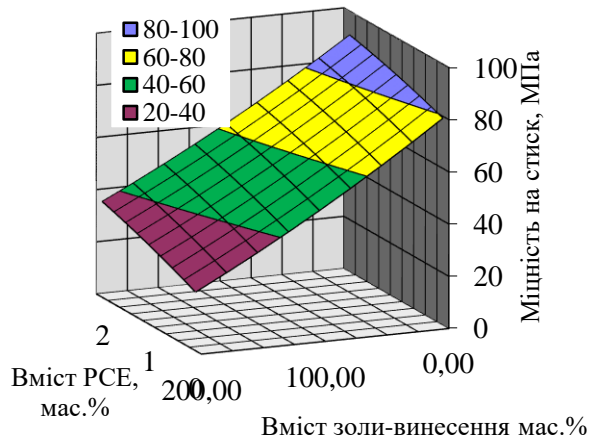
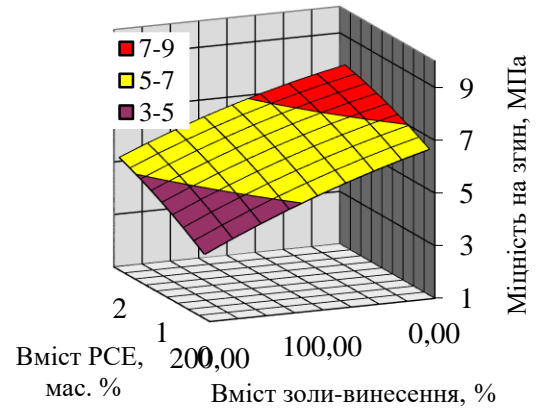


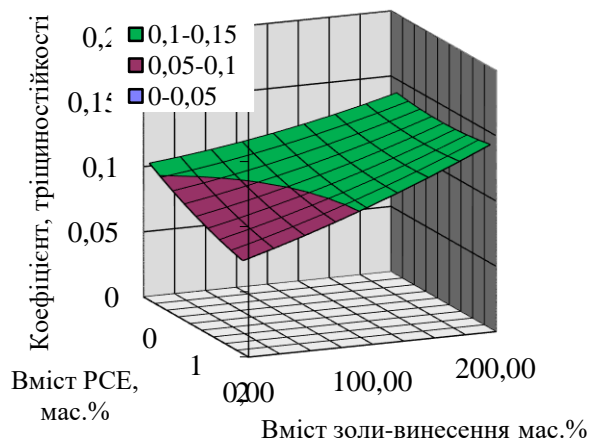
Рисунок 3.27 – Діаграми міцності на стиск (а) та згин (б) цементних систем через 2 доби



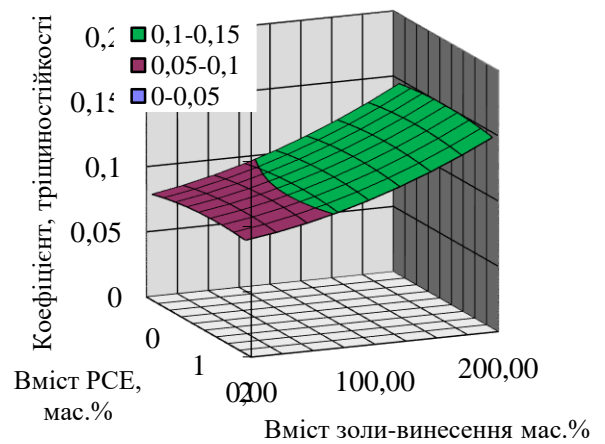
а



б



в



г

Рисунок 3.28 – Діаграми міцності на стиск (а) та згин (б) цементних систем через 28 діб та коефіцієнта тріщиностійкості через 2 (в) та 28 (г) діб

Враховуючи оптимальні співвідношення показників міцностей на стиск, згин та тріщиностійкості обрано оптимальне співвідношення системи цемент: зола-вінесення:пісок, яке становить 1:1:1, та витрату суперпластифікатора полікарбоксилатного типу у кількості 0,75 % від маси в'язучого. Проте введення золи-вінесення внаслідок низької реакційної здатності призводить до зниження міцності як в ранні, так і пізні терміни тверднення, що зумовлює застосування ультрадисперсних активних мінеральних добавок з підвищеною пуцолановою активністю, зокрема мікрокремнезему, метакаоліну. Їх позитивний вплив на мікроструктуру та

властивості матеріалів на основі портландцементу зумовлюється збільшенням в'язкості рідкої фази з підвищенням стійкості до розшарування і покращенням легкоукладальності системи; заповненням порожнин між зернами цементу, зв'язуванням вільної води; прискоренням процесу гідратації, взаємодією $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням гідросилікатів кальцію.

Для підвищення фізико-механічних властивостей матриці ЕСС проведено заміну 10 % золи на високодисперсні мінеральні добавки мікрокремнезем, метакаолін та їх суміш у рівній пропорції. Як свідчать результати випробувань, міцність на згин через 28 діб (рисунок 3.29, а) у композиті, модифікованому комплексом добавок є на 1,5 % та 4,5 % вища, ніж у ЕСС з мікрокремнеземом та метакаоліном відповідно і становить 7,0 МПа. Проте міцність композитів при стиску (рисунок 3.29, б) є найвищою у ЕСС, модифікованому мікрокремнеземом і становить 37,9 та 79,8 МПа через 2 та 28 діб відповідно.

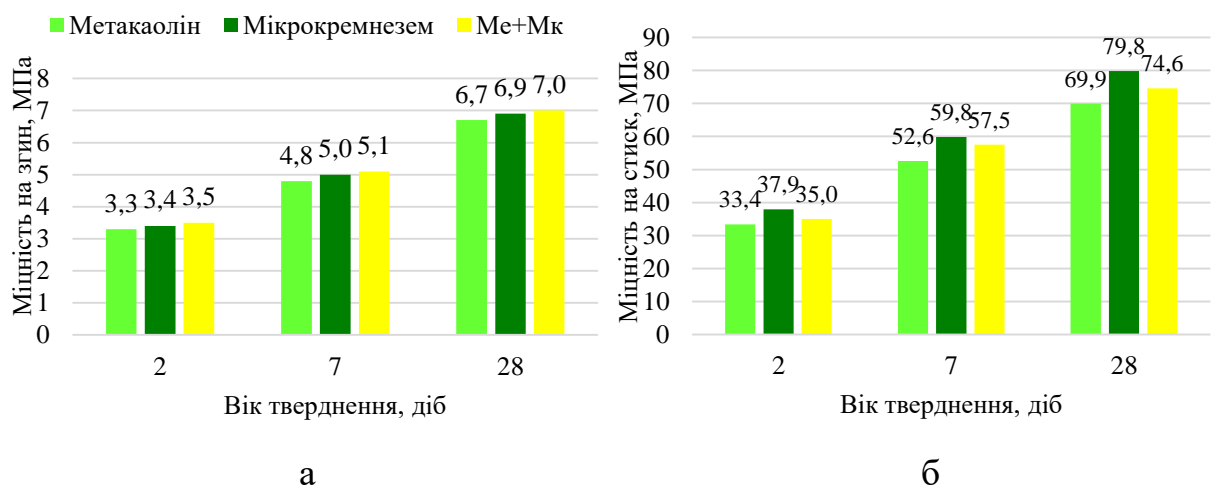
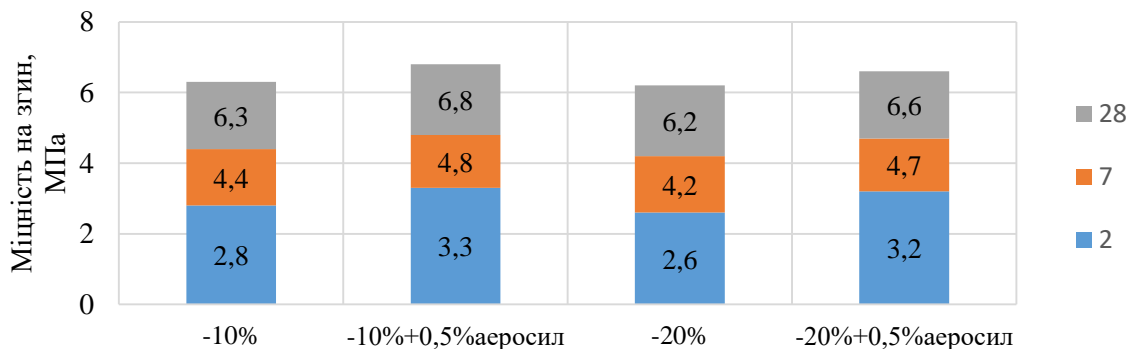


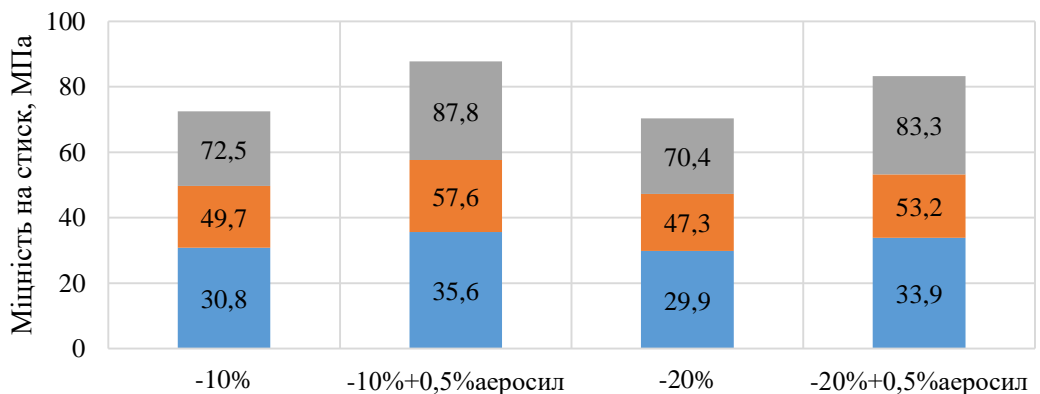
Рисунок 3.29 – Міцність на згин (а) та стиск (б) композитів при заміні 10 % золи-винесення

Зважаючи на переваги однокомпонентної заміни золи-винесення і результати досліджень для подальших досліджень обрано співвідношення компонентів матриці інженерних цементуючих композитів цемент:зола: мікрокремнезем: пісок – 1: 0,9: 0,1: 1.

Для здешевлення матеріалу, а також підвищення деформативних властивостей вирішено раціоналізувати матрицю ЕСС заміною 10 та 20 % портландцементу ПЦ І-500 золою-вінесення. Показано, що заміна 10 та 20 % ПЦ І-500 призводить до зменшення міцності на згин (рисунок 3.30, а) на 10,1 і 11,8 % та міцність при стиску на 9,1 та 11,8 % відповідно. Враховуючи, що розроблений матеріал може слугувати для верхнього шару промислових підлог, що потребує покращених фізико-механічних показників, а також для запобігання корозії та ущільнення «упаковки» матеріалу до даних складів додано 0,5 % аеросилу. Оптимальний склад матриці характеризується відношенням компонентів цемент: зола: мікрокремнезем: пісок – 0,8: 1,1: 0,1: 1, а також 0,75 та 0,5 мас. % РСЕ та аеросилу А-380 відповідно. Міцність при стиску та згині такого композиту через 28 діб становить 83,3 та 6,6 МПа відповідно.



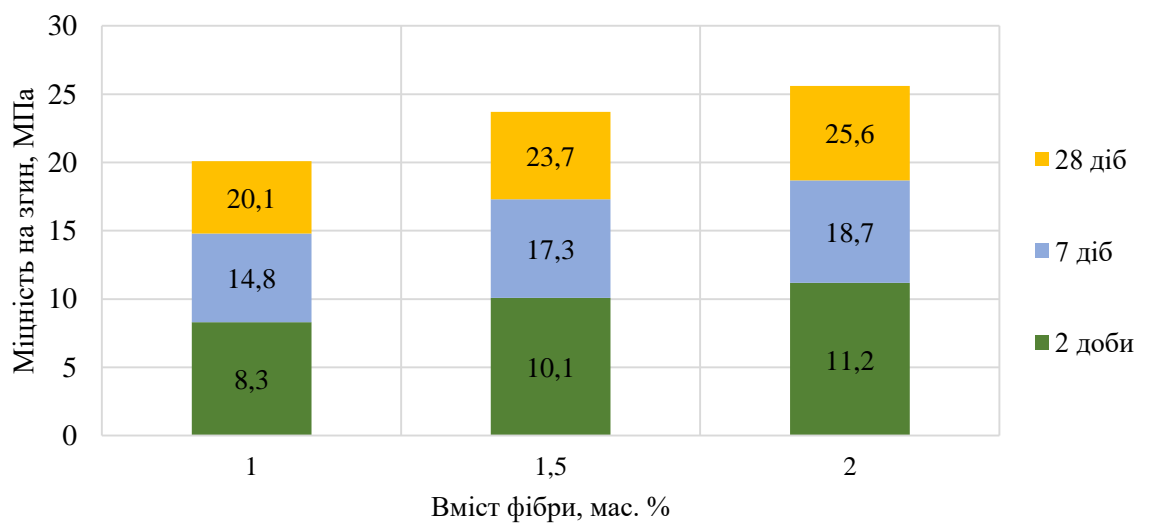
а



б

Рисунок 3.30 – Міцність на згин (а) та стиск (б) матриці ЕСС при зменшення витрати цементу

На останньому етапі до оптимізованого складу дрібнодисперсного бетону вводили поліпропіленову фібру. При дослідженні міцності на згин (рисунок 3.31, а) оптимізованого складу інженерних цементуючих композитів показано, що міцність на згин при сталому розпливі конуса $R_K=160\pm 10$ мм міцність на згин зростає від 20,1 МПа до 25,6 МПа через 28 діб із збільшенням відсотку дисперсних волокон від 1 до 2 %. Проте також із підвищенням вмісту поліпропіленової фібри міцність на стиск (рисунок 3.31, б) падає і становить 86,1 МПа при вмісті фібри 1 % і 76,3 МПа – при 2 %.



а

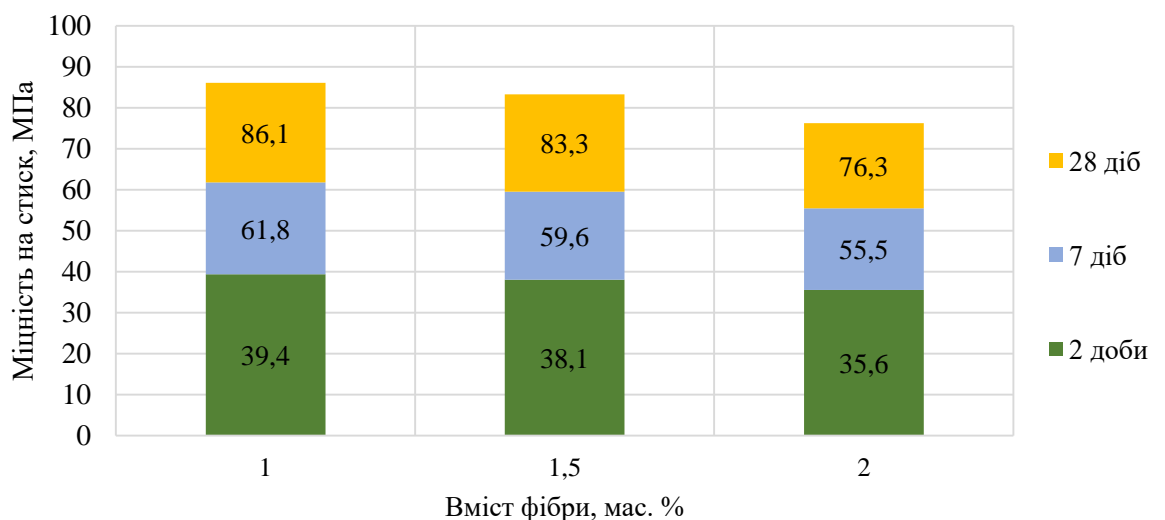
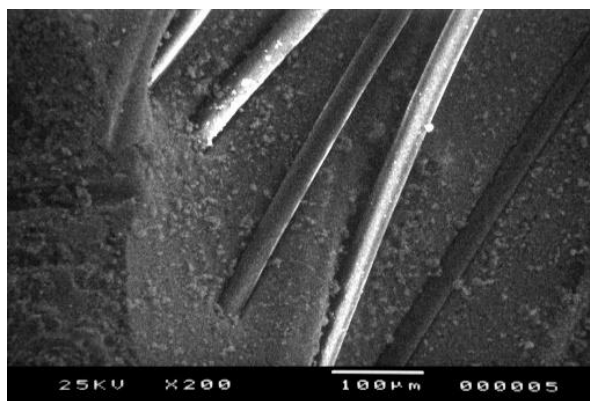
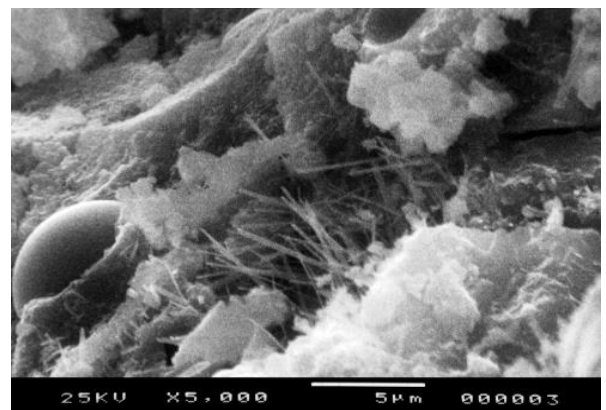


Рисунок 3.31 – Міцність на згин (а) та стиск (б) ЕСС

Досліджено мікроструктуру каменю цементної матриці інженерного цементуючого композиту, модифікованої мікрокремнеземом та полікарбоксилатним суперпластифікатором та армованої поліпропіленовою фіброю. Через 2 доби тверднення мікроструктура є однорідною, дисперсні волокна забезпечують тривимірне армування структури композиту (рисунок 3.32, а.). Щільна мікроструктура каменю із зменшенням кількості пор досягається за рахунок більш повної гідратації та зв'язування $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням гідросилікатів кальцію (рисунок 3.32, б). У цьому випадку спостерігається менша кристалічність продуктів гідратації. Часткова заміна золи-винесення на мікрокремнезем, що забезпечує швидке зв'язування $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням волокнистих продуктів гідратації в неклінкерній частині, зміцнює матрицю на мікро- та нанорівні за рахунок явища «самоармування» [12].



а



б

Рисунок 3.32 – Мікроструктура каменю цементуючої матриці інженерного цементуючого композиту через 2 доби тверднення: x150 (а) та x3000 (б)

Мікроструктура каменю на основі цементуючої матриці інженерних композитів характеризується щільністю та однорідністю, спостерігаються непрореаговані частинки золи-винесення 7-30 мкм (рисунок 3.33). При цьому дефекти та тріщини на мікро- і мезорівні рівні зникають, що зумовлює зростання міцності будівельного композиту.

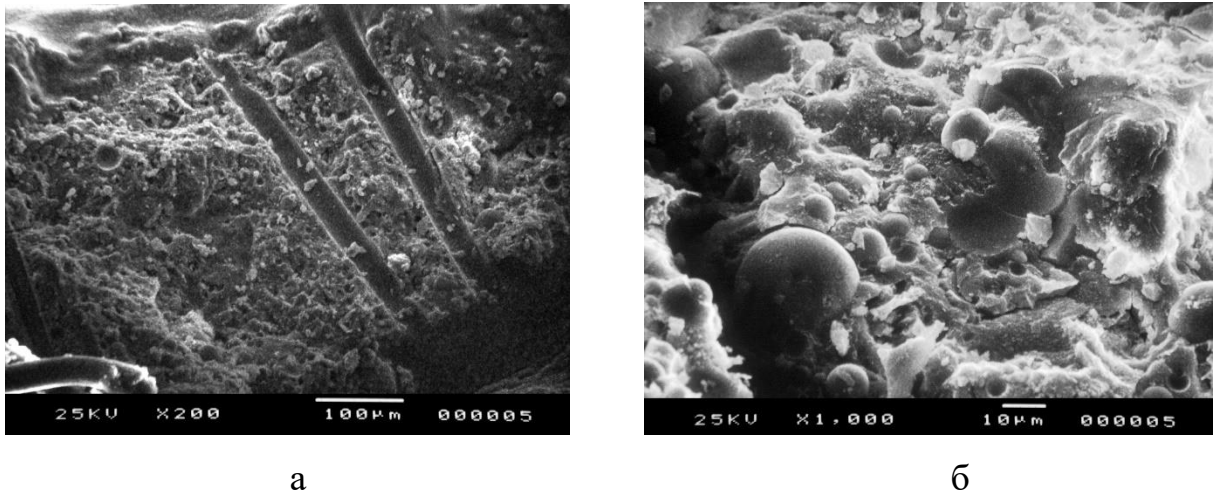


Рисунок 3.33 – Мікроструктура каменю цементуючої матриці інженерного цементуючого композиту через 28 діб тверднення: x150 (а) та x1500 (б)

Проведено оцінку кінетики зміни температури при гідrataції ПЦ І-500 та цементуючих систем на його основі (рисунок 3.34). У процесі гідrataції ПЦ І-500 досягається максимальна температура $96,8^{\circ}\text{C}$.

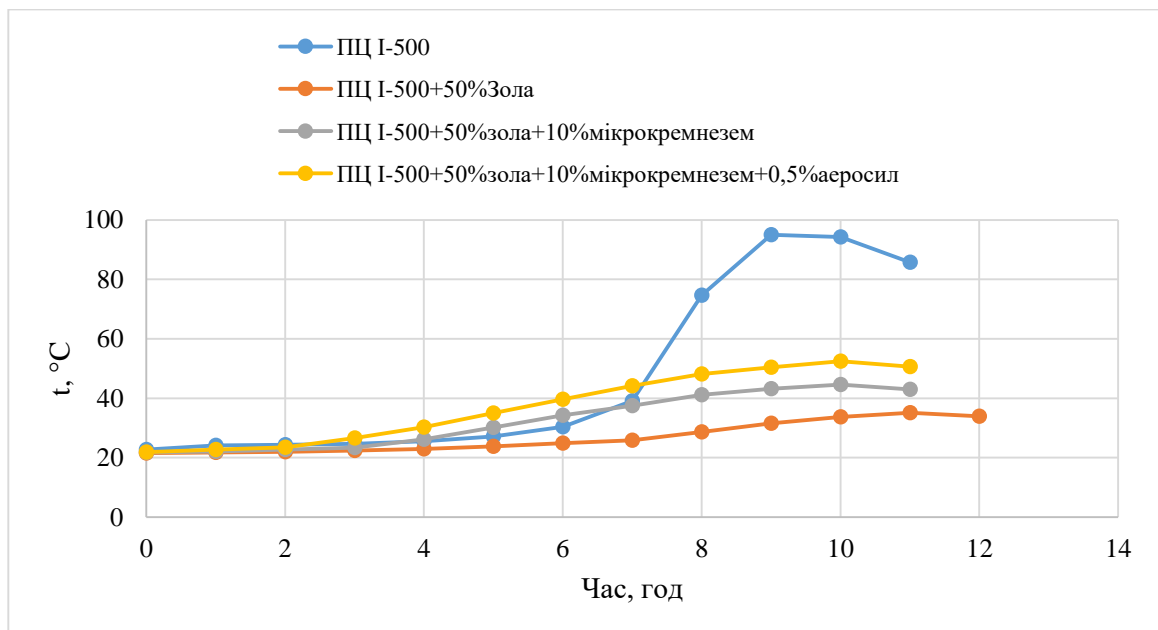


Рисунок 3.34 – Зміна температури при гідrataції модифікованих портландцементів

У результаті сповільнення процесів гідrataції портландцементної системи цемент:зола винесення=1:1 максимум температури досягається через 11 год і складає 35°C . Екстремум температури при гідrataції цементуючої

системи „ПЦ І-500 – зола-винесення-мікрокремнезем - аеросил” (52,1⁰С) спостерігається через 10 год. Помірне тепловиділення цементуючих систем зменшує можливість розвитку деструктивних явищ в бетоні масивних конструкцій.

Для використання розроблених високофункціональних дисперсно-армованих композитів у конструкціях промислових підлог необхідно дослідити їх будівельно-технічні властивості (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 – Будівельно-технічні властивості інженерних цементуючих композитів

Найменування показника	Одиниці вимірювання	Значення показника
Рухливість	мм	160–180
Середня густина	кг/м ³	2350
Пористість, П	%	8,0
Водопоглинання за масою, W _м	%	3,4
Міцність на стиск f _{см,у віці} , діб		
2	МПа	38,1
28		83,3
Міцність на розтяг при згині, f _{сгд}	МПа	23,7
Деформації усадки	мм/м	0,34
Ударна міцність	Дж/см ³	53,5
Стираність	г/см ²	0,26
Коефіцієнт інтенсивності напружень	МН/м ^{0,5}	1,58
Коефіцієнт конструктивної якості (ККЯ)	МПа	35,4

Високофункціональні дисперсно-армовані композити характеризуються середньою густиною 2350 кг/м³, масовим водопоглинанням 3,4 мас.%, пористістю 8,0 %, підвищеною ударною в'язкістю 53,5 Дж/см³,

стираністю $0,26 \text{ г/см}^2$, що забезпечить їх тривалу експлуатацію в конструкціях промислових підлог.

Висновки до розділу

1. Дослідженнями пуцоланових властивостей мінеральних добавок згідно з EN 450-1:2009 показано, що при заміні 25 мас.% портландцементу ПЦ І-500 добавками мікрокремнезему, метакаоліну, золи винесення коефіцієнт пуцолановості за показниками міцності на стиск через 28 діб становить $K_{\text{пуц}28^{\text{ст}}}=0,79$, тоді як для метакаоліну та мікрокремнезему – 0,92 та 1,07 відповідно, через 90 діб - $K_{\text{пуц}90^{\text{ст}}}=0,86; 0,94; 1,14$ для золи-винесення метакаоліну, мікрокремнезему відповідно.

2. Досліджено, що введення пропіленої фібри довжиною 12 мм спричиняє зниження рухливості та збільшення в'язкості модифікованих цементних систем. Так, використання фібри в кількості 3 % спричиняє зниження розпливу від 210 мм до 115 мм. Дисперсно-армовані цементні системи з мінеральними добавками характеризуються збільшенням міцності на стиск на 5-16% та згин 1,4-1,6 рази, порівняно з неармованим каменем.

3. Показано, що коефіцієнт тріщиностійкості дрібнозернистих бетонів, армованих 1 мас.% поліпропіленої фібри, на основі мікрокремнезему через 28 діб тверднення становить 0,171, метакаоліну – 0,178 та золи-винесення – 2,04, що дозволяє класифікувати їх як некрихкі. Підвищені значення коефіцієнтів тріщиностійкості зумовлені зростанням міцності на стиск за рахунок „ефекту мікронаповнювача” та утворення додаткової кількості гідратних фаз в неклінкерній частині цементуючої системи, та зростанням міцності на згин за рахунок дисперсного армування.

4. Дослідженнями впливу технологічних факторів на ударну в'язкість цементної матриці показано, що ударна в'язкість зростає на 8,5–12,9 % при введенні мінеральних добавок. Експериментально підтверджено, що при використанні дисперсної фібри відбувається суттєве зростання ударної

міцності портландцементних систем в 8–10 раз, при цьому значення ударної міцності зразків з поліпропіленою фіброю вищі на 12,7–30,4 % порівняно із зразками, армованими базальтовою фіброю.

5. Комплексом методів фізико-хімічного аналізу встановлено особливості процесів структуроутворення, формування мікроструктури та міцності цементного каменю на основі портландцементу, модифікованого органо-мінеральною добавкою на основі полікарбоксилату, мікрокремнезему та аеросилу. Ступінь гідратації алітової фази клінкерної складової портландцементу ПЦ І-500 через 1 добу тверднення складає 37,1%, а для модифікованого портландцементу – 46,1%. Модифікування ультра- та нанодисперсними мінеральними добавками сприяє прискоренню процесів гідролізу алітової фази з відповідним ущільненням мікроструктури цементного каменю за рахунок утворення гідросилікатів.

5. Розроблені дисперсно-армовані інженерні цементуючі композити характеризуються проектною міцністю на стиск 83,3 МПа, міцністю на розтяг при згині – 23,7 МПа, критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень при нерівноважних випробуваннях $1,58 \text{ МПа/м}^{0,5}$, деформаціями усадки 0,34 мм/м, підвищеною ударною в'язкістю $54,1 \text{ Дж/см}^3$, стираністю $0,26 \text{ г/см}^2$,

Результати досліджень, що викладені у даному розділі, опубліковані в роботах [55, 56, 67, 78-81, 106, 134, 135, 146].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНОЮ УДАРНОЮ В'ЯЗКІСТЮ

4.1. Оптимізація гранулометричного складу компонентів для отримання високоміцного дисперсно-армованого бетону

Проектування складів бетонної суміші проводять, виходячи із забезпечення відповідності технічним вимогам щодо легковкладальності, характеристик бетону, зокрема міцності, довговічності, захисту арматури та закладних деталей від корозії. Склад бетону слід підбирати, виходячи з рівня міцності бетону згідно з ДСТУ Б В.2.7-224 з урахуванням фактичної однорідності бетону. Формування структури бетону і створення матеріалу необхідними властивостями визначається насамперед технологічними факторами – кількістю та якістю заповнювачів, марки та кількості портландцементу, кількості введеної води, наявності добавок. З метою визначення впливу добавок-модифікаторів та заповнювачів на властивості бетону використано рекомендації ДСТУ Б В 2.7-171:2008 щодо еталонного складу бетонної суміші з витратою портландцементу 350 кг на 1 м³ (рисунок 4.1) [36].

Для раціонального проектування складу бетону необхідно підібрати співвідношення крупного та дрібного заповнювачів, щоб досягнути мінімально можливої витрати цементного тіста, яка буде залежати від пустотності заповнювачів, а також від їх внутрішньої поверхні, яка визначається гранулометричним складом і водопотребою заповнювачів. У національному стандарті ДСТУ-Н Б В 2.7-299:2013 запропоновано до апробації європейський досвід одержання заповнювачів для важкого бетону. Проблема несумісності EN 206-1:2000 з нормативними документами України

щодо вимог до розмірів сит розв'язана шляхом перерахунку, що ґрунтується на апроксимації значень проходу матеріалу через сита з отриманням ситових кривих для поліфракційного заповнювача, який містить дрібний та крупний заповнювачі [37]. У зв'язку з цим, у роботі проведено проектування складу високоміцних бетонів з врахуванням нормативних кривих розподілу частинок при заданому максимальному розмірі зерен 20 мм з одержанням співвідношення фракцій заповнювача для забезпечення структури бетону, оптимальної за критерієм міцності.

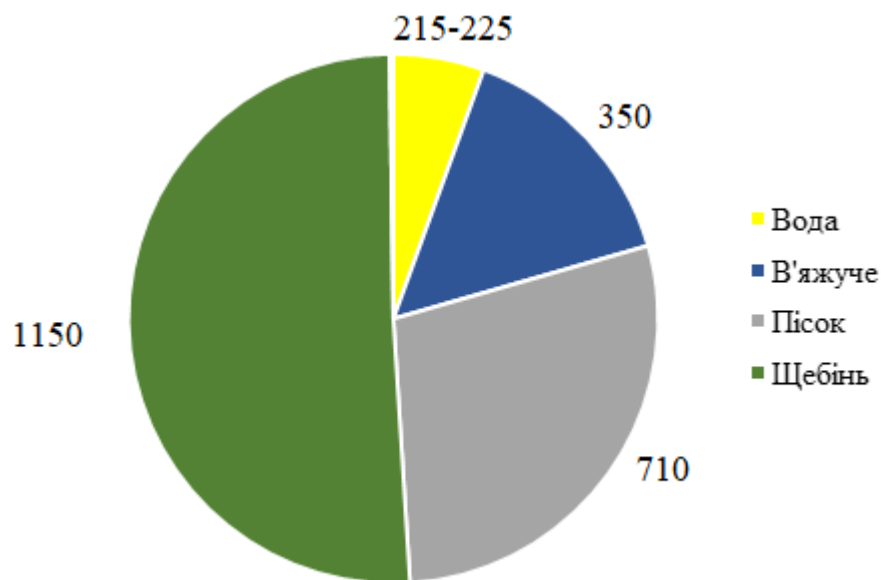


Рисунок 4.1 – Витрата матеріалів на 1 м³ бетонної суміші

З цією метою використано дрібні заповнювачі, що характеризуються різним модулем крупності – піски Жовківського (крива розсіювання 1), Рогатинського (крива розсіювання 2) та Велико-Глібовецького родовищ (крива розсіювання 3) (рисунок 4.2). Криві розсіювання заповнювачів 1, 2 та 3 проходять над кривою А в області дрібного заповнювача 0,315–0,63 мм виходять за межі допустимих для бетонів, що зумовлює підвищену водопотребу для досягнення необхідної легковкладальності бетонних сумішей.

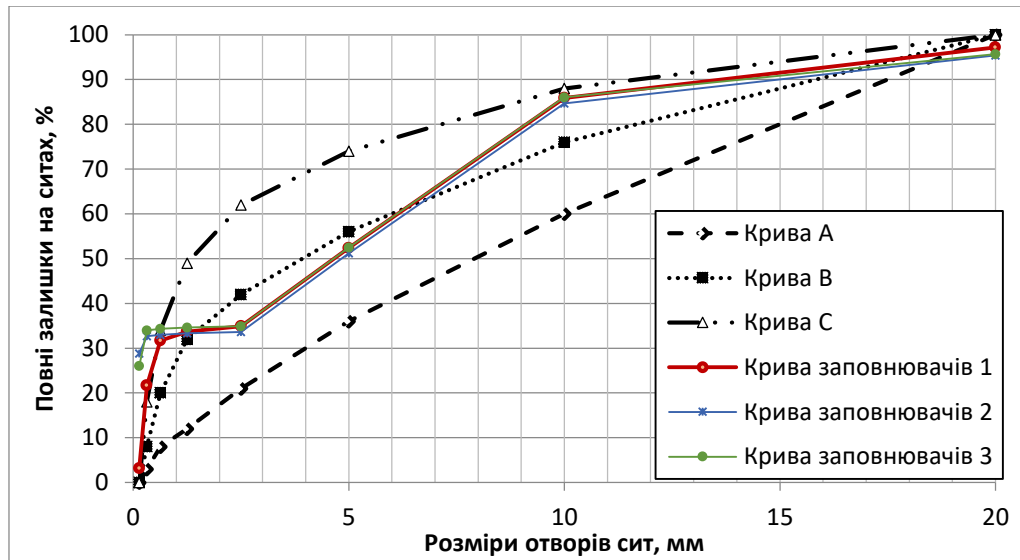


Рисунок 4.2 – Криві розсіювання еталонної суміші заповнювачів з максимальним розміром зерен 20 мм

Тому прийнято рішення зменшити кількість дрібного заповнювача до 650 кг на 1 м³ бетонної суміші. Як видно з рисунка 4.3, криві розсіювання 2 та 3 в області 0,14-0,63 мм знаходяться над кривою А. У той час як крива розсіювання 1, що містить пісок Жовківського родовища, входить в область допустимих значень, проте характеризується підвищеним вмістом дрібних фракцій, що потребує коректування шляхом використання піску з відсіву подрібнення фракції 2-5 мм.

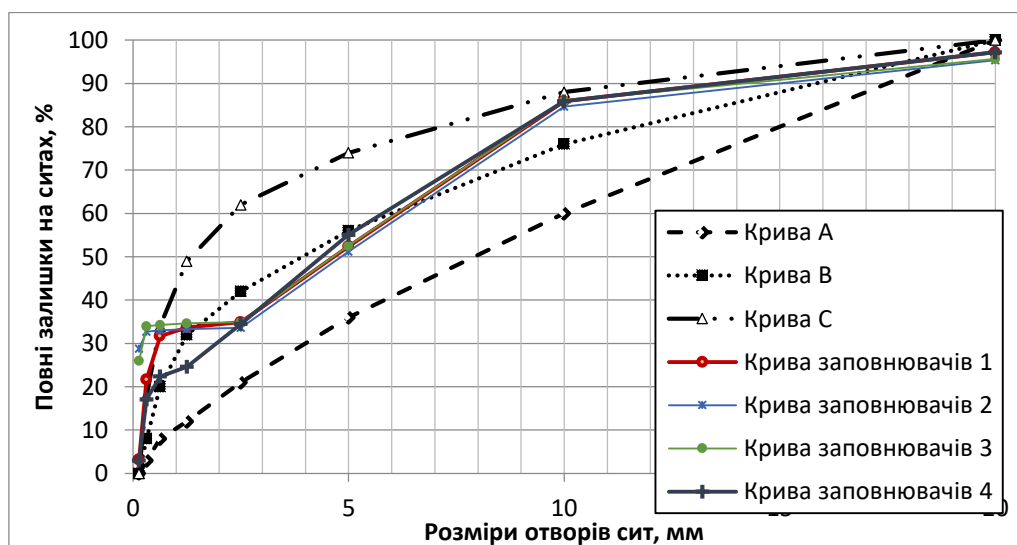


Рисунок 4.3 – Криві розсіювання суміші заповнювачів відкоректованого складу з максимальним розміром зерен 20 мм

Як видно з результатів тестування, заміна 20% піску Жовківського родовища на пісок з відсіву подрібнення (крива розсіювання 4) забезпечила зниження вмісту дрібних фракцій та зміщення кривої розсіювання в область оптимальних складів.

Для вивчення впливу отриманих сумішей заповнювачів на властивості композиту заформовано склади бетонів з витратою портландцементу ПЦ І-500 350 кг/м^3 (таблиця 4.1). Як показали результати випробувань, для забезпечення марки за рухомістю Р4 водоцементне відношення суміші закономірно зростає із збільшенням дисперсності дрібного заповнювача. Так, бетонна суміш на основі жовківського піску характеризується водоцементним відношенням 0,61, при використанні Рогатинського піску цей показник зростає до 0,64. Заміна жовківського піску на пісок з відсіву забезпечує зниження водоцементного відношення до 0,59.

Таблиця 4.1 – Вплив заповнювачів на властивості бетонів

Пісок	В/Ц	ОК, см	ρ , кг/м^3	Міцність при стиску, МПа, у віці, діб		
				2	7	28
Жовківський	0,61	16,0	2400	18,4	30,8	40,3
Рогатинський	0,64	16,0	2370	17,2	24,8	34,8
Велико- Глібовецький	0,63	16,5	2390	17,6	26,4	35,6
Жовківський +відсів	0,59	16,5	2410	20,8	33,2	44,5

Випробування отриманих бетонів на міцність на стиск показали, що використання жовківського піску призводить до зростання міцності на 5-7 % порівняно з бетонами на основі дрібних пісків Рогатинського та Велико-Глібовецького родовищ. Часткова заміна жовківського піску на пісок з відсіву

подрібнення забезпечує зростання міцності бетону на 10-13% у всі терміни тверднення порівняно з бетонами на основі жовківського піску.

Структура бетону є основним визначальним чинником його основних фізико-механічних властивостей. Залежності між структурою бетону та його властивостями є загальними закономірностями для всіх видів бетонів. Забезпечення підвищених експлуатаційних властивостей бетонів для промислових підлог полягає у мінімізації порового простору, що вимагає проектування складу з врахуванням принципів щільного упакування на всіх структурних рівнях бетону.

Проектування мезоструктури та макроструктури високоміцних бетонів для промислових підлог полягає у проектуванні складу з оптимальним розподіленням частинок за розміром [89]. Моделі щільного упакування всіх компонентів високоміцного бетону для промисловості базуються на підборі співвідношень різних за розміром частинок, щоб заповнити міжзерновий простір між більшими елементами меншими. Все ширше впровадження високорухливих бетонних сумішей та сучасні тенденції розвитку екофібробетонів з зниженою витратою портландцементу вимагають використання цементнозаміщуючих відхідних матеріалів (мікро- та ультрадисперсних активних мінеральних добавок, мікронаповнювачів), що визначає проектування таких композитів за неперервними моделями упакування, так званих «ідеальних кривих» розсіювання [94, 130]. Використовуючи співвідношення зерен за ідеальною кривою, можна отримати високорухомі бетонні суміші з вищою стійкістю до розшаровування. Оптимізований склад частинок за розміром в діапазоні 0,1-1000 мкм описується удосконаленою моделлю на основі кривої Фуллера [130]. Беручи до уваги важливість щільності упакування високодисперсних частинок, що входять до складу бетонних сумішей, запропоновано емпіричну інтерпретацію кривої оптимального упакування частинок. Така модифікована крива (крива Функа) для сумішей з використанням високодисперсних добавок ($d_{\max} \leq 600$ мкм) описується рівнянням [94]:

$$y_i = \left(\frac{d_i^n - d_{Min}^n}{d_{Max}^n - d_{Min}^n} \right) 100\% \quad (4.1)$$

де y_i – вміст i -тої фракції, %;

d_i – діаметр i -тої фракції, мкм;

d_{max} – діаметр найбільшої частинки, мкм;

d_{min} – діаметр найменшої частинки, мкм;

n – константа ($n = 0,37$).

Проектування складу цементуючої системи проводили з метою забезпечення оптимального упакування частинок та наближення кривої гранулометричного розподілення частинок суміші до кривої Функа. На рисунку 4.4 представлені криві розподілення суміші цементуючої матриці високоміцного бетону з різною кількістю ультрадисперсних мінеральних добавок. Слід відзначити, що використання мінеральних добавок, що містять значну кількість ультрадисперсних частинок дає змогу найбільше наблизити криву розподілення портландцементу із 5 мас. % мікрокремнезему та 0,5 % аеросилу до кривої Функа.

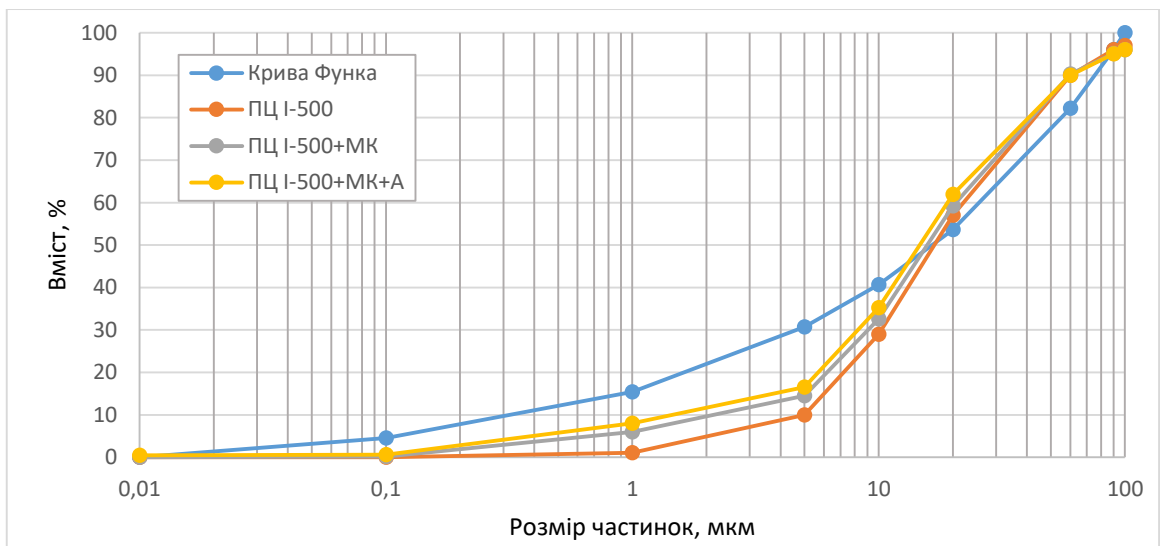


Рисунок 4.4 – Криві гранулометричного розподілення цементуючої матриці високоміцного бетону

Модифікований портландцемент та оптимізований склад заповнювачів застосовано для проектування складів високоміцних бетонів. Крім цього, для модифікування властивостей бетонних сумішей високоміцних бетонів обов'язкове використання пластифікуючих/водоредукуючих добавок [37]. У роботі використано добавку пластифікуючої групи на основі полікарбоксилатів Glenium ACE430 (PCE). Як видно з таблиці 4.2, добавка Glenium ACE430 характеризується водоредукуючим ефектом $\Delta В/Ц=15,3\%$ при одержанні рухомості бетонних сумішей для марки Р4.

Таблиця 4.2 – Результати випробувань модифікованих бетонів

Вид та кількість добавок	В/Ц	ОК, см	ρ , кг/м ³	Міцність при стиску, МПа, у віці, діб		
				2	7	28
-	0,49	16,5	2410	20,8	33,2	44,5
1 мас. % PCE	0,50	16,5	2395	29,9	44,5	55,4
1 мас. % PCE + 5 мас. %МК+ 0,5 мас.%А	0,52	16,0	2410	42,2	63,4	89,3

Модифікування бетонних сумішей полікарбоксилатним суперпластифікатором дозволяє підвищити міцність через 2 доби на 43,4%, у проектному віці – на 24,4% із досягненням класу за міцністю С32/40. При комплексному модифікуванні з використанням суперпластифікатора, мікрокремнезему та аеросилу забезпечується досягнення бетоном міцності 89,3 МПа, що відповідає класу за міцністю С55/67 та дозволяє класифікувати отриманий бетон як високоміцний.

Отже, комплексний підхід до проектування складу бетонів, що включає керування на всіх структурних рівнях і полягає в оптимізації гранулометричного складу заповнювачів на мезо- та макрорівні, а також цементуючої матриці на мікрорівні з застосуванням полікарбоксилатного

суперпластифікатора та ультрадисперсних мінеральних добавок, забезпечує отримання високоміцних бетонів. З метою розширення рецептурних складів та підбору кількості поліпропіленової фібри слід провести дослідження з використанням математичного планування експерименту.

4.2. Оптимізація складів високоміцних бетонів, армованих дисперсними волокнами

Ефективність проектування бетонів з покращеними показниками якості, які забезпечують довговічність бетонних виробів та конструкцій, досягається за рахунок застосування математичних моделей, що враховують і описують реологію бетонних сумішей, оптимальний розподіл заповнювачів у структурі матеріалу, а також апроксимаційних статистичних залежностей, що оцінюють вплив мікронаповнювачів на експлуатаційні характеристики будівельних матеріалів. При проектуванні складу високоміцного бетону, армованого поліпропіленовою фіброю, виконано експериментально-статистичне моделювання з вирішенням багатопараметричних задач оптимізації з позиції адекватності властивостей критеріям функціональності. При цьому використаний один з методів статичної математичної обробки результатів – метод ортогонально-центрального композиційного планування (ОЦКП) [8, 25]. Суть планування експериментів з використанням математичного методу полягає у встановленні математичної залежності між заданими властивостями і складом чи витратою матеріалів, вирішенні завдань з оцінки ступеня впливу вибраних факторів і встановлення їх взаємодії; пошуку оптимальних умов протікання процесів [41]. Метод ОЦКП дає можливість отримати математичний опис процесу у вигляді рівняння регресії (4.2):

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_{12}X_1X_2+b_{11}X_1^2+b_{22}X_2^2, \quad (4.2)$$

Факторами оптимізації високоміцного дисперсно-армованого бетону вибрано рецептурні – кількість портландцементу ПЦ І-500 ($X_1=300; 350; 400$ кг на 1 м^3 бетонної суміші) та витрату поліпропіленової фібри ($X_2=0; 1,0; 2,0$ %) при стабілізованих значеннях витрати суперпластифікатора полікарбоксилатного типу (1,5 мас.%), мікрокремнезему (5,0 мас.%), аеросилу (0,5 мас.%). Характеристика плану та рівні варіювання факторів наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Інтервали варіації та значення кроків варіювання факторів впливу

Характеристика	Фактори впливу	
	Витрата цементу ПЦ І-500 на 1 м^3 (X_1), кг	Кількість фібри (X_2), мас. %
Нижній рівень «-1»	300	0
Основний рівень «0»	350	1,0
Верхній рівень «+1»	400	2,0

При зміні рецептурних рівнів вибраних факторів забезпечували сталу марку за легкоукладальністю бетонних сумішей – Р4 (ОК=16-20 см) при цьому водовміст бетонної суміші змінювали (контрольний параметр Y_1). Крім цього, контрольними параметрами оптимізації при моделюванні обрано міцність при стиску бетону через 2, 7 та 28 діб тверднення, питому міцність f_{cm2}/f_{cm28} для оцінки швидкості тверднення – функції відгуку Y_2, Y_3, Y_4 та Y_5 відповідно, а також міцність на розтяг при згині через 28 діб (Y_6), коефіцієнт крихкості f_{cb28}/f_{cm28} (Y_7) та економічний показник – питома витрата портландцементу на одиницю проектної міцності $C_{пит}$ (Y_8). Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

№	Умовні фактори		Натуральні фактори		В/Ціст	Границя міцності на стиск, МПа, через, діб			Границя міцності на згин через 28 діб, f_{ctd28} , МПа	f_{cm2}/f_{cm28}	f_{ctd28}/f_{cm28}	$\sigma_{пит}$, кг/МПа
			Витрата			2	7	28				
	X_1	X_2	Цемент, кг	Фібра, мас.%		Y_1	Y_2	Y_3				
1	-1	-1	300	0	0,36	35,8	52,6	68,3	5,7	0,52	0,08	4,4
2	0	-1	350	0	0,35	42,2	63,4	89,3	6,9	0,47	0,08	3,9
3	+1	-1	400	0	0,36	49,6	71,8	99,4	7,8	0,50	0,08	4,0
4	-1	0	300	1,0	0,40	32,2	45,3	61,7	7,4	0,52	0,12	4,9
5	0	0	350	1,0	0,39	44,8	71,2	87,1	9,8	0,54	0,11	4,0
6	+1	0	400	1,0	0,40	48,2	66,2	96,8	11,2	0,50	0,12	4,1
7	-1	+1	300	2,0	0,47	26,4	37,8	52,1	8,6	0,51	0,17	5,8
8	0	+1	350	2,0	0,46	30,8	44,5	75,5	10,5	0,41	0,14	4,6
9	+1	+1	400	2,0	0,47	42,1	50,8	84,1	12,4	0,50	0,15	4,8

Для пошуку значень змінних факторів X_1 (витрата портландцементу) і X_2 (витрата поліпропіленової фібри), при яких досліджувані функції приймають максимальні значення, використали дисоціативно-кроковий метод оптимізації. Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії проведено з використанням матричного підходу до регресивного аналізу. Незначимі коефіцієнти прирівнюють до нуля, а відповідні члени виключають з рівнянь регресії. Розрахунками критерія Фішера встановлено, що отримані рівняння регресії адекватно описують експериментальні дані.

У результаті обробки експериментальних даних методом найменших квадратів одержані рівняння регресії (4.3–4.10) водоцементного відношення (Y_1), міцності на стиск через 2, 7 та 28 діб (Y_2 – Y_4), оцінки питомої міцності в нормальних умовах тверднення (Y_5), міцності на згин (Y_6), коефіцієнта крихкості (Y_7), питомої витрати портландцементу (Y_8):

$$Y_1(B/C)=0,39+0,06X_2+0,01X_1^2+0,02X_2^2 \quad (4.3)$$

$$Y_2(f_{cm2})=41,9+7,58X_1-4,72X_2-0,22X_1^2-3,92X_2^2+0,45X_1X_2 \quad (4.4)$$

$$Y_3(f_{cm7})=64,6+8,85X_1-9,12X_2-5,62X_1^2-7,42X_2^2+1,55X_1X_2 \quad (4.5)$$

$$Y_4(f_{cm28})=86,5+16,37X_1-7,55X_2-6,9X_1^2-3,75X_2^2+0,23X_1X_2 \quad (4.6)$$

$$Y_5(f_{cm2}/f_{cm28})=0,50-0,01X_2+0,03X_1^2-0,04X_2^2 \quad (4.7)$$

$$Y_6(f_{ctd28})=9,61+1,61X_1+1,85X_2-0,22X_1^2-0,82X_2^2+0,43X_1X_2 \quad (4.8)$$

$$Y_7(f_{ctd28}/f_{cm28})=0,11-0,01X_1-0,04X_2+0,01X_1^2-0,01X_1X_2 \quad (4.9)$$

$$Y_8(C_{пит})=4,0-0,37X_1+0,48X_2+0,5X_1^2+0,25X_2^2-0,15X_1X_2 \quad (4.10)$$

Аналіз значень коефіцієнтів рівняння регресії водоцементного відношення свідчить про негативний вплив на нього змінних факторів, при чому вплив витрати портландцементу є суттєвішим порівняно із зростанням вмісту фібри. Використання армувальних елементів спричиняє деяке

зниження рухливості бетонних сумішей, що пов'язано із структуруванням суміші волокнами, зростанням поверхні розділу фаз та необхідністю підвищення кількості води для її змочування, збільшенням внутрішнього тертя, обмеженим переміщенням компонентів матриці в присутності фібри.

Збільшення вмісту портландцементу здійснює позитивний вплив на міцність при стиску у всі терміни тверднення. Як видно з рівнянь регресії, сумісний вплив факторів на міцність є позитивним, про що свідчать додатні значення коефіцієнтів b_{12} . Від'ємні значення коефіцієнта b_1 свідчать про негативний вплив поліпропіленової фібри на міцність бетону на стиск через 2, 7 та 28 діб тверднення.

За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні поверхні та діаграми, що адекватно описують залежність водопотреби, міцності при стиску через 2, 7 та 28 діб тверднення високоміцного бетону від змінних параметрів (рисунки 4.5–4.6).

Для товарних бетонних сумішей, які транспортуються на місце вкладання промислової підлоги, важливе значення має забезпечення однорідності та стійкості до сегрегації при приготуванні, транспортуванні та вкладанні, що характеризується показниками розшаровуваності – водо- та розчиновідділення. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-114-2002 показник розчиновідділення характеризує зв'язність бетонної суміші при динамічній дії після віброущільнення. Для високорухливих сумішей (марка за легкокладальністю Р4) водовідділення становить 0,2%, а розчиновідділення – 0,8%, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-96-2000 та свідчить про їх однорідність та дозволяє отримати суміші без ознак розшаровуваності. Експериментально встановлено, що вміст повітря у свіжоприготованій бетонній суміші, модифікованій комплексним органо-мінеральним модифікатором, та армованій дисперсними волокнами, становить 2,0%.

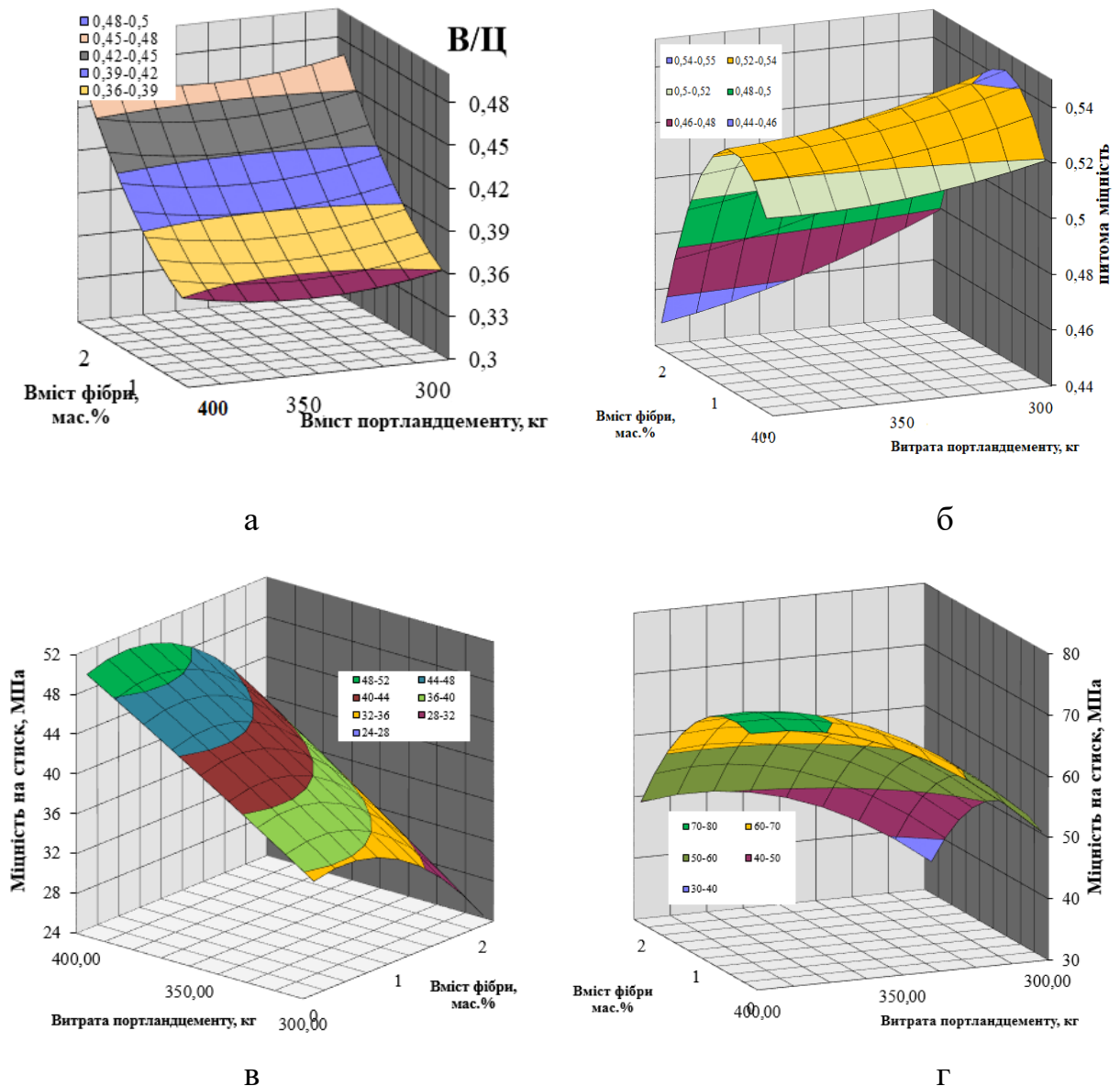


Рисунок 4.5 – Ізопараметричні поверхні водоцементного відношення модифікованих бетонних сумішей (а) та питомої міцності (б), границі міцності на стиск бетону відповідно через 2 (в) та 7 (г) діб

Використання комплексного органо-мінерального модифікатора на основі мікрокремнезему, аеросилу та полікарбоксилатного пластифікатора у поєднанні з поліпропіленовими волокнами на рівні 1 мас.% забезпечує отримання фібробетонів класу за міцністю С35/45, С55/67 та С60/75 при витраті портландцементу 300, 350 та 400 кг на 1 м³ бетонної суміші відповідно. За показниками середньої міцності на стиск при витраті портландцементу 350

та 400 кг на 1 м³ бетонної суміші розроблені дисперсно-армовані бетони відповідають вимогам щодо високоміцних.

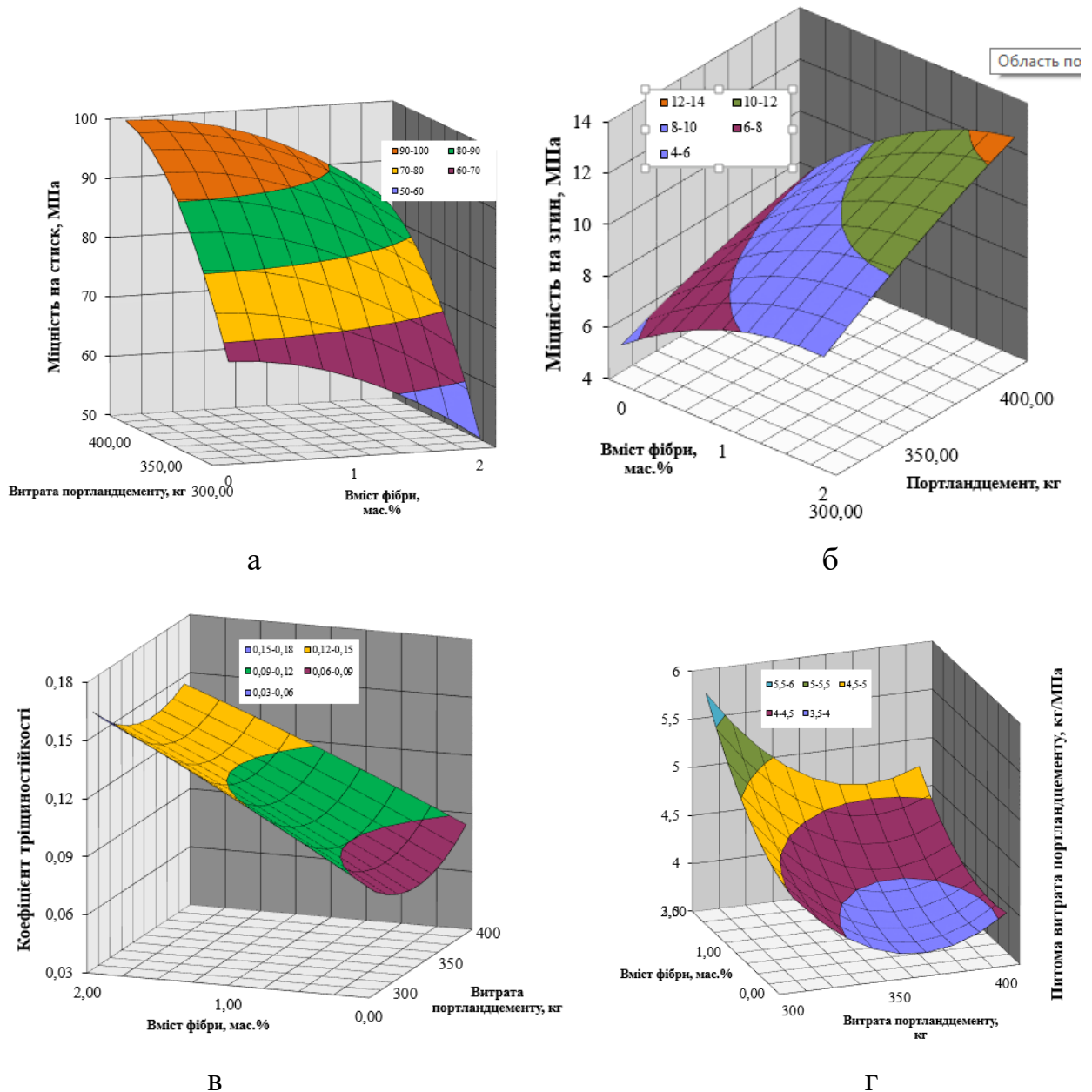


Рисунок 4.6 – Ізопараметричні поверхні міцності на стиск (а) та згин (б) високоміцного бетону через 28 діб тверднення, коефіцієнта тріщиностійкості (в) та питомої витрати портландцементу (г)

За показниками питомої міцності $f_{cm2}/f_{cm28} = 0,5-0,51$ розроблені дисперсно-армовані бетони відносяться до бетонів з швидким наростанням міцності. Модифіковані високоміцні бетони, армовані поліпропіленою

фіброю, характеризуються міцністю на розтяг при згині 9,8-11,2 МПа, міцність на згин бетонів зростає на 42–50 % при збільшенні ступеня дисперсного армування до 2,0 %, низьким показником питомої витрати в'язучого на одиницю проектної міцності – 4,0-4,5 кг/МПа. Умовний коефіцієнт тріщиностійкості високоміцних фібробетонів становить 0,11-0,12. Для забезпечення надійної роботи високоміцних бетонів у конструкціях промислових підлог необхідно дослідити їх будівельно-технічні та експлуатаційні властивості.

4.3. Дослідження будівельно-технічних властивостей високоміцних дисперсно-армованих бетонів

4.3.1. Пористість, водопоглинання та водонепроникність. Система макро- та мікропор є одним з основних елементів структури бетону і значною мірою впливає на формування його основних фізико-механічних властивостей [10, 24]. Пористість визначає появу у структурі велику поверхню розділу фаз – твердої (цементна матриця), газоподібної (якщо матеріал знаходиться в сухому стані) та рідкої (якщо матеріал насичений водою, розчинами та ін.). Взаємодія на розвинутій поверхні з газовим чи рідким середовищем зумовлює зміни об'ємних деформацій цементного каменю, що може викликати внутрішні напруження та призводити до появи нових структурних дефектів (тріщини). Крім того, пори як фаза з мінімальним модулем пружності, знижують пружні властивості бетону, його фізико-механічні властивості, враховуючи стійкість до динамічних навантажень.

Визначення пористості бетонів проводили за ступенем водонасичення в часі. За експериментальними даними одержано криві водопоглинання зразків контрольного, високоміцного бетону та фібробетону в часі (рисунок 4.7), які мають пологий характер експоненціального типу. При цьому бетон

контрольного складу характеризується більшою швидкістю водонасичення в початковий період порівняно з модифікованими бетонами.

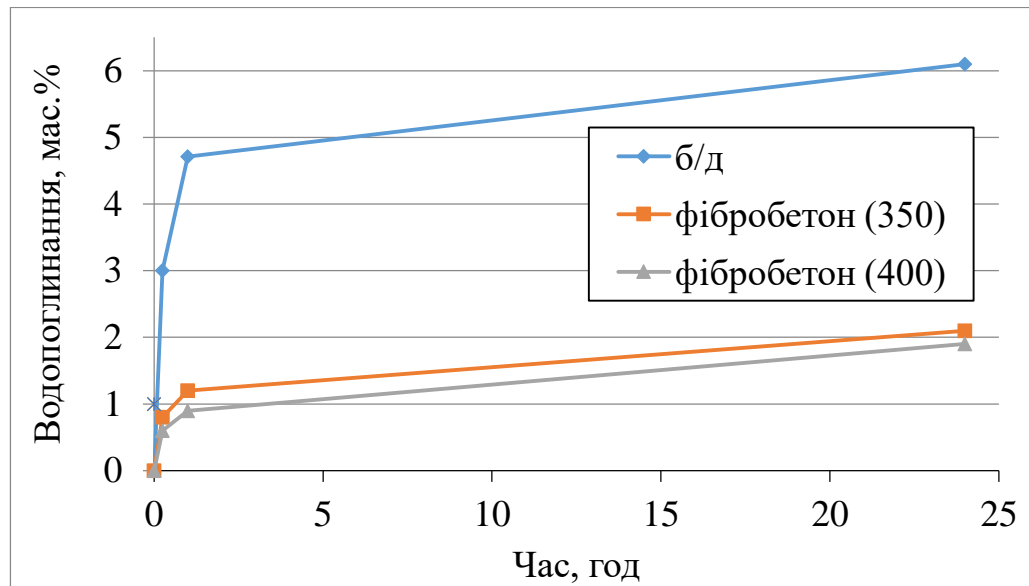


Рисунок 4.7 – Кінетика водопоглинання високоміцних дисперсно-армованих бетонів

Як видно з таблиці 4.5, модифікування бетону органо–мінеральною добавкою дозволяє регулювати параметри як інтегральної, так і диференціальної пористості (показники середнього розміру пор – λ_1 та однорідності розмірів пор α). Так, об’ємне водопоглинання модифікованих фібробетонів, що характеризує їх відкриту капілярну пористість (W_o), знижується в 6,2 раз, порівняно з контрольним.

Аналіз диференціальних показників пористості показав, що показник однорідності пор за розміром контрольного бетону становить 0,55 і є вищим, ніж у модифікованих дисперсно-армованих композитів. Проте розмір цих пор зміщується в область макрокапілярних, про що свідчить показник середнього розміру пор 2,62 та низький показник мікропористості ($K_m=0,47$). У той час, як показник середнього розміру пор модифікованих фібробетонів з витратою портландцементу 350 та 400 кг на 1 м^3 зменшується до 0,53 та 0,50 відповідно. Кількість макропор у модифікованих високоміцних фібробетонів знижується,

про що свідчать підвищені показники мікропористості 0,77 та 0,85 відповідно для фібробетону класу за міцністю C50/67 та C60/75.

Таблиця 4.5 – Основні параметри пористої структури високоміцних дисперсно-армованих бетонів

Позначення бетону	Водопоглинання, %			Коефіцієнт мікропористості, K_m	Показник середнього розміру пор, λ_1	Показник однорідності пор за розмірами, α
	масове, W_m	об'ємне, W_o	рівно-важне, W_p			
б/д	6,1	12,4	2,54	0,47	2,62	0,55
Фібробетон (350)	2,1	5,0	0,74	0,77	0,53	0,41
Фібробетон (400)	1,9	4,6	0,65	0,85	0,50	0,45

Середня густина розроблених фібробетонів у сухому стані становить 2430-2450 кг/м³, у стані природної вологості – 2450-2460 кг/м³, у водонасиченому стані – 2490-2500 кг/м³, що вказує на їх високу щільність та низьку проникність.

Бетон є капілярно-пористим матеріалом. Капілярними називають пори з такими умовними радіусами, при яких їх капілярний потенціал (потенційна енергія поля капілярних сил, віднесених до одиниці маси рідини) значно більша потенціалу дії сили тяжіння. Капілярне всмоктування характеризується висотою підняття води в капілярах матеріалу, об'ємом поглинутої води та інтенсивністю всмоктування. При неякісному вкладанні промислової підлоги, недостатній гідроізоляції може спостерігатися капілярне підсмоктування води з ґрунту або поглинатися волога, наявність якої пов'язана з технологічними процесами (наприклад автотомийки).

При насиченні матеріалу водою істотно змінюються його властивості: збільшується щільність, відбуваються деякі структурні зміни в матеріалі (розчинення продуктів гідратації), що викликають появу в ньому внутрішніх напружень, що, як правило, призводить до зниження міцності та довговічності матеріалу.

Капілярність бетону визначали за методикою, описаною в [4], шляхом часткового занурення зразків-кубів бетону у воду та визначення висоти піднімання води протягом 2,5 год (рисунок 4.8). Показники сорбційності для розроблених високоміцних фібробетонів становлять 0,042 та 0,030 см·год^{0,5} відповідно для бетону класу за міцністю С55/67 та С60/75. Згідно з класифікацією за цією методикою розроблені бетони відносяться до класу дуже високої стійкості в агресивному середовищі ($S < 0,05$ см·год^{0,5}).

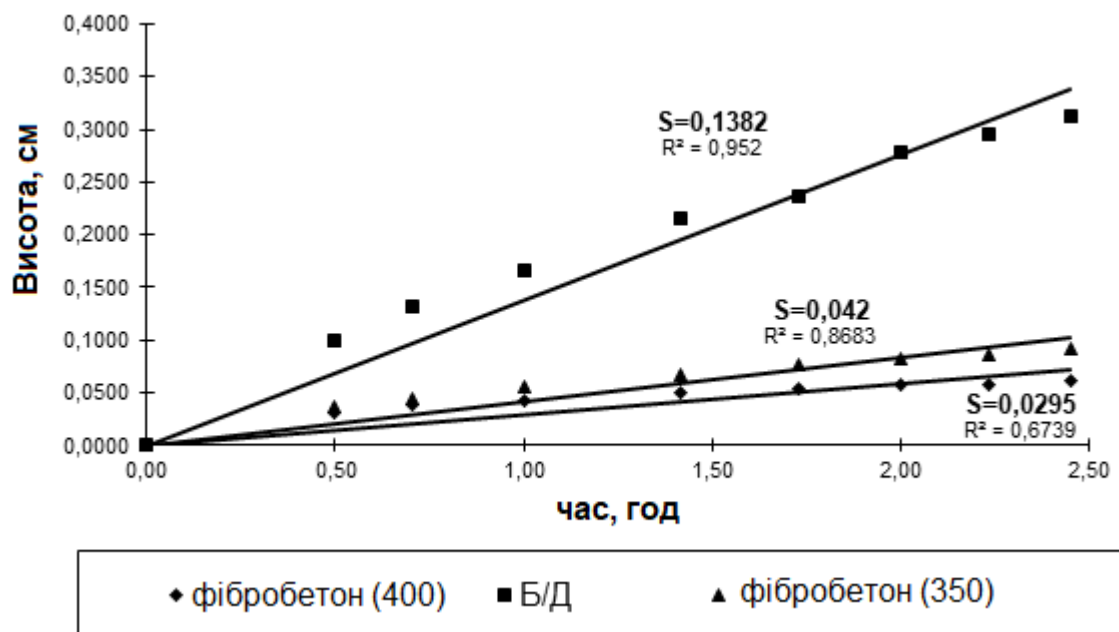


Рисунок 4.8 – Капілярність високоміцних фібробетонів

Наявність відкритої капілярної пористості, що зумовлює капілярну адсорбцію, визначали також за методикою, яка передбачає визначення висоти піднімання води протягом тижня [115]. З даних рисунка 4.9 видно, що середнє капілярне зростання та водонасичення високоміцного фібробетону з витратою портландцементу 350 кг класу за міцністю на стиск С 50/67 перевищує

капілярне підняття води фібробетону класу за міцністю С 60/75. За показниками капілярного підняття фібробетонів розраховано індекс сорбції, який становить 0,52 та 0,37 мм·год^{0,5}, що задовольняє критерій довговічності згідно з цією методикою ($SI < 3 \text{ мм} \cdot \text{год}^{0,5}$).

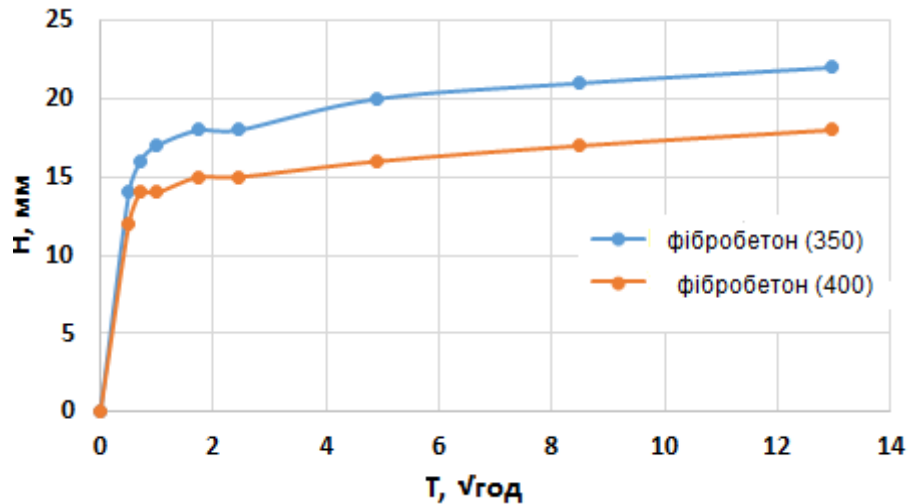


Рисунок 4.9 – Капілярне підсмоктування високоміцних дисперсно-армованих бетонів у часі

Взаємодія ультрадисперсних добавок з гідросилікатом кальцію з утворенням гідросилікатів кальцію в міжзерновому просторі та зниження водовмісту системи при введенні полікарбоксилатного суперпластифікатора призводять до ущільнення структури бетону, внаслідок цього розроблені бетони характеризуються підвищеною однорідністю, меншою дефектністю структури особливо поверхневого шару за рахунок зменшення кількості та розміру пор, які є ініціаторами росту напружень в матеріалі, що прогнозовано забезпечить підвищення ударної в'язкості композитів.

Марка за водонепроникністю розроблених високоміцних бетонів та фібробетонів, визначена за повітропроникністю, становить W20.

4.3.2. Ударна в'язкість. Поверхня промислових підлог зазнає динамічного впливу від рухомих засобів, а також падаючих вантажів, що

вимагає застосування бетонів з підвищеною ударною в'язкістю. Показники ударної в'язкості, що характеризується питомою енергією удару до появи першої видимої тріщини та повного руйнування, визначено згідно з рекомендаціями комітету АСІ 544 шляхом падіння вантажу 1 кг з висоти 1 м (рисунок 4.10). Номери складів відповідають наведеним в таблиці 4.2. Показано, що при зростанні витрати портландцементу ударна в'язкість бетонів при появі першої тріщини через 2 доби змінюється несуттєво – від 0,31 до 0,48 Дж/см³ при витраті портландцементу 300-400 кг/м³. Суттєве зростання ударної в'язкості відбувається при дисперсному армуванні структури бетону поліпропіленою фіброю, слід відзначити, що при цьому зростає також енергія повного руйнування зразка. Так, через 2 доби тверднення питома енергія удару до появи першої видимої тріщини зростає до 2,5 Дж/см³ для бетону з витратою портландцементу 350 кг, армованого 1% поліпропіленою фіброю, а повного руйнування – 4,5 Дж/см³, що перевищує відповідні показники неармованого бетону в 5,0 та 6,7 рази відповідно.

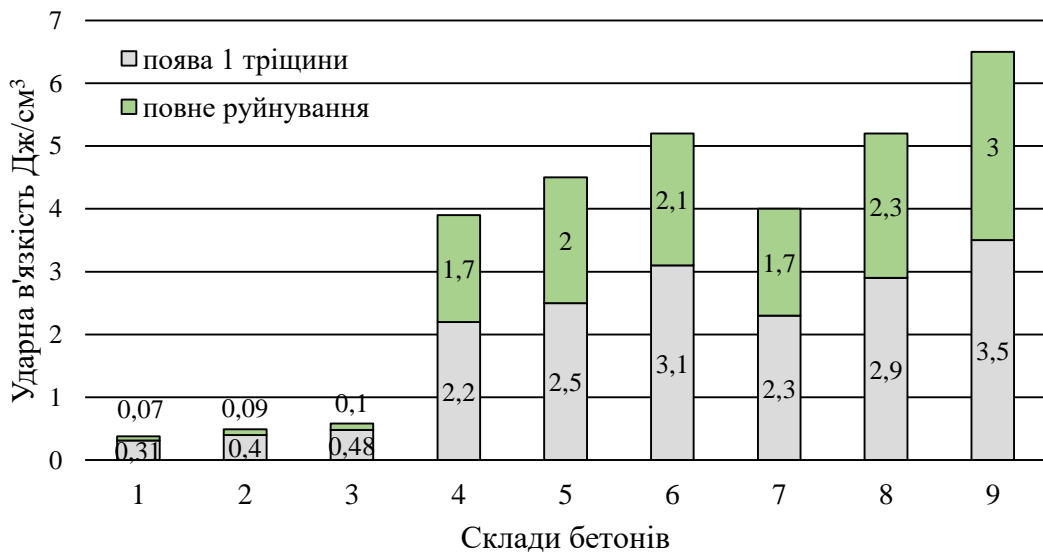


Рисунок 4.10 – Ударна в'язкість бетонів через 2 доби

При збільшенні об'ємної частки дисперсних волокон підвищується енергія удару як на етапі появи першої тріщини, так і на етапі повної відмови матеріалу. Це підтверджує, що поліпропіленові волокна діють як ефективний

спосіб гальмування тріщин у випадку фібробетонів при ударному навантаженні. Так, введення поліпропіленової фібри в кількості 1,0 % та 2,0 % до складу модифікованого бетону з витратою портландцементу 350 кг енергія удару, необхідна для забезпечення видимої першої тріщини, через 7 діб тверднення зростає у 5,0 рази та 4,7 рази, а енергія, необхідна на повне руйнування зразка бетону збільшилась у 4,4 та 4,0 рази відповідно порівняно із зразком високоміцного бетону без фібри (рисунок 4.11).

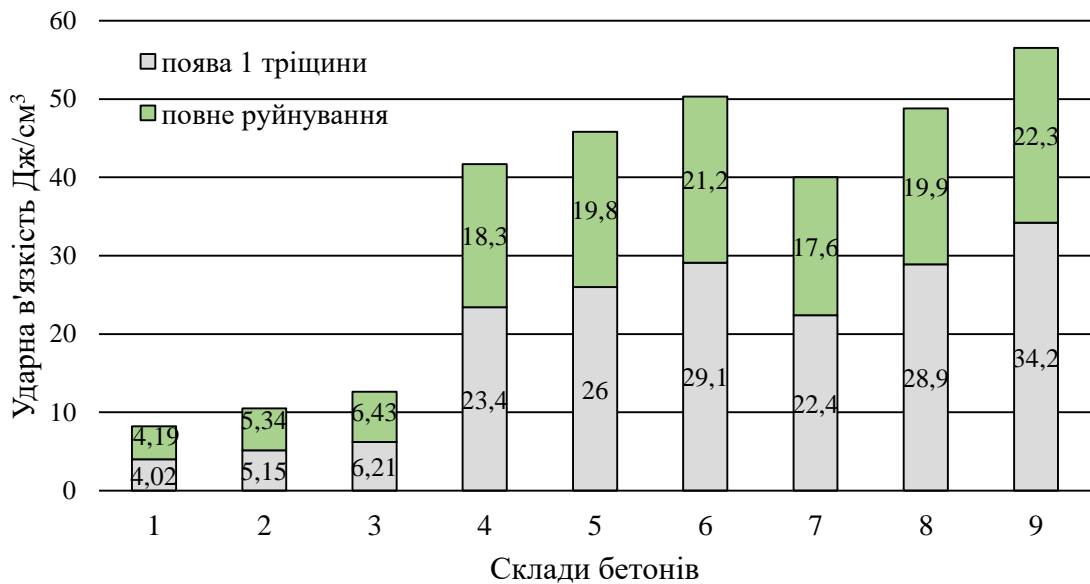


Рисунок 4.11 – Ударна в'язкість модифікованих бетонів через 7 діб

Формування щільної структури бетону, модифікованого органо-мінеральним модифікатором, дає змогу підвищити показники ударної в'язкості через 28 діб до 4,9-7,15 Дж/см³, що 12-14 раз перевищує ударну в'язкість модифікованих бетонів через 2 доби тверднення (рисунок 4.12). Через 28 діб тверднення показники ударної в'язкості модифікованого дисперсно-армованого бетону зростають в 10,5-11,8 рази порівняно з неармованим модифікованим бетоном. Для високоміцних дисперсно-армованих бетонів з витратою портландцементу 350 кг на 1 м³ бетонної суміші класу за міцністю на стиск С 55/67 ударна в'язкість при появі першої тріщини становить 41,0 Дж/см³, а бетонів з витратою портландцементу 400 кг на 1 м³

бетонної суміші класу за міцністю на стиск С 60/75 – 45,0 Дж/см³, ударна в'язкість повного руйнування становить 75,8 Дж/см³ та 80,3 Дж/см³ відповідно.

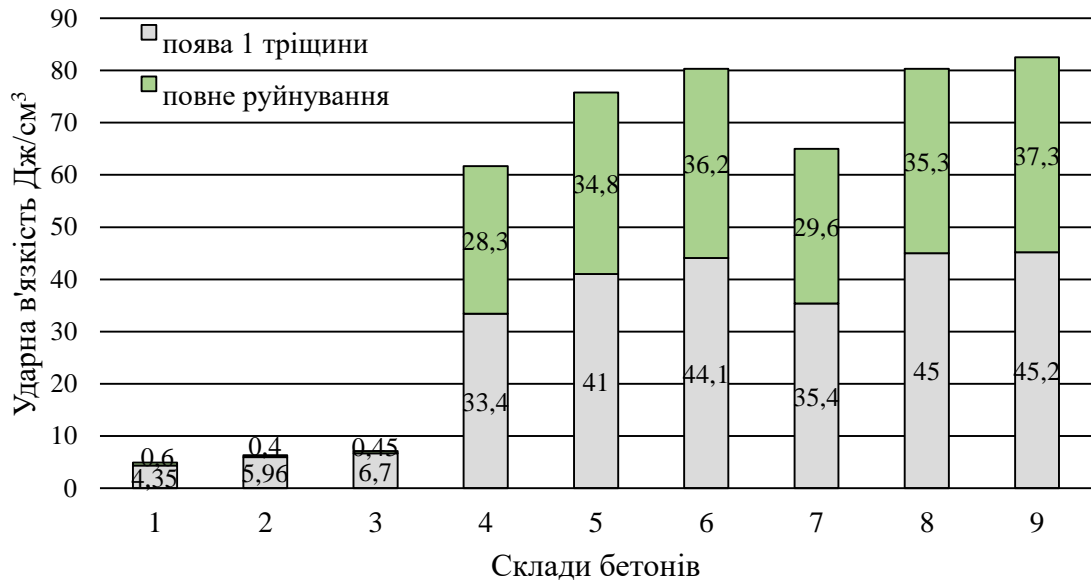


Рисунок 4.12 – Ударна в'язкість модифікованих бетонів через 28 діб

Поведінка та тип руйнування бетону залежить від міцності матриці, міцності заповнювача та міцності зчеплення волокна з цементуючою матрицею. Крихку поведінку спостерігали при випробуванні зразків неармованого бетону при цьому утворювалась магістральна тріщина, що розбивала зразок на дві частини, як показано на рисунку 4.13, а. Зразки модифікованого дисперсно-армованого бетону руйнувалися за іншим механізмом (рисунку 4.13, б). При введенні дисперсних волокон до бетонних сумішей спосіб руйнування під дією ударних навантажень змінювався з крихкого на пластичний, змінювався також характер тріщиноутворення з утворенням не однієї тріщини, а множини тріщин, що відображає позитивний ефект фібробетонів для використання у будівельній практиці. При цьому відбувається перерозподіл напружень з матриці на армувальні волокна за участю контактної зони як на стадії мікро-, так і макротріщиноутворення з формуванням не однієї магістральної тріщини, а мережі мезо- і мікротріщин. Область передруйнування не обмежується вузькою локалізованою зоною в

місці найбільших деформацій, а поширюється практично на весь деформований об'єм матеріалу.

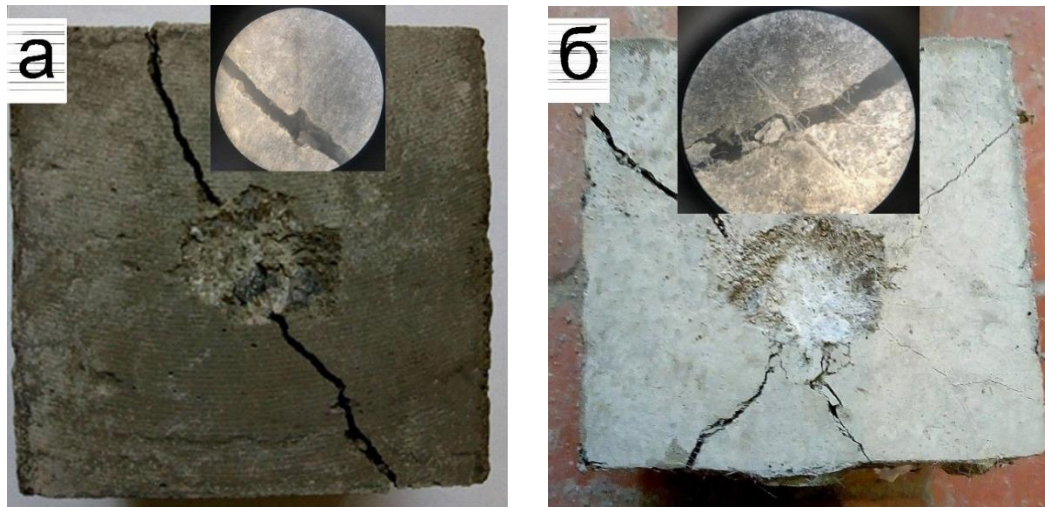


Рисунок 4.13 – Поверхня зразків модифікованих бетонів після випробування на удар: без фібри (а), дисперсно-армований (б)

При досягненні границі міцності такий бетон не втрачає цілісності і не супроводжується фрагментацією матеріалу за рахунок сукупності армувальних елементів. При подальшому деформуванні відбувається розширення існуючих мікротріщин, на що затрачається додаткова робота, що зумовлює принципово інший тип руйнування дисперсно-армованих бетонів з переходом від крихкого типу руйнування до псевдопластичного.

4.3.3. Властивості при довготривалому твердненні. З часом тверднення у цементній матриці бетону може відбуватися перекристалізація продуктів гідратації, що негативно впливає на міцність бетону [48]. У зв'язку з цим, в роботі досліджували міцність бетонів через 1 рік (перші 28 діб зразки тверднули в нормальних умовах згідно з ДСТУ Б В 2.7-214:2009, потім у повітряно-сухих умовах $\varphi=55-65\%$, $t=20\pm 3$ °C). Як показали результати випробувань (рисунок 4.14), з часом тверднення у зразків усіх складів відбувається приріст міцності на 7,1–10,2 %. При цьому зі збільшенням міцності в проектному віці спостерігається менший приріст.

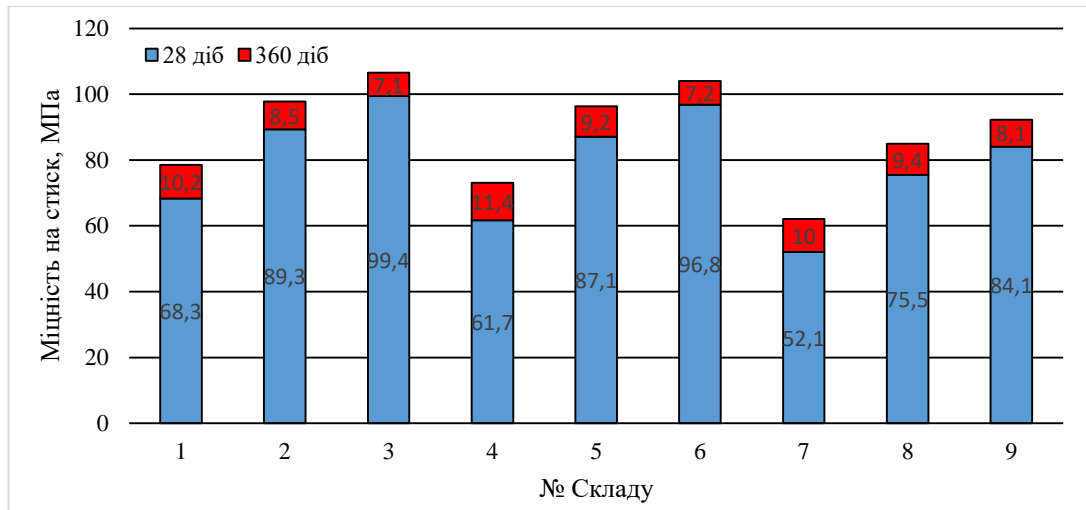


Рисунок 4.14 – Міцність на стиск бетонів після довготривалого тверднення

Встановлено, що зростання міцності на згин сприяє зростанню характеристик тріщиностійкості, у той час, як зростання міцності на стиск не сприяє збільшенню характеристик тріщиностійкості і може обумовлювати зменшення повноти повністю рівноважних діаграм деформування. У зв'язку з цим, у роботі досліджено міцність на розтяг при згині розроблених бетонів через рік (рисунок 4.15). Як видно з результатів випробувань, міцність на згин бетонів через 1 рік тверднення зростає на 8-10% порівняно з міцністю бетонів через 28 діб.

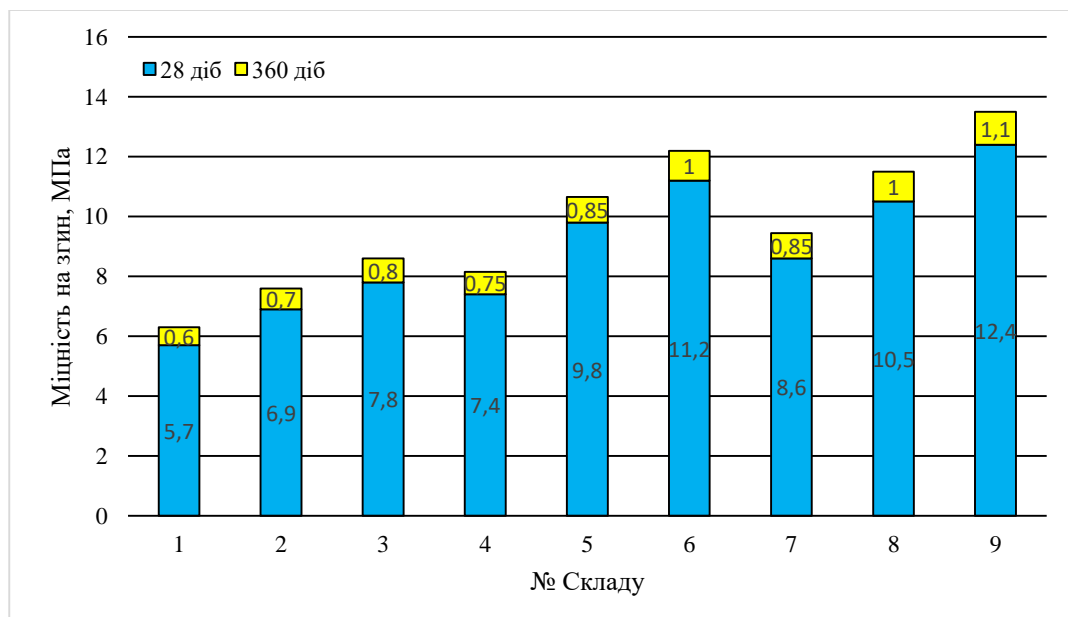


Рисунок 4.15 – Міцність бетонів на розтяг при згині після довготривалого тверднення

Модифіковані бетони через 360 діб тверднення випробовували на ударну в'язкість (рисунок 4.16). Показано, що ударна в'язкість модифікованих бетонів без фібри зростає в 2,0–2,1 рази порівняно з ударною в'язкістю бетонів у проектному віці. Ударна міцність високоміцних дисперсно-армованих бетонів, що характеризує появу першої тріщини, зростає в 1,1–1,2 рази порівняно з міцністю бетонів через 28 діб тверднення, а ударна міцність, що характеризує повне руйнування, – в 1,07-1,09 рази.

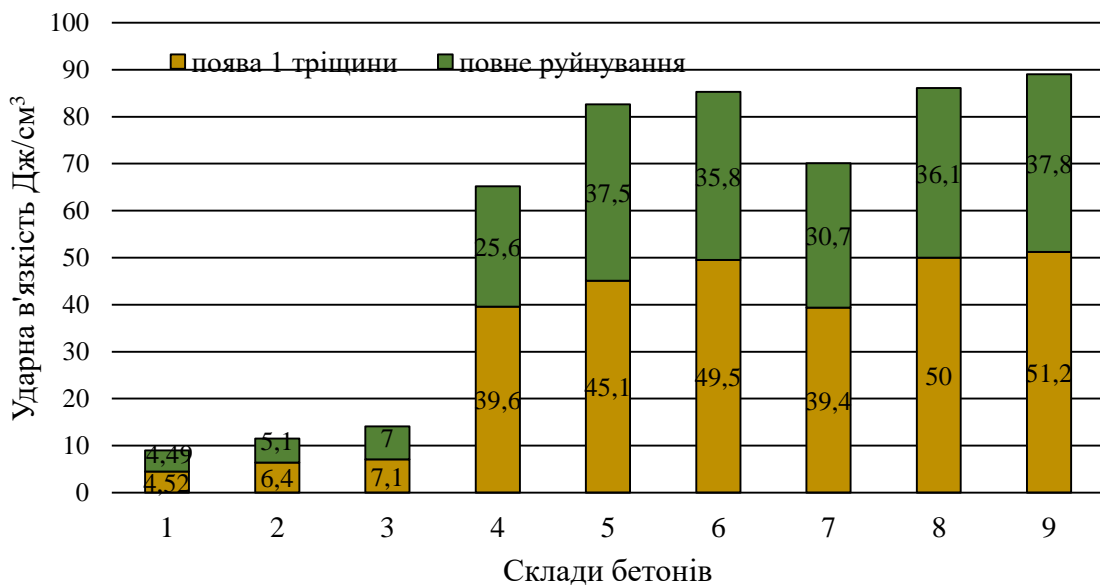


Рисунок 4.16 – Ударна в'язкість бетонів після довготривалого тверднення

Проведено оцінку стійкості до удару розроблених високоміцних дисперсно-армованих бетонів (склад №4, таблиця 4.3) згідно з ДСТУ Б В.2.7-57-96, що дає змогу змодельовати поведінку бетону у конструкції промислової підлоги. Для порівняння досліджували бетон еталонного складу згідно з ДСТУ Б В 2.7-171:2008 з витратою портландцементу 350 кг/м³, модифікованого пластифікатором на основі лігносульфонату (склад №1), який широко використовується у технологіях будівельного виробництва, в т.ч. при влаштуванні промислових підлог, а також бетони з витратою портландцементу 400 кг/м³, модифіковані полікарбоксилатним суперпластифікатором (склад №2), полідисперсною органо-мінеральною

добавкою (склад №3) та полідисперсною органо-мінеральною добавкою та поліпропіленою фіброю (склад №4) (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6 – Витрата матеріалів на 1 м³ бетонної суміші бетонів для випробування на ударну стійкість згідно з ДСТУ Б В.2.7-57-96

Компоненти	Номер складу			
	1	2	3	4
Цемент	350	400	400	400
Мікрокремнезем	-	-	20	20
Аеросил	-	-	2	2
Пісок	700	670	670	670
Щебінь	1250	1210	1210	1210
В/Ц	0,52	0,50	0,52	0,53
Фібра	-	-	-	4
РСЕ	-	6	6	6
ЛСТ	1,75	-	-	-

Міцність на стиск бетонів, модифікованих комплексною органо-мінеральною добавкою, через 2 доби зростає в 1,6 рази порівняно з бетонами, модифікованими лише суперпластифікатором РСЕ (рисунок 4.17). Міцність на стиск бетонів, модифікованих РСЕ, у проектному віці досягає показника 71,8 МПа, що відповідає класу за міцністю С45/55. У той час, як комплексне модифікування комплексною добавкою на основі РСЕ та ультрадисперсних мінеральних компонентів досягають показників міцності, характерних для класу за міцністю на стиск С60/75 і відносяться до високоміцних. Слід відзначити, що при цьому показник питомої міцності для таких бетонів становить 0,5, що відповідає вимогам щодо швидкотверднучих і має важливе значення для скорочення часу введення в експлуатацію бетонних покриттів.

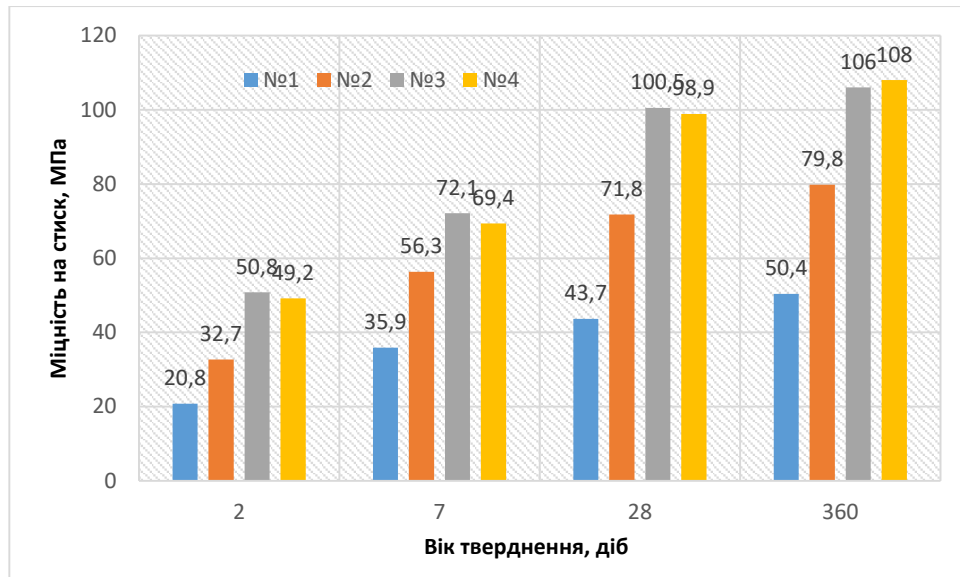
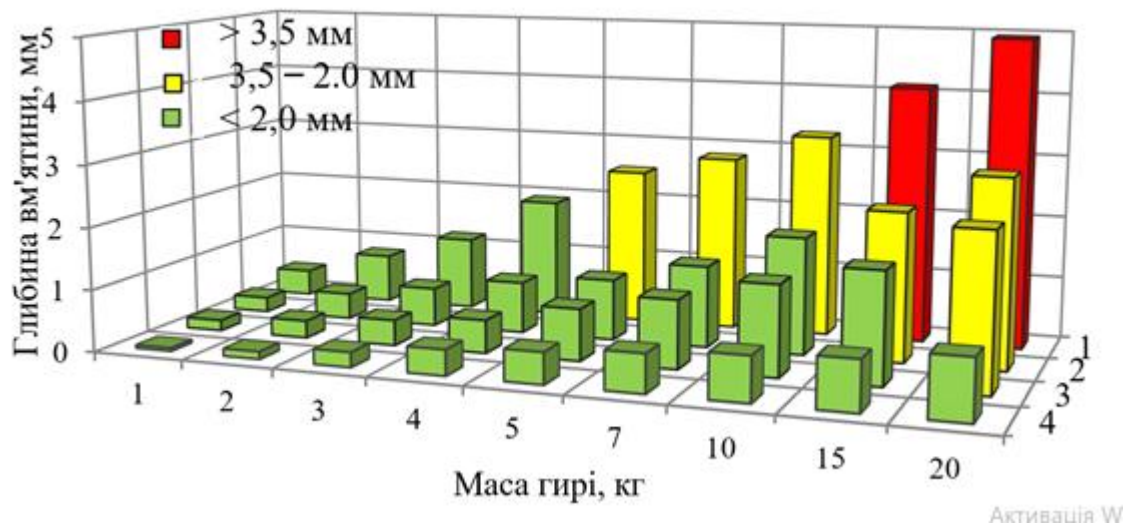


Рисунок 4.17 – Кінетика набору міцності модифікованих бетонів

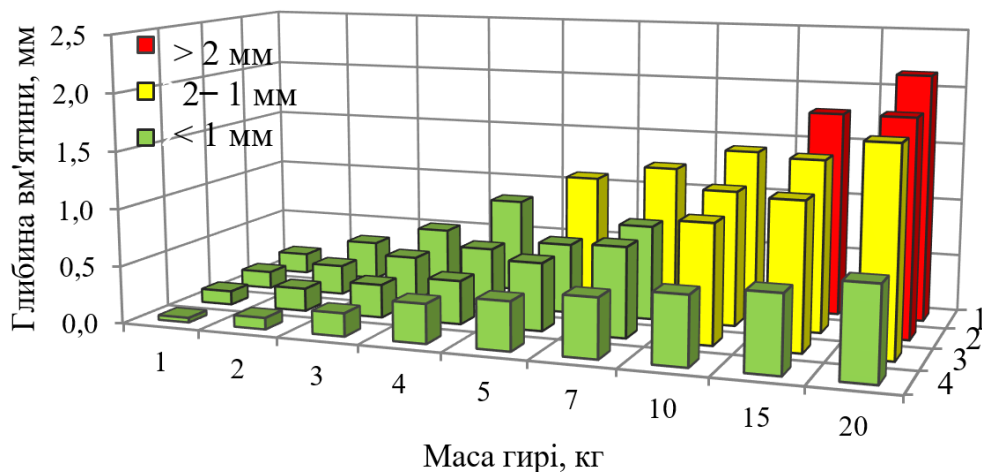
Покращені механічні властивості модифікованого бетону забезпечується зниженням капілярної пористості шляхом введення ультрадисперсних мінеральних добавок. Пористість розробленого модифікованого бетону (склад №3) на 16-32% порівняно з бетоном №2, модифікованим суперпластифікатором полікарбоксилатного типу, що зумовлено збільшенням кількості продуктів гідратації, які заповнюють міжпоровий простір з перекриттям капілярних пор. У результаті відкрита пористість модифікованого бетонів №3 №4 зменшується до 2,68-3,26%. При цьому відкрита пористість бетону №1 становить 6,75%.

Результати випробування бетонів на ударну стійкість через 28 та 360 діб наведені на рисунку 4.18. Глибина залишкового відбитку на поверхні модифікованого бетону через 28 діб не перевищує 3 мм для гирі масою 20 кг. При введенні поліпропіленових волокон спостерігається підвищення ударної стійкості та глибина відбитка від гирі масою 20 кг не перевищує 1 мм. Збільшення ударостійкості дисперсно-армованого бетону обумовлена можливістю розподілу та поглинання ударного навантаження рівномірно за об'ємом, а також підвищенням однорідності, зменшенням дефектів (пор) поверхневого шару бетону.

Звичайний бетон складу №1 характеризується низькою ударостійкістю. Максимальне значення залишкової глибини відбитку еталонного бетону 1 - 4,9 мм (рисунок 4.18, а). Допустиме значення глибини відбитку для бетону складу №1 становить 5 кг. Глибина залишкового відбитку модифікованих та дисперсно-армованих бетонів через 360 діб становить 0,8 мм при удару гирею масою 20 кг (рисунок 4.18, б), що не перевищує допустиме значення відповідно до методики. Ударостійкість еталонного бетону №1 становить 10 кг (залишкова глибина відбитку 1,8 мм).



а



б

Рисунок 4.18 – Кінцева глибина відбитку на поверхні бетону через 28 (а) та 360 (б) діб

У забезпеченні високих експлуатаційних характеристик бетонів, що зазнають ударних навантажень, суттєву роль відіграє поверхня матеріалу, яка характеризується особливою будовою та енергетичним станом, а відповідно і властивостями [3]. Для підвищення роботоздатності матеріалів необхідно забезпечити однорідний розподіл та високу поверхневу густину упакування фрагментів структури, що забезпечує створення дисипативних структур в поверхневих шарах з переводом метастабільного стану в стан певної впорядкованості.

Використання комплексного модифікатора створює можливість регулювання структурно-енергетичного стану поверхні на ранніх термінах тверднення. Стійкість бетону до ударних навантажень пов'язана з поведінкою поверхневого шару при механічній дії на матеріал, і характеризується твердістю.

Твердість за Брінеллем (НВ) розрахована як відношення навантаження на площу поверхні сферичного відбитка, тоді як твердість Мейєра (НМ) – як співвідношення навантаження та проекції залишкового відбитка. Показник статичної твердості за Брінеллем НВ 10/1000 та Майєром модифікованого бетону через 28 діб становить 805 та 845 МПа відповідно (рисунок 4.19), що в 1,7-2,2 рази перевищує значення твердості контрольного бетону (395 і 490 МПа) і свідчить про високу енергію зв'язку між частинками в поверхневому шарі модифікованого бетону, а також про високий опір пружним та пластичним деформаціям в умовах нерівномірного стиску. Значення твердості для модифікованого фібробетону знижується на 10,3% порівняно з неармованим бетоном, що вказує на зв'язок між міцністю на стиск і твердістю бетону та збільшенням пластичних деформацій при введенні поліпропіленових волокон.

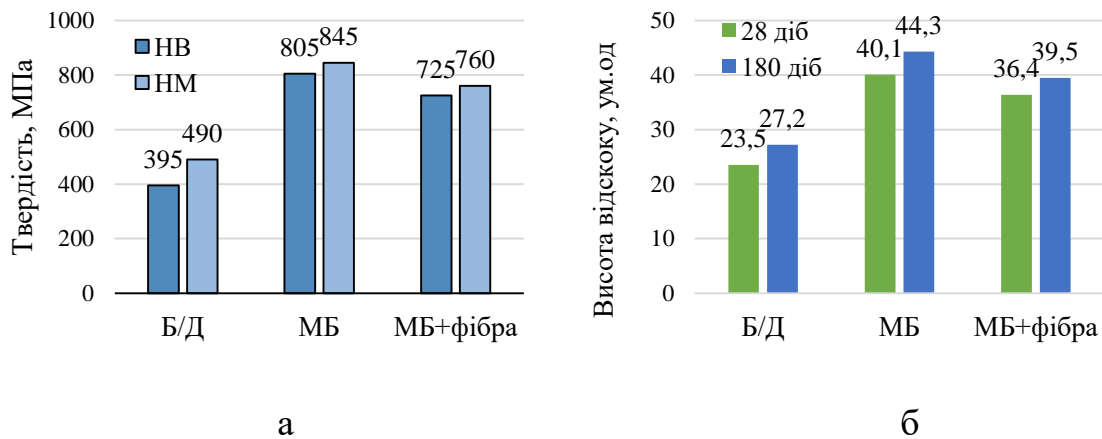


Рисунок 4.19 – Статична (а) та динамічна (б) твердість бетонів

Ударна твердість бетону характеризується низьким ступенем розсіювання енергії і пов'язана з його міцністю. З підвищенням міцності зростає ударна твердість та пов'язана з нею висота пружного відскоку. Вимірювання твердості поверхні за допомогою склерометра (індекс відскоку) базується на теоретичних основах зв'язку між міцністю на стиск і стійкістю до відновлення бетону і є функцією структури, оскільки бетон є макроскопічно неоднорідним, багатофазним матеріалом з капілярною пористою системою.

Результати визначення динамічної твердості поверхневого шару бетонів свідчать про можливість регулювання структурно-енергетичного стану поверхні при введенні комплексного модифікатора та дисперсної фібри. Динамічна поверхнева твердість (енергія удару 1,8 Дж) модифікованих високоміцних бетонів зростає в 1,5-1,7 рази залежно від віку тверднення порівняно з бетоном контрольного складу і свідчить про зростання пружних властивостей бетону. Динамічна твердість модифікованих дисперсно-армованих бетонів знижується на 5-7% порівняно з композитами без фібри, що зумовлюється частковим поглинанням та розподіленням енергії удару дисперсною фіброю, яка характеризується високими пластичними характеристиками.

4.3.4. Атмосферостійкість. Умови експлуатації промислових підлог можуть бути пов'язані з періодичною зміною вологості, що зумовлено

природніми опадами або технологічними процесами (автомийки, формувальні цехи). Багатократна зміна вологості зумовлює розвиток деформацій набухання і усадки, що спричиняє розхитування структури матеріалу та призводить до необоротних змін і передчасного зниження експлуатаційних характеристик. У зв'язку з цим, досліджували вплив багатократного поперемінного зволоження і висушування на властивості розроблених високоміцних дисперсно-армованих бетонів за методикою атмосферостійкості, що полягала у визначенні міцності та ударної в'язкості зразків через 50 та 100 циклів зволоження–висушування.

Застосування органо-мінерального модифікатора та дисперсне армування дає змогу збільшити міцність на стиск дрібнозернистого бетону в 1,6-1,7 раза, а міцність на розтяг при згині при введенні комплексного модифікатора зростає у 1,4 раза, а при дисперсному армуванні поліпропіленовою фіброю – в 1,8 рази (таблиця 4.7).

Таблиця 4.7 – Випробування атмосферостійкості цементно-піщаної дисперсно-армованої матриці високоміцних бетонів Ц:П=1:2 (зразки 4x4x16 см, пісок Жовківський)

В'язуче	В/Ц	РК, мм	Міцність зразків, МПа					
			контрольних		цикли зволоження- висушування			
			згин	стиск	50		100	
					згин	стиск	згин	стиск
ПЦ І- 500	0,43	195	8,3	46,8	5,9	47,3	5,0	43,5
Модифікований	0,35	265	11,5	78,6	10,6	79,3	9,7	80,8
Модифікований +1% фібри	0,36	260	14,7	75,8	13,8	76,2	12,9	77,8

Після 50 циклів поперемінного зволоження-висушування спостерігається приріст міцності на стиск дрібнозернистого бетону, модифікованого органо-мінеральною добавкою на 1-3% порівняно з контрольними. Слід відзначити, що через 100 циклів міцність на стиск контрольного дрібнозернистого бетону знижується і коефіцієнт стійкості $K_{ст100}=0,93$. У той час, як для модифікованих бетонів коефіцієнт стійкості за міцністю на стиск після 100 циклів зволоження-висушування. За цим показником бетони задовольняють вимоги щодо атмосферостійкості.

Аналіз результатів випробувань міцності на стиск модифікованих бетонів, які тверднули 28 діб в нормальних умовах, після 50 та 100 циклів зволоження-висушування, підтверджує слабку чутливість міцності при стиску до перемінних температурно-вологісних деформацій.

Чутливішою характеристикою, яка реагує на зміну структури цементної матриці при дії на неї циклічного впливу зволоження-висушування є міцність на розтяг при згині (при одноточковому навантаженні). Через 50 циклів зволоження-висушування відбувається зменшення міцності дрібнозернистого бетону на основі ПЦ І-500 на згин на 29 % порівняно з контрольним, це свідчить про те, що даний бетон не витримує вимог випробування на атмосферостійкість (рисунок 4.20).

Через 50 циклів випробувань поперемінного зволоження та висушування міцність на згин дрібнозернистого модифікованого дисперсно-армованого бетону знижується і коефіцієнт стійкості становить $K_{зг50}=0,92$, а через 100 циклів - $K_{зг100}=0,84$. Слід відзначити, що дисперсне армування поліпропіленовою фіброю забезпечує зростання стійкості бетону до дії поперемінного зволоження-висушування, коефіцієнти стійкості за міцністю на згин через 50 та 100 циклів становлять $K_{зг50}=0,94$ та $K_{зг100}=0,88$. Розроблений високоміцний дисперсно-армований бетон стійкий до дії поперемінного впливу зволоження-висушування.

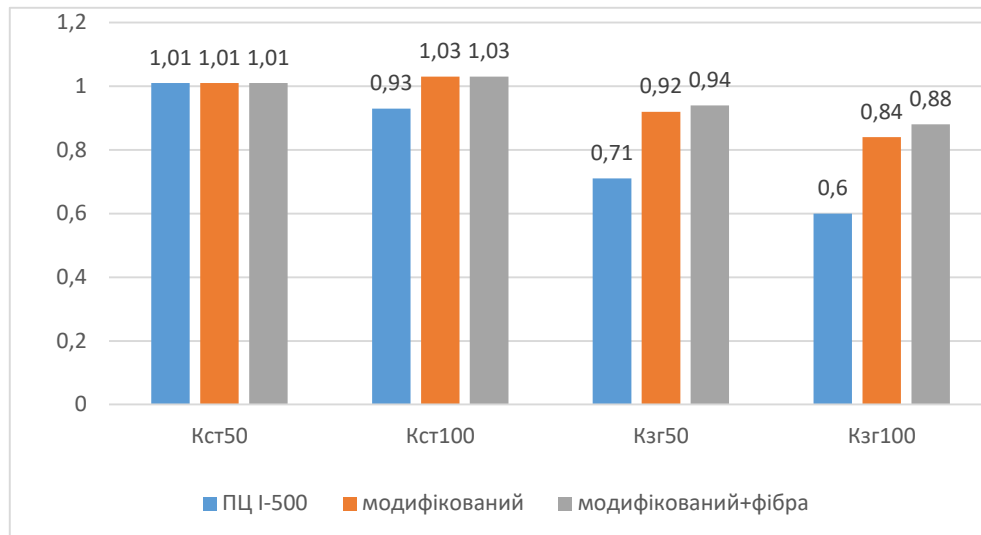


Рисунок 4.20 – Коефіцієнти стійкості високоміцних бетонів

Випробування впливу поперемінного зволоження-висушування на ударну в'язкість модифікованих високоміцних бетонів та фібробетонів номінально складу 1:1.8:3 (витрата портландцементу становить 350 та 400 кг на 1 м³) марки за рухомістю бетонної суміші Р4 проводили на зразках-кубах 10x10x10 см. При цьому паралельно також визначали міцність при стиску та згині. Позначення складів відповідно до таблиці 4.4. Для порівняння випробовували бетон, модифікований добавкою на основі лігносульфонатів, з витратою портландцементу 350 кг на 1 м³ (склад №1).

Аналіз результатів випробувань міцності на стиск показав (рисунок 4.21), що як і у випадку випробування зразків-балочок міцність на стиск через 50 циклів зростає і коефіцієнт стійкості становить 1,01 для всіх модифікованих бетонів. У той же час, для бетону складу №1 приріст міцності становить 20%. Автори [91] пояснюють таке зростання виникненням нових поверхонь розділу, що сприяє збільшенню ступеню гідратації портландцементу і відбувається відновлення функціональних властивостей матеріалу. Крім цього, у бетоні, модифікованому комплексною добавкою на основі мікрокремнезему, аеросилу та полікарбоксилатного суперпластифікатора, активізуються пуцоланові реакції у неклінкерній складовій цементної матриці.

За показниками міцності на стиск через 100 циклів попереминого зволоження-висушування розроблені бетони задовольняють вимоги методики випробувань на атмосферостійкість – втрати міцності становить 1,9-3,0%.

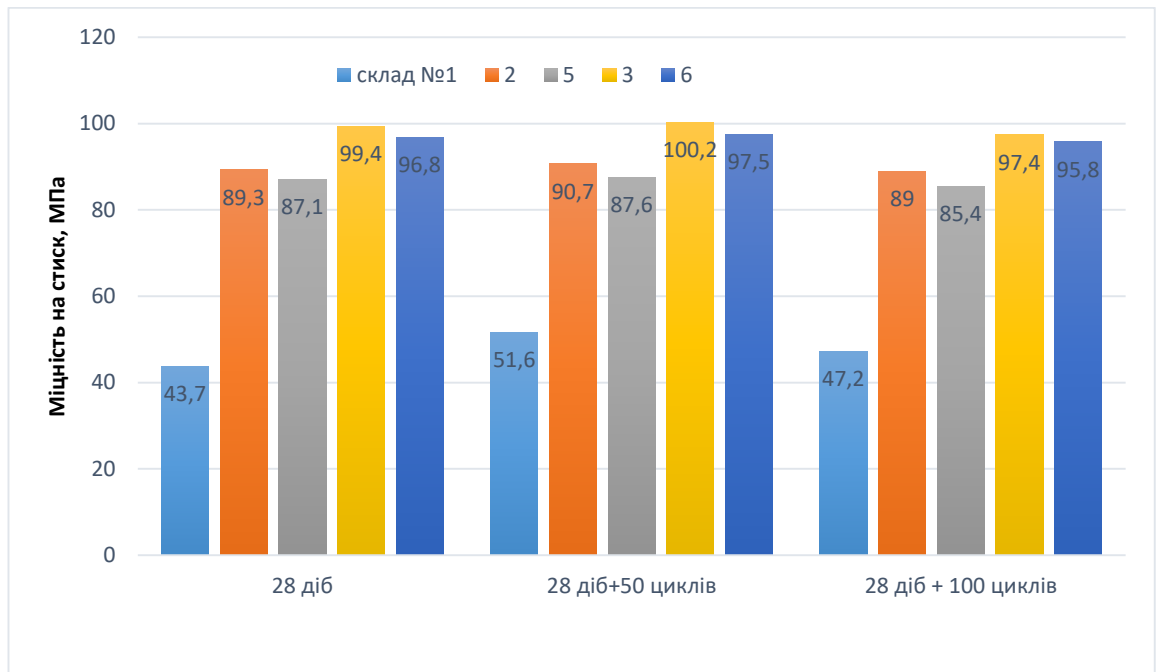








Рисунок 4.21 – Міцність на стиск бетонів після випробування на атмосферостійкість

Підвищення міцності на стиск може бути пов'язано також з частковою карбонізацією поверхневих шарів зразка. При дії вуглекислого газу, концентрація якого у повітрі зазвичай становить 0,02-0,03%, а всередині приміщень може досягати до 0,1%, на цементні бетони в нормальних умовах відбувається карбонізація не лише кальцію гідроксиду, але й може взаємодіяти із гідросилікатами та гідроалюмінатами кальцію, гідроксидом магнію та ін. [19]. Швидкість карбонізації зростає при попереминому зволоженні та висушуванні і може викликати деяке зростання міцності, але негативно впливає на стійкість арматури в бетоні, знижуючи його водневий показник.

Визначення глибини карбонізації у бетонів після впливу попереминого зволоження-висушування проводили колориметричним методом [11], котрий полягає у змочуванні свіжосколеної поверхні бетонного зразка 0,1%

спиртовим розчином фенолфталеїну. Як показали результати визначення глибини карбонізації, для бетону контрольного складу цей показник становить 3 мм, після багаторазового зволоження-висушування зростає до 6 мм (таблиця 4.8), що зумовлено його підвищеною пористістю. Глибина карбонізації модифікованого високоміцного бетону та фібробетону становить 1 мм до випробування, а після – 1,5 мм.

Таблиця 4.8 – Визначення глибини карбонізації бетонів

Зразок	До випробування	Через 100 циклів
контрольний		
Модифікований		
Модифікований+ фібра		

Поєднання ударних навантажень з багаторазовими циклами зволоження-висушування призводить до незворотних порушень структури матеріалу і зниження його стійкості. У зв'язку з цим, у роботі визначали спільний вплив на бетон експлуатаційних навантажень у вигляді удару і зволоження-висушування.

Залежність міцності на удар від кількості циклів змінного зволоження та висушування свідчить, що повторюваний процес втоми бетону змінним зволоженням та висушуванням, при якому створювалися знакозмінні в результаті призвів до зменшення ударної в'язкості бетону склад №1 на 19,1% через 50 циклів. Через 100 циклів поперемінного зволожування-висушування зниження міцності фіксували на рівні 27,4% (рисунок 4.22).

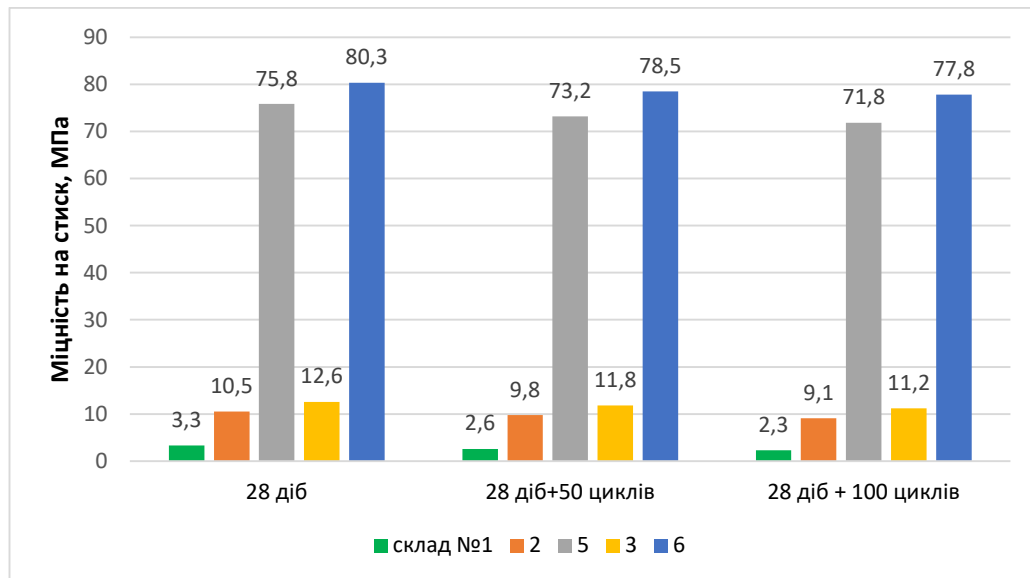


Рисунок 4.22 – Зміна ударної в'язкості бетонів в залежності від циклів поперемінного зволоження-висушування

Введення комплексного органо-мінерального модифікатора до складу бетону зумовило підвищення його міцності, що виражалось більш високими показниками ударної в'язкості. Оптимальна мікроструктура модифікованого бетону забезпечила зниження ударної міцності на 11,4-12,9% через 100 поперемінних циклів.

Дисперсне армування поліпропіленовою фіброю забезпечило ефективне зростання стійкості до ударних навантажень при сумісній дії

змінного зволоження-висушування. Так, модифікований дисперсно-армований бетон після 50 та 100 циклів поперемінного зволоження висушування втрачає 2,2-3,4% та 3,1-5,4% ударної в'язкості.

4.3.5. Усадочні деформації. Усадка бетону зумовлена фізико-хімічними процесами, які проходять в бетоні при твердненні та зміні його вологості. Залежно від виду конструкцій висуваються наступні вимоги щодо величини усадки бетону: в неармованих конструкціях вона не повинна перевищувати 0,3 мм/м, в армованих – 0,2 мм/м [24]. У зв'язку з цим, досліджено деформації усадки дрібнозернистого бетону (мезоструктурний рівень бетону), модифікованого комплексною органо-мінеральною добавкою та армованого поліпропіленовою фіброю в повітряно-сухих умовах тверднення. Співвідношення портландцемент:дрібний заповнювач приймали таким як у бетонах з витратою портландцементу 350 (склад №1) та 400 (склад №2) кг на 1 м³ бетонної суміші.

Згідно з результатами досліджень встановлено (рисунок 4.23), що випаровування надлишку води замішування призводить до зростання деформацій усадки при твердненні зразків дрібнозернистих високоміцних бетонів у повітряно-сухих умовах.

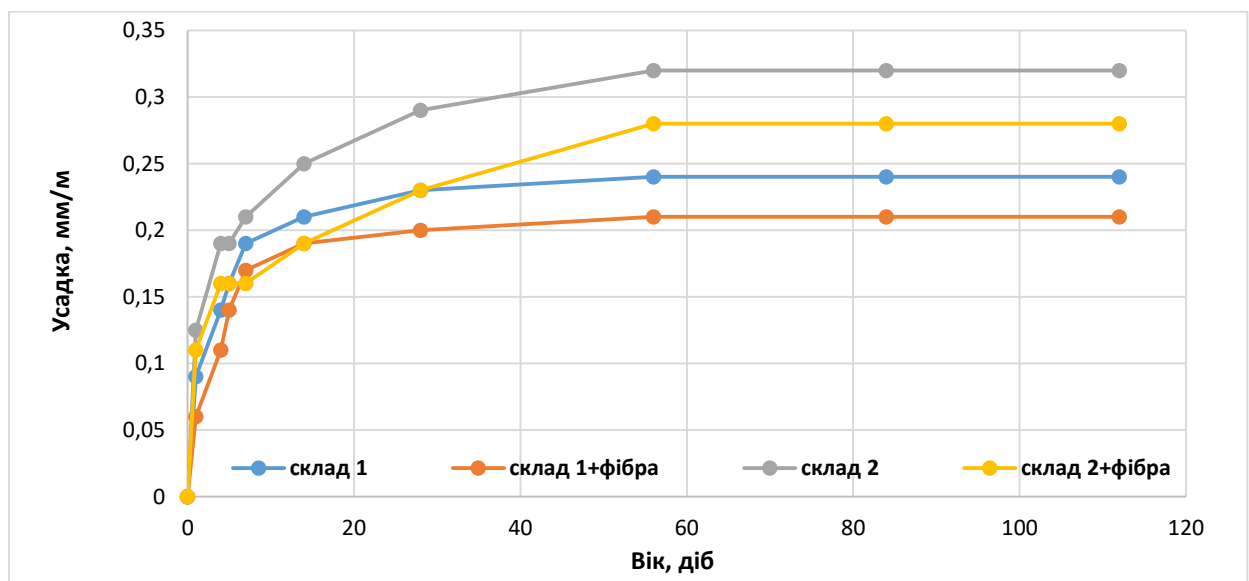


Рисунок 4.23 – Деформації усадки цементно-піщаної матриці високоміцних бетонів у повітряно-сухих умовах тверднення

Модифіковані дрібнозернисті бетони за рахунок активної адсорбції води на розвинутій міжфазній поверхні, суттєвого зменшення водовмісту при введенні полікарбонатів та швидким зв'язуванням води у гідрати, низької пористості, що зменшує поверхню взаємодії матеріалу з навколишнім середовищем, характеризуються незначними показниками усадки. Так, деформації усадки зразків бетону без фібри стабілізуються через 56 діб тверднення в повітряно-сухих умовах і становлять 0,32 та 0,24 мм/м для цементно-піщаної матриці бетону з витратою портландцементу 350 та 400 кг відповідно. Введення фібри створює тривимірний каркас та попереджає розвиток надмірних деформацій усадки. Стабілізовані показники усадочних деформацій для дисперсно-армованої цементно-піщаної матриці високоміцних бетонів з витратою портландцементу 350 та 400 кг становлять 0,28 та 0,21 мм/м відповідно, що на 12,5 % менше порівняно з неармованими зразками.

4.3.6. Деформативні властивості. При зростанні міцності високоміцних бетонів зростає крихкість та знижується тріщиностійкість бетонів. Закономірності поширення тріщин в розроблених високоміцних бетонах під навантаженням вивчені методами механіки руйнувань за рівнем критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{c*} при нерівноважних випробуваннях до дефрагментації зразків через 28 діб тверднення в нормальних умовах (рисунок 4.24). При цьому встановлено, що дрібнозернисті бетони, модифіковані органо-мінеральною добавкою та армовані дисперсними волокнами, характеризуються підвищенням коефіцієнта інтенсивності напружень в 1,7 рази ($K_{c*} = 1,24 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$) порівняно з бетоном на основі ПЦ І-500Р-Н, модифікованого комплексною добавкою ($K_{c*} = 0,62 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$). Коефіцієнт інтенсивності напружень дрібнозернистого бетону на основі портландцементу ПЦ І-500Р-Н становить $0,34 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$.

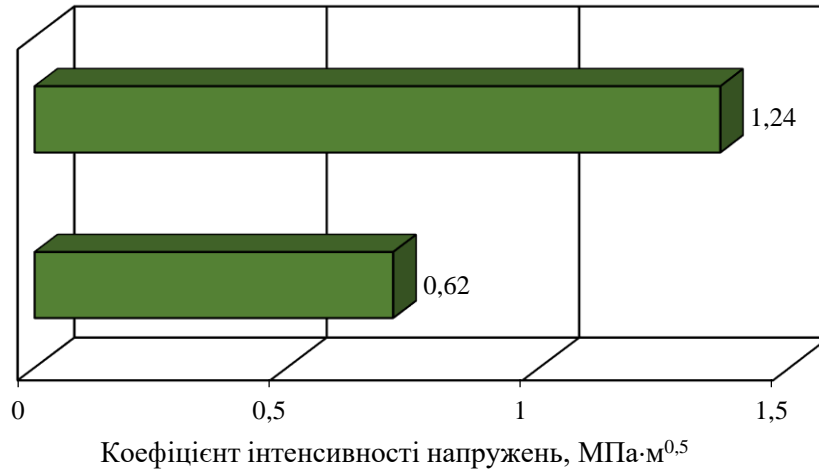


Рисунок 4.24 – Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень бетонів на основі надшвидкотверднучих портландцементних композицій

Для бетону, який піддається динамічному впливу, велике значення мають показники деформативних властивостей. Якщо на бетон діють циклічно повторювані навантаження, його деформативні властивості будуть змінюватись. При цьому якщо навантаження перевищує половину призмової міцності, то деформації, які залишаються в бетоні після кожного циклу навантаження будуть зростати і може призвести до руйнування бетону. Навантаження, що руйнує бетон, при цьому буде меншим, ніж те, що відповідає одноразовому статичному навантаженню.

Деформативні та фізико-механічні властивості визначали при випробуванні чотирьох серій призм 100x100x400 мм та кубів 100x100x100 мм високоміцних бетонів на основі портландцементу ПЦ I-500, модифікованого ультрадисперсними добавками та полікарбоксилатним суперпластифікатором (марка за рухомістю P4; Ц=350 та 400 кг/м³) та модифікованого дисперсно-армованого бетону (марка за рухливістю P4; Ц=350 та 400 кг/м³) через 28 діб тверднення в нормальних умовах до рівня навантаження $\sim 0,6 P_p$ (P_p – руйнівне навантаження). Визначення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона бетонів проведено при рівні навантаження 30% від руйнівного ($\sigma=0,3P_p/S$) (рисунок 4.25).



Рисунок 4.25 – Визначення призмової міцності (а) та модуля пружності (б) високоміцного дисперсно-армованого бетону

Модуль пружності фіброармованого високоміцного бетону зростає від 54,6 до 61,7 ГПа, а коефіцієнт Пуассона знижується від 0,19 до 0,17 порівняно із високоміцним бетоном без фібри (таблиця 4.9). Призмova міцність високоміцного бетону становить 73,5–76,4 МПа, тоді як високоміцних бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю – 78,6–82,7 МПа.

Таблиця 4.9 – Показники деформативності бетонів

Позначення бетону*	Призмova міцність, $f_{ck, prism}$, МПа	Кубикова міцність $f_{cm, cube}$, МПа	Модуль пружності, E_{cm} , ГПа	Коефіцієнт Пуассона, ν
2	73,5	88,9	54,6	0,19
5	78,6	87,6	61,7	0,17
3	76,4	98,7	64,7	0,2
6	82,7	97,5	68,5	0,17

*- згідно з таблиці 4.4

4.3.7. Стійкість до стирання. Для бетону, який використовується у конструкціях промислових підлог є його стираність, що визначає термін

служби бетонного покриття, яке піддається стираючим механічним навантаженням. Експериментальні дані випробувань на стиранисть свідчать про вищу стійкість високоміцного бетону, армованого поліпропіленовою фіброю (рисунок 4.26). Показано, що введення фібри до високоміцних бетонів сприяє зниженню стиранисті на 30,4–34,3 %.

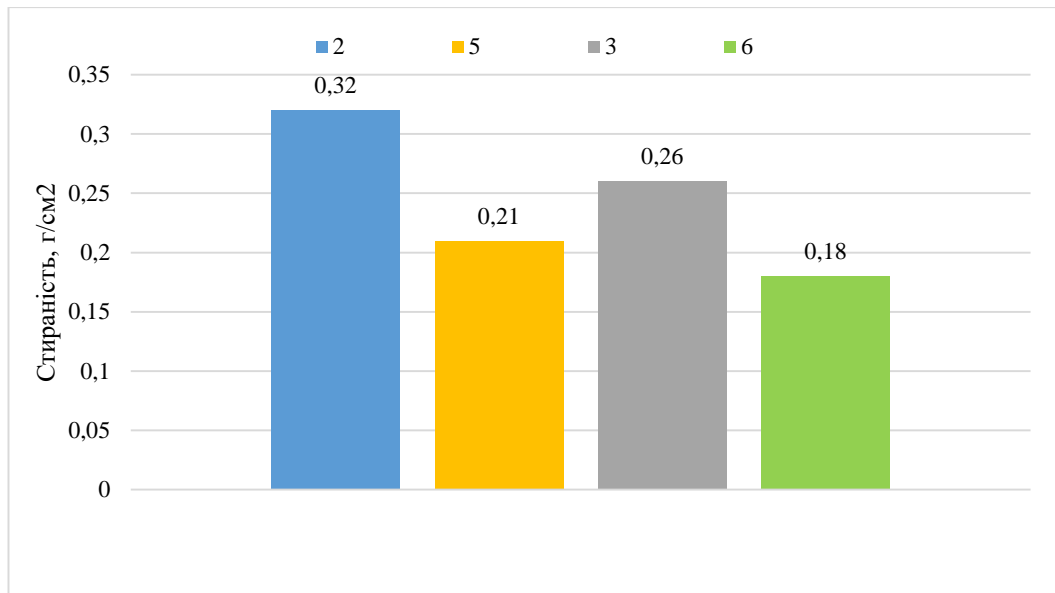


Рисунок 4.26 – Стираність високоміцних бетонів

Отже, розроблені модифіковані високоміцні бетони та фібробетони характеризуються підвищеними показниками міцності, щільності, ударної в'язкості, деформативними характеристиками, низькими показниками стиранисті, що забезпечить надійність роботи та довговічність бетонного покриття в складних умовах експлуатації.

Висновки до розділу

1. Проведено підбір гранулометричного складу заповнювачів з врахуванням нормативних кривих розподілу частинок при заданому максимальному розмірі зерен 20 мм з одержанням співвідношення фракцій заповнювача для забезпечення структури бетону, оптимальної за критерієм

міцності. Встановлено вплив дрібного заповнювача на кінетику набору міцності бетону та показано, що часткова заміна жовківського піску на пісок з відсіву подрібнення забезпечує зростання міцності бетону на 10-13% у всі терміни тверднення порівняно з бетонами на основі жовківського піску.

2. Здійснено моделювання складів модифікованих бетонів для промислових підлог, змінними факторами при цьому вибрано витрату портландцементу ПЦ І-500Р-Н ($X_1 = 300, 350$ та 400 кг/м³ бетонної суміші) та кількість поліпропіленової фібри ($X_2 = 0; 1,0; 2,0$ мас.%). Показано, що модифікування комплексною органо-мінеральною добавкою у поєднанні з поліпропіленовими волокнами на рівні 1 мас.% забезпечує отримання високоміцних фібробетонів класу за міцністю С55/67 та С60/75 при витраті портландцементу 350 та 400 кг на 1 м³ бетонної суміші відповідно. За показниками питомої міцності $f_{cm2}/f_{cm28} = 0,5-0,51$ розроблені дисперсно-армовані бетони відносяться до бетонів з швидким наростанням міцності.

3. Розроблені високоміцні бетони характеризуються середньою густиною 2420-2430 кг/м³, водопоглинанням за масою 1,9-2,1 мас.%, індексом сорбції 0,37-0,52 мм·год^{0,5}, підвищеними значеннями водонепроникності (W20). Показано, що формування щільної структури бетону, модифікованого органо-мінеральним модифікатором, дає змогу підвищити показники ударної в'язкості через 28 діб до 4,9-7,15 Дж/см³. Суттєве зростання ударної в'язкості спостерігається при введенні поліпропіленової фібри. Через 28 діб тверднення показники ударної в'язкості модифікованого дисперсно-армованого бетону зростають в 10,5-11,8 рази порівняно з неармованим модифікованим бетоном і досягають значень 75,8 Дж/см³ та 80,3 Дж/см³ відповідно для фібробетону класу за міцністю на стиск С 55/67 та С 60/75.

4. Результати випробування ударної стійкості дисперсно-армованих високоміцних бетонів згідно з ДСТУ Б В.2.7-57-96 свідчать, що при введенні поліпропіленових волокон спостерігається підвищення ударної стійкості до 20 кг.

5. За показниками міцності на стиск через 100 циклів поперемінного зволоження-висушування розроблені бетони задовольняють вимоги методики випробувань на атмосферостійкість – втрати міцності становить 1,9-3,0%. Дисперсне армування поліпропіленовою фіброю забезпечило ефективне зростання стійкості до ударних навантажень при сумісній дії змінного зволоження-висушування – зниження ударної в'язкості модифікованих дисперсно-армованих бетонів після 50 та 100 циклів поперемінного зволоження висушування знижується на 2,2-3,4% та 3,1-5,4% відповідно.

6. Дослідженнями деформативних властивостей наномодифікованих швидкотверднучих бетонів встановлено, що їх модуль пружності складає 61,7 –68,5 ГПа, а коефіцієнт Пуассона – 0,17. Деформації усадки високоміцних бетонів у повітряно-сухих умовах тверднення становлять 0,21–0,32 мм/м. Показано, що введення фібри до високоміцних бетонів сприяє зниженню стираності на 30,4–34,3 %.

Результати досліджень, що викладені у даному розділі, опубліковані в роботах [35, 54, 57, 107, 137, 152].

РОЗДІЛ 5

ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ, АРМОВАНИХ ДИСПЕРСНИМИ ВОЛОКНАМИ

5.1. Промислова апробація високоміцних бетонів, армованих дисперсними волокнами, при влаштуванні промислових підлог

Промислові підлоги використовуються у приміщеннях із значною інтенсивністю транспортних чи людських потоків, впливів агресивних середовищ та механічних навантажень, що визначає їх підвищену міцність і зносостійкість, короткі терміни введення в експлуатацію. Поряд із загальними вимогами іноді висувається ряд додаткових завдань, які вирішуються при виборі типу промислової підлоги. Так, до промислових підлог в хімічній і текстильній промисловості висуваються додаткові вимоги щодо хімічної стійкості і вологостійкості, а також ударостійкості при можливих ударних навантаженнях, характерних для машинобудівної галузі чи у складських приміщеннях.

Враховуючи ці вимоги широке застосування одержали бетонні промислові підлоги, які характеризуються необхідними показниками міцності, рівності поверхні, а також забезпечують експлуатаційні характеристики промислових покриттів. Бетонні підлоги застосовуються при будівництві та реконструкції цехів, заправних станцій, гаражів, автомийок, торгових центрів, виставкових залів, складських приміщень.

У період з 9 по 13 листопада 2020 р. проведено випробування високоміцних бетонів, армованих дисперсними волокнами, з проектною міцністю на стиск 84,8 МПа (клас бетону С60/75) для бетонування промислової підлоги складського приміщення (м. Львів, вул. Буйка) ТзОВ «Гартекс» (додаток А). Для виготовлення бетонних сумішей застосовували портландцемент ПЦ І-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент», витрата

портландцементу становила 400 кг на 1 м³ бетонної суміші. Для модифікування властивостей бетонної суміші та бетону використовували органомінеральну добавку на основі суперпластифікатора полікарбоксилатного типу торгової марки Glenium 430, мікрокремнезему та аеросилу. Технологічна схема виготовлення дисперсно-армованих бетонів на ТДВ «Львівський завод будівельних виробів» представлена на рисунку 5.1. Загальний об'єм виготовленого бетону склав 60 м³.

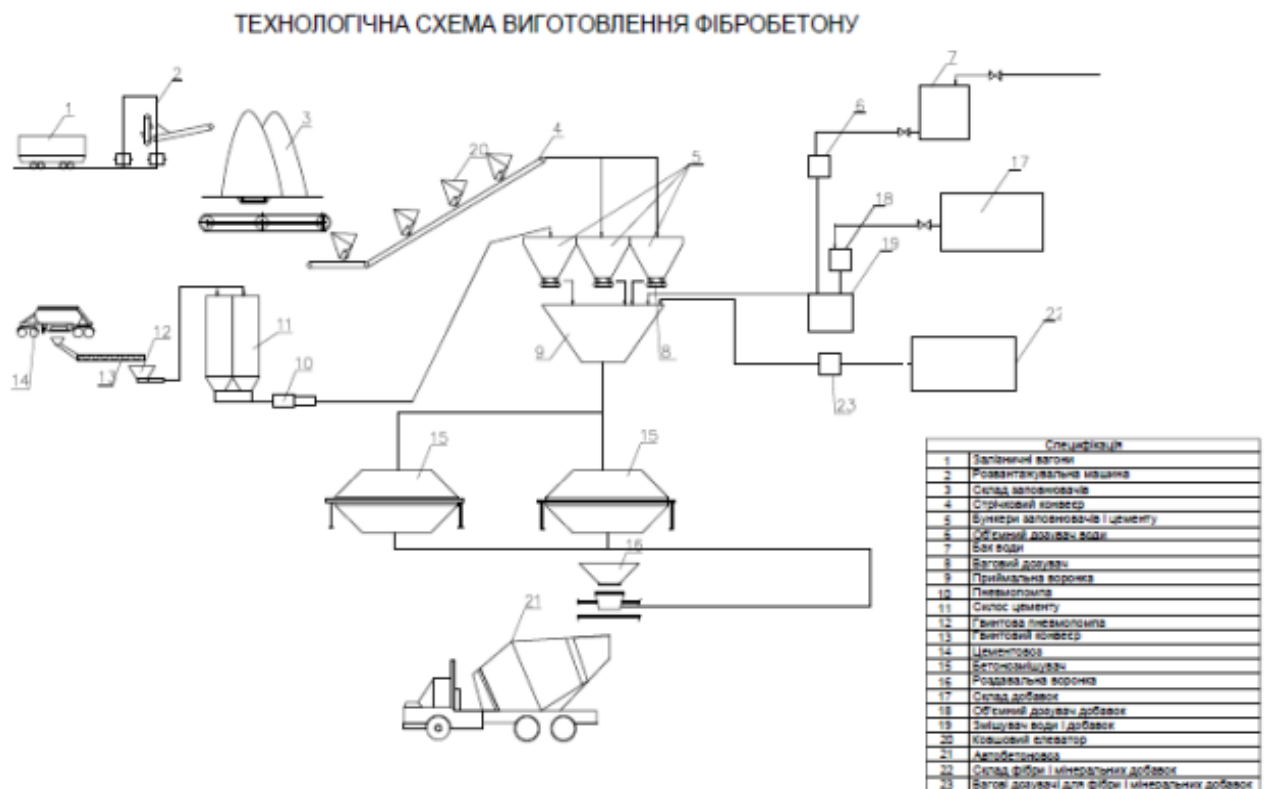


Рисунок 5.1 – Технологічна схема виготовлення фіброармованого високоміцного бетону для бетонування промислової підлоги на ТДВ «Львівський завод будівельних виробів»

Основними технологічними операціями при влаштуванні промислової підлоги на ТЗОВ «Гартекс» є підготовчий етап, армувальні роботи, заливання бетону, затирання поверхні бетону, тверднення бетону нарізання швів. Підготовчі роботи включають у себе створення спеціальної подушки, яка складається із шару піску, шару щебеню чи гравію (рисунок 5.2). Кожен шар

ущільнюють окремо за допомогою віброплит чи віброркатків. При влаштуванні бетонної підлоги по периметру приміщення встановлюється опалубка. Якщо ж площа значна, то опалубка встановлюється в межах площі підлоги, яку заливають за одну зміну. На великих площах передбачають також температурні шви.

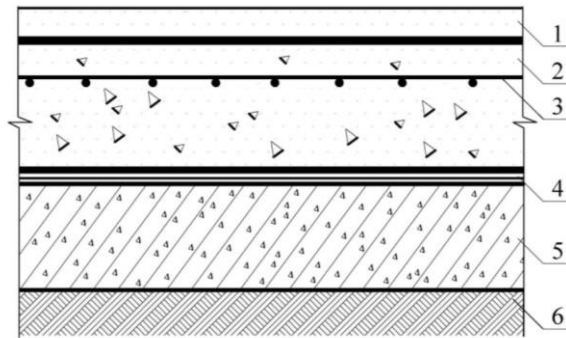


Рисунок 5.2 – Конструктивна схема промислової підлоги базового варіанту:

1 – топінг; 2 – бетонна підлога; 3 – арматурна сітка; 4 – пароізоляція ; 5 – ущільнена щебенева основа; 6 – ґрунтова основа

Направляючі влаштовують вздовж транспортного потоку відповідно до проекту з врахуванням конструктивних особливостей приміщення (розташування воріт, колон, несучих конструктивних елементів). Вертикальні конструкційні фрагменти (фундаменти, колони, стінові огорожувальні конструкції) відокремлюють від площини підлоги влаштуванням м'якої демпфуючої ізоляції.

Армування бетонних підлог здійснюється відповідно до проектного несучого експлуатаційного навантаження дорожньою сіткою із арматури чи арматурним каркасом. Розмір секції дорожньої сітки не менше 30–40 см (рисунок 5.3). Арматурна сітка в'яжеться через одну комірку. Після цього відбувається наступна операція, пов'язана з вкладанням бетонної суміші, її вирівнюванням та ущільненням. Бетонна суміш характеризується маркою за рухомістю Р3–Р4. Для ущільнення використовують правило, віброрейку, глибинний чи поверхневий вібратор (при товщині бетону більше 100 мм). При

бетонуванні необхідно забезпечити товщину захисного шару бетону (близько 1,5–2,0 см).

Тривалість тверднення бетону залежить від температури середовища, класу бетону і становить 2–7 год, після чого підлогу затирають. Для зміцнення поверхневого шару промислової підлоги використовують топінг, перед затиранням підлоги його наносять за допомогою дозатора. Витрата і тип зміцнювального верхнього шару узгоджується із замовником з врахуванням ступеня механічного впливу та експлуатаційних навантажень на підлогу. Для зміцнення бетону застосовують такі основні види топінгу як корундові, кварцові, металізовані. Найчастіше використовують топінг з кварцу. Він добре зарекомендував себе для використання в торгівельних залах торгових центрів, гаражних комплексах, складах та цехах. При цьому до складу топінгу можуть вводити пігмент для створення декоративної поверхні підлоги. Витрата топінгу становить 4–7 кг/м², в особливих випадках може досягати 8–9 кг/м².

Для підвищення стійкості до механічних навантажень, стирання промислових підлог використовують корундовий топінг. Така суміш містить портландцемент, корундову крихту, пластифікатори, пісок. Металізований топінг застосовується для підлог в приміщеннях з надвисокими навантаженнями. Разом з тим, такий топінг не стійкий при підвищеній вологості, оскільки метал піддається корозії.

Затирають бетонні промислові підлоги спеціальною машиною з диском два рази. Третій раз підлогу затирають машинкою з лопастями. Інтервал між затиранням визначається за станом поверхні: вона має бути матовою і при дотику не вимазувати руки. Утворення гладкої та рівної поверхні свідчить про те, що затирання проведено якісно.

Щоб запобігти пересиханню підлоги по закінченні затирання на неї наносять валиком чи розпилувачем поліакрилатний лак-імпрегнат. Через три доби проводять нарізку швів по бетону для запобігання температурних деформацій плити при її експлуатації.

Нарізки швів проводять через 2-3 доби, при цьому напрям нарізання повинен відповідати напрямкам стиків карт та технологічних стиків. Глибина нарізання швів становить третину товщини шару бетону. Наступною операцією є заповнення швів герметиком, для цього шви попередньо знепилюють та обробляють стінки швів праймером.

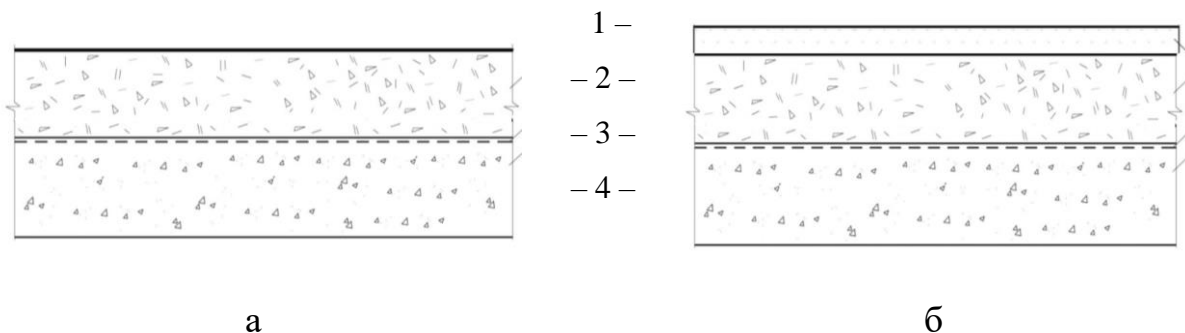


а

б

Рисунок 5.3 – Основні технологічні операції з влаштування промислової підлоги: армувальні роботи та заливка бетону (а), затирання поверхні (б)

Використання високоміцного бетону, армованого поліпропіленовою фіброю, та інженерних цементуючих композитів з підвищеною ударною в'язкістю, дало змогу реалізувати конструктиви промислових підлог, що не передбачають нанесення топінгу (рисунок 5.4).



а

б

Рисунок 5.4 – Конструктивна схема промислової підлоги з використанням високоміцного фібробетону (а) та інженерних цементуючих композитів (б):

1 – топінг (ЕСС); 2 – бетонна підлога; 3 – пароізоляція ; 4 – ущільнена щебенева основа;

Влаштування промислової підлоги на основі дисперсно-армованих бетонів проводили в умовах понижених додатних температур в діапазоні

+5...+11 °С. При бетонуванні кожен партію бетонної суміші перевіряли на відповідність рухомості для класу Р4, для контролю набору міцності виготовляли зразки-куби 10×10×10 см. Зразки відібраного бетону тверднули в умовах промислового об'єкту, а також в нормальних умовах. Результати випробувань міцності на стиск зразків дисперсно-армованого бетону, які тверднули в умовах понижених додатних температур, показали, що їх середня міцність через 2 доби становить 40,8 МПа, 28 діб тверднення – 80,4 МПа (таблиця 5.1), що відповідає класу за міцністю С55/67 при коефіцієнті варіації 6%. Зразки дисперсно-армованого бетону через 28 діб в нормальних умовах досягнули показників міцності 84,8 МПа (клас за міцністю на стиск С60/75 згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008).

Таблиця 5.1 – Результати випробувань дисперсно-армованого бетону при твердненні в різних температурних умовах

Найменування показника		Значення показника	
		+5...+11°С	+20°С
Осадка конуса, мм		160–180	
Середня густина, кг/м ³		2400-2420	
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	2	40,8	42,8
	7	64,0	66,2
	28	80,4	84,8
Ударна стійкість, Дж/см ³	28	85,2	88,4
Глибина вм'ятини, мм	28	1,1	1,1
Стираність, г/см ²	28	0,28	0,28

Застосування комплексного органо-мінерального модифікатора та дисперсного армування поліпропіленовою фіброю створює можливість одержання однорідних високорухливих сумішей та бетонів проектного класу рухомості бетонної суміші та класу міцності бетону, що забезпечило високу якість технологічної операції вкладання бетону, а також досягнення необхідної міцності в умовах понижених температур. При цьому отримане

бетонне покриття характеризувалося підвищеною ударною в'язкістю та стійкістю до стирання, що зумовило усунення технологічної операції з нанесення топпінгу – влаштування верхнього зміцнюючого шару бетонного покриття (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5 – Влаштування бетонної підлоги у складському приміщенні ТзОВ «Гартекс»

У період 11-12 грудня 2019 р. проведено випробування модифікованих бетонів, армованих поліпропіленою фіброю, з маркою за рухомістю бетонної суміші РЗ та проектною міцністю на стиск 101,5 МПа (клас бетону за міцністю С60/75) для бетонування промислової підлоги та перекриття при реконструкції з надбудовою четвертого поверху комунального некомерційного підприємства «4 міська клінічна лікарня м. Львова» (м. Львів вул. Мушака 54) (рисунок 5.6). При цьому було вирішено технологічні завдання із забезпечення нормативних показників стійкості бетонної суміші, одержання запроектованої міцності, ударної стійкості (додаток Б). Бетонування промислової підлоги з використанням високоміцних дисперсно-армованих бетонів, модифікованих органо-мінеральною добавкою, проводили в умовах понижених додатних температур в діапазоні 1–4 °С. При цьому досліджували рухомість бетонної суміші кожної партії та виготовляли зразки-куби, які тверднули в умовах бетонування при понижених додатних

температурах, а також в нормальних умовах. Загальний об'єм вкладеного бетону склав 30 м³.



а



б

Рисунок 5.6 – Бетонування підлоги (а) та перекриття (б) на комунальному некомерційному підприємстві «4 міська клінічна лікарня м. Львова»

Бетонування промислової підлоги та перекриття проводили з використанням високоміцного фібробетону номінального складу В:П:Щ=1:1,2:2,3 на основі портландцементу ПЦ І-500-Н (витрата портландцементу – 430 кг на 1 м³ бетонної суміші). Модифікування бетону здійснювали органо-мінеральною добавкою на основі метакаоліну, аеросилу та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу (BASF Glenium ACE 430). Дозування бетону поліпропіленовою фіброю становило 1 мас.%. Результати випробувань високоміцного дисперсно-армованого бетону наведені в таблиці 5.2.

Як показали результати випробувань, модифікований дисперсно-армований бетон характеризується сповільненим набором міцності в умовах понижених додатних температур порівняно з бетоном, що твердне в нормальних умовах. Так, міцність на стиск модифікованого дисперсно-армованого бетону становить 69,4–73,3 % міцності бетону у нормальних умовах. При цьому модифікований фібробетон характеризується швидким набором міцності – показник питомої міцності становить 0,52 в умовах

понижених температур та 0,55 в нормальних умовах. За показниками міцності на стиск в проектному віці дисперсно-армований бетон, модифікований органо-мінеральною добавкою, відповідає класу за міцністю С 60/75. Ударна стійкість бетонного покриття, визначена за ДСТУ Б В.2.7-57-96, становить 20 кг.

Таблиця 5.2 – Результати випробувань високоміцного дисперсно-армованого бетону

Найменування показника		Значення показника	
Осадка конуса, см		13-15	
Середня густина, кг/м ³		0,35-0,5	
Середня густина, кг/м ³		2400-2450	
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	нормальні умови	2	55,6
		7	77,4
		28	101,5
	при температурі +1...+4°С	2	38,6
		7	51,4
		28	74,4
Водопоглинання, % за масою		1,9-2,4	
Ударна міцність, кг		20	

Використання дисперсного армування з застосуванням дисперсних поліпропіленових волокон та органо-мінерального модифікатора дало можливість одержати бетонні суміші з необхідними технологічними показниками та високоміцних бетонів на їх основі з підвищеною стійкістю до ударних дій для бетонування промислових підлог.

5.2. Техніко-економічні показники високоміцних дисперсно-армованих бетонів при влаштуванні промислових підлог

Розрахунок економічної ефективності промислового впровадження високоміцних дисперсно-армованих бетонів при виготовленні промислових підлог проводили з допомогою програмного комплексу АВК-5, застосовуючи типову методику визначення економічної ефективності капітальних вкладень (додаток В). Запропонована технологія бетонування промислової підлоги на ТзОВ «Гартекс» базується на використанні розроблених високоміцних дисперсно-армованих бетонів, що забезпечує високу якість вкладання за рахунок підвищеної рухливості, однорідності бетонної суміші, скорочення термінів будівництва та швидке введення в експлуатацію за рахунок прискореного набору міцності, а також довговічність.

Застосування органо-мінерального модифікатора та дисперсного армування низькомодульною фіброю забезпечує одержання високоміцних дисперсно-армованих бетонів з підвищеною ударною в'язкістю, що визначає експлуатаційну довговічність бетонного покриття. Область застосування даної технології поширюється на влаштування промислових підлог, реконструкцію перекриття.

В якості базового варіанту прийнята технологія вкладання бетонної підлоги з використанням бетону класу С32/40 основі портландцементу ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 ПрАТ „Волинь-цемент” при подачі суміші бетононасосом. Новий варіант передбачає використання високоміцного дисперсно-армованого бетону, модифікованого органо-мінеральною добавкою, класу за міцністю С60/75, що забезпечує прискорення набору міцності ($f_{cm2}=43,8$ МПа, показник питомої міцності $f_{cm2}/f_{cm28}= 0,55$) та одержання високої проектної міцності бетону ($f_{cm28}=80,2$ МПа) і створює можливість зменшення трудомісткості бетонних робіт за рахунок уникнення технологічної операції з

укріплення верхнього шару («залізнення»), а також можливості зменшення товщини шару бетонної підлоги. Основні техніко-економічні показники базового та пропонованого варіанту наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахунок ефективності застосування високоміцного фібробетону для влаштування промислових підлог

Стаття витрат	Одиниця виміру	Базовий варіант		Новий варіант	
		Кількість	Загальна вартість, грн.	Кількість	Загальна вартість, грн.
Улаштування ущільнених трамбівками підстиляючих щебневих шарів	м ³	400	262287	400	262287
Приготування важкого бетону на щебені	100 м ³	1,5	271 856	1,05	229 113
Улаштування підстиляючих бетонних шарів	м ³	150	176985	150	176985
Залізнення цементних покриттів	100 м ²	15	7379	-	-
Шліфування бетонних або металоцементних покриттів	100м ²	15	29499	-	-
Прямі витрати по кошторису	грн		748006		668 385
Всього по кошторису	грн		832092		722 410
<u>Економічний ефект:</u>					
<ul style="list-style-type: none"> • на 1 м² підлоги • при загальному об'ємі виробництва 1500 м² 				73,1 грн	
				109,68 тис. грн	

Ефективність від впровадження розроблених високоміцних дисперсно-армованих бетонів на ТзОВ «Гартекс» для промислової підлоги складає 73,1 грн. на 1 м² бетонної підлоги, що при площі бетонування 1500 м² забезпечує економічний ефект 109,68 тис. грн. порівняно з базовим варіантом влаштування підлоги.

Висновки до розділу

1. Здійснено апробацію модифікованих високоміцних бетонів, армованих дисперсною низькомодульною поліпропіленовою фіброю, для промислової підлоги на ТзОВ «Гартекс» (вул. Буйка, м. Львів) з вирішенням завдання одержання необхідних технологічних властивостей бетонної суміші, міцнісних характеристик, ударної в'язкості та стираності бетонного покриття.

2. Розроблені оптимальні склади високоміцних бетонів, армованих дисперсними поліпропіленовими волокнами, використано для бетонування промислової підлоги та перекриття на комунальному некомерційному підприємстві «4 міська клінічна лікарня м. Львова» по вул. Мушака. При цьому вирішено технологічні завдання забезпечення рухливості та однорідності суміші, а також необхідної міцності, в тому числі в умовах понижених температур та ударної стійкості бетону.

3. На ТзОВ «Гартекс» проведена промислова апробація високоміцних дисперсно-армованих бетонів. Питомий економічний ефект від впровадження розроблених дисперсно-армованих бетонів для промислової підлоги на ТзОВ «Гартекс» складає 73,1 грн. на 1 м² бетонної підлоги, що при площі влаштування 150 м² забезпечує економічний ефект 109,68 тис. грн. порівняно з базовим варіантом влаштування підлоги.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання високоміцних бетонів з підвищеною ударною в'язкістю для промислових підлог шляхом модифікування орґано-мінеральними добавками, що містять полікарбосилатний суперпластифікатор та ультрадисперсні силікатні мінеральні добавки, а також дисперсним армуванням низькомодульними поліпропіленовими волокнами.

2. Встановлено, що модифікування портландцементу орґано-мінеральними добавками на основі полікарбосилатного суперпластифікатора, мікро-, нанокремнезему забезпечує одержання високорухливих систем при суттєвому водоредукуючому ефекті $\Delta V/C=42,4\%$. Використання високодисперсних мінеральних добавок визначає підвищення водоутримувальної здатності та забезпечує зниження усадкового тріщиноутворення. Введення орґано-мінеральної добавки суттєво впливає на кінетику тверднення портландцементу і визначається у прискоренні гідратаційних процесів на ранніх стадіях структуроутворення за рахунок високого водоредукуючого ефекту полікарбосилатів, оптимізації упакування частинок із забезпеченням початкової щільності, проходження ранніх пуцоланових реакцій. Показники питомої міцності $f_{cm2}/f_{cm28}=0,53$ та міцності через 28 діб ($f_{cm28}=83,3$ МПа) вказують на отримання швидкотверднучих високоміцних систем.

3. Методами фізико-хімічного аналізу визначено особливості процесів раннього структуроутворення, формування мікроструктури та міцності каменю на основі модифікованої цементної матриці. Використання комплексного модифікатора сприяє прискоренню гідратаційних процесів у ранній період структуроутворення з формуванням щільної мікроструктури цементної матриці за рахунок утворення волокнистих низькоосновних

гідросилікатів кальцію, що визначає приріст ранньої та пізньої міцності цементуючої системи.

4. Показано, що часткова заміна золи-винесення ультрадисперсними мінеральними добавками з підвищеною поверхневою енергією у складі в'язучої системи, використання полікарбонатного суперпластифікатора, а також армування структури інженерних композитів дисперсними поліпропіленовими волокнами в оптимальній кількості сприяють підвищенню міцності на стиск на 25–28 %, на згин – на 20–22 % порівняно з композитами на основі бінарної в'язучої системи портландцемент:зола-винесення. Розроблені дисперсно-армовані інженерні цементуючі композити характеризуються проектною міцністю на стиск 83,3 МПа, міцністю на розтяг при згині – 19,7 МПа, критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень при нерівноважних випробуваннях $1,58 \text{ МПа/м}^{0,5}$, деформаціями усадки 0,34 мм/м.

5. Встановлено, що позитивний вплив дисперсного армування, на стадіях структуроутворення і навантаження бетону починає реалізовуватися після досягнення об'ємної концентрації фібри, що обумовлює початкову об'ємно-просторову зв'язність фіброструктури. Для фібри з співвідношенням довжини до діаметру близько 102 оптимальна концентрація становить 1-1,5%. Досліджено вплив різних видів фібри, які при введенні в бетонну суміш підвищують ударну витривалість композитів в 8–10 раз порівняно з неармованими композитами.

6. За допомогою двофакторного математичного планування проведено моделювання властивостей високоміцних бетонів. Показано, що використання комплексного органо-мінерального модифікатора на основі мікрокремнезему, аеросилу та полікарбонатного пластифікатора у поєднанні з поліпропіленовими волокнами забезпечує отримання високоміцних фібробетонів класу за міцністю С50/67 та С60/75 та при витраті портландцементу 350 та 400 кг на 1 м^3 бетонної суміші відповідно. За показниками питомої міцності $f_{cm2}/f_{cm28} = 0,50-0,51$ розроблені дисперсно-армовані бетони відносяться до бетонів з швидким наростанням міцності.

7. Досліджено комплекс будівельно-технічних властивостей розроблених високоміцних бетонів, що визначає їх експлуатаційну надійність. Встановлено, що бетони характеризуються підвищеною щільністю - водопоглинання за масою - 1,9-2,1 мас.%, марка за водонепроникністю W20, та деформативними характеристиками - модуль пружності 61,7 –68,5 ГПа, призмova міцність 78,6-82,7 МПа. Деформації усадки розроблених високоміцних бетонів становлять 0,21-0,32 мм/м. Показано, що введення фібри до високоміцних бетонів сприяє зниженню стираності на 30,4–34,3 %.

8. Встановлено, що при комплексному модифікуванні структури цементної матриці бетону та дисперсному армуванні низькомодульними волокнами відбувається зростання в'язкості руйнування бетону, підвищення стійкості до тріщиноутворення, ударних динамічних впливів (ударна в'язкість 75–80 Дж/см³). Значне поглинання енергії ударів модифікованої матриці при застосуванні дисперсної фібри визначається зниженням дефектів поверхневого шару, ущільненням структури та створенням тривимірного зшивання структури.

9. Проведено промислову апробацію розроблених модифікованих високоміцних дисперсно-армованих бетонів для влаштування промислових підлог складського приміщення (вул. Буйка, м. Львів) в кількості 60 м³ та при реконструкції комунального некомерційного підприємства «4 міська клінічна лікарня м. Львова» (м. Львів вул. Мушака 54). Результати промислового впровадження підтверджують перспективність використання високоміцних бетонів, питомий економічний ефект від впровадження розроблених ефективних бетонів становить 73,1 грн. на 1 м² бетонної підлоги, загальний ефект від впровадження - 109,68 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз механізмів поетапної організації мікроструктури бетонів / О. О. Коробко, В. Г. Суханов, В. М. Вировой, Р. В. Пархоменко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2013. Вип. 25. С. 76–83.
2. Баженов Ю. М., Демьянова О. О., Калашников В. И. Модифицированные высокопрочные бетоны. М. : Издательство Ассоциация строительных вузов, 2006. 368 с.
3. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ, 2011. 529 с.
4. Баженов Ю. М., Алимов Л. А., Воронин В. В. Наномодифицированные цементные бетоны. М. : Изд-во АСВ, 2017. 198 с.
5. Батраков В. Г. Модификаторы бетона – новые возможности // Первая всероссийская конференция по проблемам бетона и железобетона «Бетон на рубеже третьего тысячелетия». Кн. 1. 2001. С. 184–208.
6. Беленцов Ю. А., Лесовик В. С., Ильинская Г. Г. Повышение надежности конструкций управлением параметрами композиционного материала // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 90–93.
7. Бліхарський З. Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2008. 108 с.
8. Большаков В. И., Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Основы теории и методологии многопараметрического проектирования составов бетона. Днепропетровск: ПГАСА, 2006. 360 с.
9. Боровских И. В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05. Казань, 2009. 20 с.
10. Будівельне матеріалознавство: підручник / П. В. Кривенко, К. К. Пушкарьова, В. Б. Барановський та ін. Київ : Видавництво Ліра-К, 2015. 624 с.

11. Бутт Ю. М., Тимашев В. В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М. : Высш. шк., 1973. 500 с.
12. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсно-армованих цементуючих систем / М. А. Саницький, У. Д. Марущак, І. І. Кіракевич, М. С. Стечишин // Будівельні матеріали і вироби. 2015. № 1. С. 10–14.
13. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони : монографія / Л. Й. Дворкін, Є. М. Бабич, В. В. Житковський, О. М. Бордюженко, С. В. Філіпчук, Д. В. Кочкар'юв, І. В. Ковалик. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.
14. Високорухомі шлаколужні бетони з підвищеною ранньою міцністю / П. В. Кривенко, І. І. Руденко, О. М. Петропавловський, О. П. Константиновський // Науковий вісник будівництва. 2018. Т. 94. № 4. С. 117–124.
15. Выровой В. Н., Фиц С. Анализ механизмов формирования макроструктурных параметров и изучение их влияния на сопротивление бетона ударным нагрузкам // Вісник ОДАБА. 2003. № 9. С. 45–53.
16. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками для дорожного и аэродромного строительства / А. Г. Шургая, И. П. Гамеляк, Я. Н. Якименко и др. // Автомобильные дороги и мосты. 2015. № 2 (16).
17. Влияние дисперсного армирования на прочностные и деформативные характеристики мелкозернистого бетона / С. В. Клюев, А. В. Клюев, А. Д. Абакаров, Е. С. Шорстова, Н. Е. Гафарова // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 7(75). С. 66–75.
18. Влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на структурообразование цементных паст / Л. М. Добшиц, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов // Фундаментальные исследования. 2014. № 5 (часть 5). С. 945–948.

19. Вплив 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. 2012. № 43. С. 133–138.
20. Волков И. В., Газин Э. М. Фибробетон. Особенности и перспективы применения в строительных конструкциях // Стройпрофиль, 2003. № 2. С. 67–69.
21. В'яжучі речовини / Р. Ф. Рунова, Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, Ю. Л. Носовський. Київ : Основа, 2012. 448 с.
22. Гамеляк І. П. Про ефективність використання високоміцного цементобетону для будівництва жорстких покриттів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. (81). 2011. С. 30–39.
23. Горшков В. С., Тимашев В. В., Савельев В. Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М. : Выс. шк., 1981. 335 с.
24. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шпилюк П. С. Бетони і будівельні розчини : підручник. Київ : Основа, 2016. 568 с.
25. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язання будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.
26. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Основи бетонознавства. Київ : Основа, 2007. 45 с.
27. Деревянко В. Н. Влияние дисперсного армирования на деформационные свойства покрытий на основе минеральных вяжущих // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. Дніпропетровськ: Gaudeamus, 2000. № 6. С. 34–41.
28. Деревянко В. Н., Скидан Л. В., Али М. Н. Определение эффективности добавок пластификаторов отечественного производства // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2007. №11. С. 28–35.
29. Державна служба статистики України. Обсяг виробленої будівельної продукції за видами у 2010–2020 роках. Київ, 2021. URL:

<http://www.> http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2014/bud/ovb/ovb_u/ovbp_vyd_u.htm (дата звернення: 08.02.2021).

30. Добшиц Л. М., Кононова О. В., Анисимов С. Н. Кинетика набора прочности цементного камня с модифицирующими добавками // Цемент и его применение. 2011. С. 104–107.

31. Довженко О. О., Юрко І. А., Кравченко В. В. Застосування фібробетону в Україні. Властивості дисперсноармованих бетонів // Научно-техн. сб. Коммунальное хозяйство городов. № 90. 2009. С. 267–272.

32. Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М. Досвід застосування фібробетону у будівництві // Збірник наукових праць ДЕТУТ : Транспортні системи і технології. Вип. 24. Київ : ДЕТУТ, 2014. С. 5–11.

33. Дослідження сумісності роботи мінеральних добавок в складі високоміцних сульфатостійких бетонів / А. С. Приймаченко, Л. О. Шейніч, К. К. Пушкарьова, С. І. Гедулян // Наука і будівництво. № 2. 2015. С. 2–4.

34. Дослідження тріщиностійкості важких бетонів та пінобетонів, армованих поліпропіленовою фіброю, для дорожнього будівництва / С. Й. Солодкий, В. О. Каганов, І. Б. Горніковська, Ю. В. Турба // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. № 4/5 (76). С. 40–46.

35. Дослідження швидкотверднучих бетонів, модифікованих комплексною нанодобавкою / У. Марущак, Н. Сидор, О. Мазурак, Р. Мазурак // Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2018. № 19. С. 90–93.

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

37. ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Суміші бетонні та бетон. Технічні умови. Київ, 2010. 17 с.

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

39. К вопросу оценки трещиностойкости высокопрочного фибробетона с полиамидными волокнами / В. С. Демьянова, Р. И. Макридин,

Е. Ю. Михеенко, А. С. Мишин // Изв. вузов. Строительство. 2004. № 3. С. 27–31.

40. Климов Ю. А., Паладий В. В., Голубничий Г. А. Опыт применения высокопрочного бетона в зарубежном строительстве. Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. Київ : НДІБК, 2003. 59(1). С. 52–56.

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

42. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов Т. 1 / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, Л. В. Трикоз и др. Київ : Наукова думка, 2011. 330 с.

43. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження в будівництво / Р. Ф. Рунова, В. І. Гоц, М. А. Саницький та ін. К. : УВПК „ЕксОб”, 2008. 360 с.

44. Коробко О. О., Вировой В. М., Суханов В. Г., Закорчемний Ю. О. Стійкість бетонів при періодичних зовнішніх впливах // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. № 181. С. 65–74.

45. Коротышевский О. В. Полы из сталефибробетона и пенобетона // Строительные материалы. 2000. №3. С. 16–17.

46. Коротких Д. Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 96–99.

47. Кочевих М. О., Смілянець Є. Ю., Стригун Д. С. Підвищення тріщиностійкості бетонних елементів брукування // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Луцьк, 2013. Вип. 43. С. 122–125.

48. Кривенко П. В. Прогнозная оценка надежности и долговечности цементного камня. Будівельні матеріали та вироби. № 5. 2003. С. 13–15.

49. Кривенко П. В., Петропавловский О. Н., Лакуста С. О. Роль технологических факторов в формировании структуры и свойств

шлакощелочных бетонов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2015. Вип. 57. С. 233–242.

50. Ксеншкевич Л. Н., Барабаш І. В., Гаращенко Д. П. Механоактивация портландцементна – способ активного управління прочностью бетона / Вісник ОДАБА. № 65. 2016. С. 120–124.

51. Лезов В. Ю. Технология и свойства мелкозернистых бетонов, армированных синтетическими волокнами : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05. ЛИСИ. Л., 1991. 20 с.

52. Лушнікова Н. В. Літі високоміцні бетони з добавкою поліфункціонального модифікатору на основі суперпластифікатору та метакаоліну : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Одеса, 2006. 18 с.

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

54. Марущак У., Саницький М., Сидор Н. Дослідження стійкості наномодифікованих дисперсно-армованих бетонів до ударних навантажень. 7 Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». 2018. С. 203–208.

55. Марущак У., Саницький М., Сидор Н. Наномодифіковані дисперсно-армовані будівельні композити. Міжнародний семінар «Моделювання і оптимізація будівельних композитів». 2018. С. 100–102.

56. Марущак У., Сидор Н., Новосад П., Бобецький Ю. Дисперсно-армовані цементуючі композити. Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах». 2018. С. 62–63.

57. Марущак У., Сидор Н., Маргаль І., Солтисік Р. Модифіковані фібробетони для промислових підлог // 8 Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». 2019. С. 164–166.

58. Материалы, армированные волокнами. Пер. с англ. Л. И. Сычевой, А. В. Воловика / М. : Стройиздат, 1982. 180 с.
59. Мирошниченко К. К. Научные и практические основы технологии получения высококачественных однородных дисперсно-армированных составов. Днепропетровск : ПГАСА, 2011. 250 с.
60. Мишутин А.В. Развитие научных основ повышения долговечности бетонов : Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. Одесса: ОГАСА, 2009. 45с.
61. Модифицированные бетоны повышенной ударной выносливости / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, М.Б. Давлетшин и др. // Строительные материалы. 2002. № 5. С. 24–25.
62. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформативными характеристиками / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд, Г. С. Кардумян, В. Г. Дондуков // Бетон и железобетон. 2006. № 2. С. 2–7.
63. Несветаев Г. В. Оценка эффективности суперпластификаторов // Дни современного бетона : Междунар. науч.-практ. конф. Запорожье : ООО „Будиндустрия ЛТД”, 2012. С. 19–27.
64. Обоснование выбора солей-электролитов для содержащих кальцит и стекловолокно комплексных добавок в гидроизоляционные сухие смеси / А. А. Плугин, Т. А. Костюк, М. Г. Салия, Д. А. Бондаренко, Н. Н. Партала // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка, 2012. С. 105–108.
65. Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції та модифіковані високоміцні бетони на їх основі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук за спец. 05.23.05. Львів. 2019. 20 с.
66. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, Л. В. Трикоз и др. : В 3-х т. Київ : Наук. Думка, 2012.
67. Патент на корисну модель № 109644 Україна, МПК С04В 7/00 С04В 7/13. В'яжуче / Марущак У. Д., Саницький М. А., Позняк О. Р., Сидор

Н. І., Мельник В. М. (Україна); Заявл. 19.02.2018; Опубл. 10.07.2018, бюл. №13.

68. Парфенов А. В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05. Уфа, 2004. 19 с.

69. Пухаренко Ю. В., Голубев В. Ю. О вязкости разрушения фибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2008. №3(16). С. 80–83.

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

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

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

73. Саницький М. А., Кропивницька Т. П., Іващишин Г. С., Русин Б. Г. Концепція низьковуглецевого розвитку в цементній промисловості. Строительные материалы и изделия (5-6). 2017. С. 24–27.

74. Саницький М. А., Кропивницька Т. П., Гев`юк І. М., Котів М. В. Бетони поліфункціонального призначення на основі композиційних цеолітвмісних портландцементів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. 2016. № 844. С. 188–193.

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

76. Саницький М. А., Позняк О.Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології у будівництві. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. 236 с.
77. Саницький М. А., Соболь Х. С., Марків Т. Є. Модифіковані композиційні цементи. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. 132 с.
78. Сидор Н. Дослідження властивостей інженерних цементуючих композитів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 162–168.
79. Сидор Н. Ефективні інженерні цементуючі композити для мінімалізації забруднення навколишнього середовища // I Всеукраїнська науково-практична конференція «Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві». 2018. С. 28.
80. Сидор Н., Марущак У., Маргаль І. Вплив компонентного складу на властивості інженерних цементуючих композитів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2018. № 888. С. 127–132.
81. Сидор Н., Проць Є. Модифіковані інженерні цементуючі композити. II Науково-практична конференція «Теорія і практика актуальних наукових досліджень». 2020. С. 139–142.
82. Соболь Х. С., Марків Т. Є., Петровська Н. І., Гуняк О. М. Активність полідисперсних мінеральних компонентів та їх роль у формуванні структури та міцності цементів / Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. Вип. 912. 2019. С. 175-182.
83. Солодкий С. Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2008. 144 с.
84. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю. Наукові нотатки. № 46. 2014. С. 512–515.

85. Стечишин М. С. Самоущільнювальні бетони, армовані дисперсними волокнами: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05. Львів, 2016. 22 с.
86. Суханевич М. В. Порівняння ефективності застосування різних вуглецевих нанодобавок для модифікації цементних композиційних матеріалів // *Строительные материалы и изделия*. 2017. № 3-4. С. 46–49.
87. Суханов В. Г., Выровой В. Н., Коробко О. А. Структура материала в структуре конструкции. Одесса: Полиграф, 2016. 244 с.
88. 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. 219–225.
89. Троян В. В., Товстоніс В. В. Поліфракційність заповнювача як технологічний фактор формування структури високоміцного бетону. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. 47. 2008. С. 661–670.
90. 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.
91. Фиц С. Бетон в условиях ударных воздействий. Lublin : Politechnika Lubelska, 2017. 270 с.
92. Шишко Н. С., Корх О. І., Сопов В. П. Застосування методу щільної упаковки компонентів при проектуванні складу бетону // *Будівельні матеріали і виробы*. 2018. № 1. С. 21–25.
93. *Advanced civil infrastructure materials*. Edited by H. C. Wu. Cambridge : Woodhead publishing limited. 2006. 375 p.
94. Aïtcin P. C. *High performance concrete*. CRC press, 2011. 624 p.
95. Analysis of plasticizer effectiveness during alkaline cement structure formation / P. Kryvenko, R. Runova, I. Rudenko, V. Skoryk, V. Omelchuk // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4(6). P. 35–41.

96. Ayub T., Shafiq N., Nuruddin F. M. Effect of chopped basalt fibers on the mechanical properties and microstructure of high performance fiber reinforced concrete / *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. 587686.
97. Ayub T., Khan S. U., Memon F. A. Mechanical characteristics of hardened concrete with different mineral admixtures: a review. *The Scientific World Journal*. Vol.1. 2014. 875082.
98. Badr A., Ashour A. F., Platten A. T. Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete // *International Journal of Impact Engineering*. 2006. No 32 (11). 107–120.
99. Bindiganavile V., Banthia N. Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading? part 1: bond-slip response. *ACI Materials Journal*. 98(1). 2001. P. 10–16.
100. Chasioti S. G., Vecchio F. J. Effect of fiber hybridization on basic mechanical properties of concrete // *ACI Materials Journal*. Vol. 114. No. 3. 2017.
101. Chethan V. R., Ramegowda M., Manohara H. E. Engineered Cementitious Composites – A review // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015. № 2/5. P. 144–149.
102. Gholizadeh H., Dilmaghan S. The study of mechanical properties of high strength concrete containing steel and polypropylene fibers // *Civil Engineering Journal*. Vol. 4. No. 1. 2018. P. 221–230.
103. Design of monolithic concrete ground floors / A. D. Bantias, I. A. Tegos, T. A. Chrysanidis, A. M. Athanatopoulou // *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2014. Vol. 8. No. 7. P. 833–845.
104. Design of rapid hardening quaternary zeolite-containing Portland composite cements / M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, T. Kruts, O. Horpynko, I. Geviuk // *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 761. P. 193–196.
105. Development of Carbon Fiber-modified Electrically Conductive Concrete for Implementation in Des Moines International Airport / A. Sassani, H. Ceylan, S. Kim, A. Arabzadeh, P. C. Taylor, K. Gopalakrishnan. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 8. 2018. P. 277–291.

106. Development of component composition of engineered cementitious composites / N. Sydor, U. Marushchak, S. Braichenko, B. Rusyn // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. LNCE 100. P. 459–465.
107. Development of nanomodified rapid hardening fiber-reinforced concretes for special-purpose facilities / U. Marushchak, M. Sanytsky, S. Korolko, Y. Shabatura, N. Sydor // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. No6 (92). P. 34–41.
108. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers / [Yu K., Y. Jiangtao, J.-G. Dai et al.] // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 158. P. 217–227.
109. Determination of mechanical characteristics for fiber-reinforced concrete with straight and hooked fibers / Z. Marcalikova, R. Cajka, V. Bilek, D. Bujdos, O. Sucharda // *Crystals*. 2020. No 10. P. 545.
110. Dynamic compressive mechanical behaviour and modelling of basalt-polypropylene fibre-reinforced concrete / Fu Q., Niu D., Zhang J. Et al. // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. No.18. P. 914–927.
111. Effects of polypropylene fibre and strain rate on dynamic compressive behaviour of concrete / Chen M., Ren C., Liu, Y., Yang, Y., Wang, E., Liang, X. // *Materials*. 12. 2019. 1797.
112. Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage / J. Zhang, Ch. Gong, Z. Guo, M. Zhang // *Cement and Concrete Research*. 2009. No. 39. P. 303–312.
113. Features of building composites designing for their exploitation in extreme conditions / V. S. Lesovik, R. S. Fediuk, E. S. Glagolev et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 456(1): 012054
114. Fracture properties of high-strength concrete obtained by direct modification of structure / S. Solodkyy, T. Markiv, K. Sobol, O. Hunyak // *MATEC Web of Conference*. 116. 2017. 01016.
115. Gojrv Odd E. Durability design of concrete structures in severe environments. CRC Press, 2014. 270 p.

116. Gholizadeh H., Dilmaghani S. The study of mechanical properties of high strength concrete containing steel and polypropylene fibers / *Civil Engineering Journal*. Vol. 4. 2018. No.1. P. 221–230.
117. Hedebratt J. Industrial fibre concrete floors // *Bulletin* 113. 2012. 130 p.
118. Herega A. N. Physical aspects of self-organization processes in composites. The structure and interaction of inner boundaries // *Nanomechanics Science and Technology*. 2013. V. 4. P. 17–20.
119. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties / N. Yermak, P. Pliya, A-L. Beaucour, A. Simon, A. Noumowe // *Construction and Building Materials*. Vol. 132. 2017. P. 240–250.
120. Influence of the new method of nanosilica addition on the mechanical properties of cement mortars / E. Horszczaruk, E. Mijowska, K. Cendrowski, P. Sikora // *Cement Wapno Beton*. 2014. No 8. P. 308–316.
121. Interaction of mineral and polymer fibers with cement stone and their effect on the physical-mechanical properties of cement composites / A. Plugin, T. Kostiuk, O. Plugin, D. Bondarenko, Y. Sukhanova, N. Partala // *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2017. No 31. P. 59–68.
122. Jain K. Steel fiber s minimum shear reinforcement in reinforced concrete beams. *Magazine of Concrete Research*. Vol. 2. No. 18. 2013. P. 92-97.
123. Kropyvnytska T., Rucinska T., Ivashchyshyn H., Kotiv R. Development of eco-efficient composite cements with high early strength // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. P. 211–218.
124. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucinska T., Rykhlitska O. Development of nanomodified rapid hardening clinker-efficient concretes based on composite portland cements // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 6/6 (102). C. 38–48.
125. Kumar S. V., Santhanam M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. *Indian Concrete Journal*, 2003. 77(9). P. 1324–1331.

126. Laplante P., Aïtcin P.-C., Vezina D. Abrasion Resistance of Concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 3. No. 1. 1991. P. 19–28.
127. Li V. C. On Engineered Cementitious Composites (ECC). A review of the material and its applications // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. Vol. 1. No. 3. P. 215–230.
128. Lopez M., Kahn L. F., Kurtis K. E. High-strength self-curing low-shrinkage concrete for pavement applications. *International Journal of Pavement Engineering*. No. 11(5). 2010. P. 333–342.
129. Luo X., Sun W., Chan S. Steel fiber reinforced high-performance concrete: a study on the mechanical properties and resistance against impact // *Material Structure*. 34(3). 2001. P. 144–149.
130. 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.
131. Marar K., Eren O., Celik T. Relationship between impact energy and compression toughness energy of high strength fiber-reinforced concrete // *Materials Letters*. 47(4). 2001. P. 297–304.
132. Marcalikova Z., Racek M., Mateckova P., Cajka R. Comparison of tensile strength fiber reinforced concrete with different types of fibers // *Procedia Structural Integrity*. 2020. № 28. P. 950–956.
133. Markiv T., Sobol K., Petrovska N., Hunyak O. The Effect of porous pozzolanic polydisperse mineral components on properties of concrete // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. № 47. P. 275–282.
134. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction // *SSP – Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 12. Issue 2. P. 107–112.
135. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction. XVI International Scientific Conference Košice-Lviv-Rzeszów. 2017. P. 1–2.

136. Mehta K. P. Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete international*. 23(10). 2001. P. 61–66.
137. Modified fiber reinforced concrete for industrial floors / U. Marushchak, N. Sydor, S. Braichenko, I. Margal, R. Soltysik // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. №708/1. 012094.
138. Modified fine-grained concrete for floor heating system / L. Parashchuk, V. Kochubei, P. Novosad, B. Seredyuk, A. Hamarnik // *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 8. No 1. P. 133–141.
139. Murali G., Santhi A. S., Ganesh G. M. Impact resistance and strength reliability of fiber reinforced concrete using two parameter weibull distribution. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 9(4). 2014. P. 554–559.
140. Nano-modified ultra-rapid hardening Portland cement compositions for high strength concretes / M. Sanytsky, U. Marushchak, Y. Olevych, Y. Novytskyi // *CEE 2019 Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. P. 392–399.
141. Nili M., Afroughsabet V. Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete // *International Journal of Impact Engineering*. 2010. 37(8). P. 879–886.
142. Ondova M., Stevulova N., Estokova A. The study of the properties of fly ash based concrete composites with various chemical admixtures // *Procedia Engineering*. 2012. № 42. P.1863–1872.
143. Peculiarities of nanomodified Portland cement systems structure formation / U. Marushchak, M. Sanytsky, O. Pozniak, O. Mazurak // *Chemistry and Chemical Technology*. 2019. № 13/4. P. 510–517.
144. Plank J. Concrete Admixtures – Where Are We Now and What Can We Expect in the Future? // *Proceedings of the 19th International Conference on Building Materials*. Weimar, 2015. Band 2. P. 11–17.
145. Rajczyk M., Rajczyk P. Multilayer concrete industrial flooring solutions analysis // *Architecture and Engineering*. Vol. 2. Issue 4. 2017. P. 48–55.

146. Research of nanomodified engineered cementitious composites / U. Marushchak, M. Sanytsky, N. Sydor, S. Braichenko // IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties. 2018. Part 2. 02CBM16.
147. 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.
148. Sakulich A. R., Li V. C. Nanoscale characterization of engineered cementitious composites (ECC) // Cement and Concrete Research. 2011. No 41. P. 169–175.
149. Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete / D. L. Nguyen, G. S. Ryu, K. T. Koh, D. J. Kim // Compos. Vol. 58. 2014. P. 279–292.
150. Shannag M. J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume // Cement and Concrete Composites. 22(6). 2000. P. 399–406.
151. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete // Reported by ACI Committee 363. ACI 363R-92 (Reapproved 1997), p. 363R-2.
152. Sydor N., Marushchak U. Modified fiber-reinforced concrete and the sustainability concept. International Seminar on Circular Economy and Sustainability in Civil Engineering (ISCESCE). 2020. P. 29.
153. Szewczenko W., Kotsay G. Effect of silicate additives on the impact strength of cement pastes / Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 47. P. 468–473.
154. The effect of added finely dispersed calcite on the corrosion resistance of cement compositions / O. S. Borziak, A. A. Plugin, S. M. Chepurna, O. V. Zavalniy, O. A. Dudin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 708. 012080.
155. The effect of particulate reinforcement on strength and deformation characteristics of fine-grained concrete / S. V. Klyuev, A. V. Klyuev, A. D. Abakarov et al. // Magazine of Civil Engineering. № 7. 2017. P. 66 – 75.

156. Tolmachov S., Belichenko O., Zakharov D. Influence of additives on flexural strength of concrete. *MATEC Web of Conference*. 2017. 116. 01019.
157. Tóth M., Juhász K. P., Pluzsik A. Effect of Mixed Fibers on the Ductility of Concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 29. No. 9. 2017. P. 1–12.
158. Toutanji H., Neil S., Bayasi Z. Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. *Cement and concrete research*. 1998. 28(7). P. 961–968.
159. Transient dynamic behavior of polypropylene fiber reinforced mortar under compressive impact loading / H. Zhang, Y. Liu, H. Sun, S. Wu // *Construction Building Materials*. 2016. No. 111. P. 30–42.
160. Wang H. L., Zhong Y. H. Research status and proposals of basalt fiber reinforced concrete // *Advanced Materials Research*. Vol. 834. 2014. P. 730–737.
161. Yu R., Spiesz P., Brouwers H. J. H. Static properties and impact resistance of a green ultra-high performance hybrid fibre reinforced concrete: experiments and modeling. *Construction and Building Material*. No. 6. 2014. P. 158–171.
162. Xie T., Ozbakkaloglu T. Behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete-filled FRP tube columns under axial compression // *Engineering Structures*. 90. 2015. P. 158–171.
163. Zhang W., Chen S., Liu Y. Effect of weight and drop height of hammer on the flexural impact performance of fiber-reinforced concrete // *Construction Building Materials*. 2017. No. 140. P. 31–35.



А К Т

про впровадження у виробництво партії високоміцного дисперсно-армованого бетону з підвищеною ударною в'язкістю для промислових підлог

Ми, нижче підписані, представник ТзОВ «Гартекс» виконроб Кукурузь І.Б. та представники Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., професор Марущак У.Д., аспірант Сидор Н.І. склали даний акт про те, що у листопаді 2020 року проведено випробування дослідної партії дисперсно-армованих бетонних сумішей та бетонів на їх основі з проектним класом міцності С60/75 для бетонування промислової підлоги в складському приміщенні на вулиці Буйка, м. Львів. Для приготування бетонних сумішей застосовували дисперсно-армований бетон на основі портландцементу ПЦ І-500Р-Р ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (витрата портландцементу – 400 кг на 1 м³ бетонної суміші), модифікований суперпластифікатором полікарбосилатного типу та мінеральними добавками на основі мікрокремнезему та аеросилу. Як заповнювачі використано кварцовий пісок Жовківського родовища ($M_{кр}=1,87$) та гранітний щебінь фракції 5-20 мм. Для дисперсного армування в бетонну суміш вводили поліпропіленову фібру в кількості 1 мас.%. Загальний об'єм виготовленого бетону склав 60 м³.

Влаштування промислової підлоги на основі дисперсно-армованих бетонів з використанням модифікованих цементних композицій проводили в умовах тверднення +5 °С). Основними технологічними завданнями при влаштуванні промислової підлоги були забезпечення однорідності та відсутності розшаровуваності бетонної суміші в умовах підвищеної рухливості, одержання необхідних ранньої, проектної міцності, а також підвищеної ударної стійкості затверділого бетону. У результаті випробувань зразків дисперсно-армованого бетону (осадка конуса бетонної суміші становив 150–160 мм) встановлено, що їх середня міцність при стиску в через 2 доби становить 40,8 МПа, через 28 діб тверднення – 80,4 МПа (таблиця), (клас бетону за міцністю на стиск С60/75 згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008), а за показником питомої міцності дані бетони відносяться до бетонів з швидким наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,51$).

Таблиця

**Результати випробувань дисперсно-армованого бетону при твердненні
в різних температурних умовах**

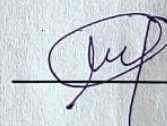
Найменування показника	Значення показника		
	+5°C	+18°C	
Осадка конуса, мм	160–180		
Середня густина, кг/м ³	2400-2420		
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	2	40,8	42,8
	7	64,0	66,2
	28	80,4	84,8
Ударна стійкість, Дж/см ³	28	85,2	88,4
Глибина вм'ятини кульки, мм	28	1,1	1,1
Стираність, г/см ²	28	0,28	0,28

Застосування комплексного модифікатора та дисперсного армування забезпечує одержання однорідних бетонних сумішей та бетонів заданого класу міцності (С60/75) з підвищеною ударною стійкістю, що дозволило досягнути високої якості бетонних робіт в умовах знакозмінних та від'ємних температур, а також створило можливість уникнення проведення додаткової технологічної операції з влаштування зміцнюючого верхнього шару промислового бетонного покриття.

Акт підписали:

Представник ТзОВ «Гартекс»

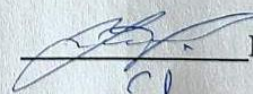
Виконроб



Кукурузь І.Б.

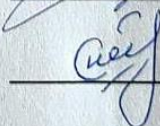
Представники Національного університету "Львівська політехніка"

Професор, д.т.н.



Марущак У.Д.

Аспірант



Сидор Н.І.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
 Директор ТзОВ «Західнафтохімбуд»
 Коваль М.І.



А К Т

про впровадження у виробництво партії
 модифікованого дисперсно-армованого бетону для промислових підлог

Ми, нижче підписані, представник ТзОВ «Західнафтохімбуд» виконроб Кобик В.Й. та представники Національного університету “Львівська політехніка” д.т.н., доцент Марущак У.Д., аспірант Сидор Н.І. склали даний акт про те, що у період листопад-грудень 2019 року проведено випробування дослідної партії дисперсно-армованих бетонних сумішей та бетонів на їх основі з проектним класом міцності С60/75 для бетонування промислової підлоги та перекриття на об’єкті будівництва: «Реконструкція будівлі під створення відділення паліативної допомоги з надбудовою 4-го поверху та прибудовою схової клітки Комунального некомерційного підприємства «4-та міська клінічна лікарня м. Львова» за адресою вул. Мушака 54». Для приготування бетонних сумішей застосовували портландцемент ПЦ І-500Р-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (витрата портландцементу – 430 кг на 1 м³ бетонної суміші) та комплексний органо-мінеральний модифікатор на основі суперпластифікатора полікарбоксилатного типу, алюмосилікатної (метакаолін) та силікатної (аеросил) добавки. Як заповнювачі використано кварцовий пісок Жовківського родовища ($M_{кр}=1,87$) та гранітний щебінь фракції 5-20 мм. Для дисперсного армування в бетонну суміш вводили поліпропіленову фібру в кількості 1 мас.%. Загальний об’єм виготовленого бетону склав 30 м³.

Влаштування промислової підлоги на основі дисперсно-армованих бетонів з використанням комплексного наномодифікатора проводили в умовах нормального тверднення. Основними технологічними завданнями при влаштуванні промислової підлоги були забезпечення однорідності та відсутності розшаровуваності бетонної суміші, одержання необхідних ранньої, проектною міцності, а також підвищеної ударної стійкості затверділого бетону. У результаті випробувань зразків дисперсно-армованого бетону (осадка конуса бетонної суміші становила 120–140 мм) встановлено, що їх середня міцність при стиску в через 1 добу становить 38,8 МПа, через 28 діб тверднення – 101,5 МПа (таблиця), (клас бетону за міцністю на стиск С60/75 згідно з ДСТУ Б В.2.7-

176:2008), а за показником питомої міцності дані бетони відносяться до бетонів з швидким наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,55$).

Таблиця

Результати випробувань дисперсно-армованого бетону

Найменування показника	Значення показника	
Осадка конуса, мм	120-140	
Середня густина, кг/м ³	2400-2420	
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	1	38,8
	2	55,6
	7	77,4
	28	101,5
Ударна стійкість, кг	20	

Застосування комплексного наномодифікатора та дисперсного армування забезпечує одержання однорідних бетонних сумішей та бетонів заданого класу міцності (С60/75) з підвищеною ударною стійкістю, що дозволило досягнути високої якості бетонних робіт, а також створило можливість уникнення проведення додаткової технологічної операції з влаштування зміцнюючого верхнього шару промислового бетонного покриття.

Акт підписали:

Представник ТзОВ «Західнафтохімбуд»
Виконроб

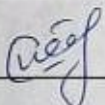
 Кобик В.Й.

Представники Національного університету "Львівська політехніка"

Доцент, д.т.н.

 Марушак У.Д.

Аспірант

 Сидор Н.І.

Локальний кошторис на будівельні роботи № 1-1-1
на улаштування промислової підлоги

Основа: Креслення (специфікації) № Кошторисна вартість 832,092 тис. грн.
Кослторисна трудомісткість 5,97108 тис. люд.-год.
Кошторисна заробітна плата 121,7 тис. грн.
Середній розряд робіт 3,1 розряд

Складений в поточних цінах станом на "13 грудня" 2020 р.

№ п/п	Об'єкти-ванки (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.-год.	
					Всього	заробітної плати	Всього	заробітної плати	в тому числі зачислі за робітної плати	не зайнятих обслуговуванням машин	тих, що обслуговують машини
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ЕН11-2-4	Улаштування ущільнених замбітумовими підстилюючих щелевевих шарів	м3	350	749,39 88,29	129,23 26,53	262287 30902	45231 9288	4,78 1,3014	1673 456,49	
2	Е8-4Б-14	Приготування важкого бетону на шебені, клас В40	100м3	1,5	181237,03 6511,88	4613,89 1592,55	271 856 9768	5921 2389	387,15 75,9284	580,73 113,89	
3	ЕН11-2-9	Улаштування підстилюючих бетонних шарів	м3	150	1179,90 103,06	1,46 0,29	176986 29499	15459 26677	219 44	5,58 0,0139	837 2,09
4	ЕН11-15-7	Шліфування бетонних або металочементних покриттів	100м2	15	1966,57 1778,44	89,51 18,42	29499 2278	1343 278	90,46 0,9048	1358,9 13,57	
5	ЕН11-15-8	Зарівнювання цементних покриттів	100м2	15	491,93 415,12	-	7379 6227	-	-	19,91	298,65
		Разом прями витрати по кошторису					748006	89033	53714		4746,28
		Разом будівельні роботи, грн. в тому числі:					748006		11985		585,04

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн. всього заробітна плата, грн. Забальновиробничі витрати, грн. трудомісткість в загальноновиробничих витратах, люд.год. заробітна плата в загальноновиробничих витратах, грн. Всього будівельні роботи, грн.					504718 101028 84088 639,76 20672 832092					
		Всього по кошторису					832092					
		Кошторисна трудомісткість, люд.год.					5971,08					
		Кошторисна заробітна плата, грн.					121700					

Склад

(підпис) Сидор Н.І.

 [посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Локальний кошторис на будівельні роботи № 1-1-1
на улаштування промислової підлоги на ~~фібробетоні~~

Основа:
креслення (специфікації) №

722,410 тис. грн.
3,87215 тис. ~~руб.~~ - год.
77,667 тис. грн.
2,9 розряд

Кошторисна вартість
Кошторисна трудомісткість
Кошторисна заробітна плата
Середній розряд робіт

Складений в поточних цінах станом на "13 грудня" 2017 р.

№ п/п	Об'єкту-вання (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.			Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.-год.		
					Всього	заробітної плати	в тому числі за-робітної плати	Всього	заробітної плати	в тому числі за-робітної плати	не зайнятих обслуговуванням машин	тих, що обслуговують машини	на однієї-ціо
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	ЕН11-2-4	Улаштування уцільнених трамбівками підстилавних щобених шарів	м3	350	749,39 88,29	129,23 26,53	262287	30802	45231 9286	4,78 1,3014	1673 455,49		
2	Е6-45-14	Приготування важкого бетону на щобені клас С55/67	100м3	1,0575	229659,43 6511,96	4613,69 1592,55	242864,95	6896	4879 1694	387,15 75,9284	409,41 80,29		
3	ЕН11-2-9	Улаштування підстилавних бетонних шарів	м3	150	1179,90 103,06	1,48 0,29	176986	15459	219 44	5,58 0,0139	837 2,09		
		Разом прями витрати по кошторису					682137	53247	50329 11014		2919,41 537,87		
		Разом будівельні роботи, грн. в тому журді ; вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн. всього заробітна плата, грн. Загальнопромислові витрати, грн. трудомісткість в загальнопромислових витратах, люд.-год. заробітна плата в загальнопромислових витратах, грн.					682137						
							563127						
							64261						
							54025						
							414,87						
							13406						

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Всього будівельні роботи, грн.					722 410				
		-----				-----					
		Всього по кошторису					722 410				
		Кошторисна трудомісткість, днів-год					3872,15				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					77567				

Склад Сидор Н.І.
 (підпис) / (підпис, прізвище /)



ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**Статті у наукових фахових виданнях України**

1. Сидор Н., Марущак У., Маргаль І. Вплив компонентного складу на властивості інженерних цементуючих композитів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2018. № 888. С. 127–132.

2. Марущак У., Сидор Н., Мазурак О., Мазурак Р. Дослідження швидкотверднучих бетонів, модифікованих комплексною нанодобавкою. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2018. № 19. С. 90–93.

3. Сидор Н. Дослідження властивостей інженерних цементуючих композитів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2019. № 912. С. 162–168.

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

4. Marushchak U., Sanytsky M., Korolko S., Shabatura Y., Sydor N. Development of nanomodified rapid hardening fiberreinforced concretes for special-purpose facilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2/6(92). P. 34–37. ISSN 1729-3774. SCOPUS. (DOI: 10.15587/1729-4061.2018.127001).

5. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction. *SSP - Journal of civil engineering*. 2017. Vol. 12. Issue 2. P. 107–112.

Патент

6. Патент на корисну модель № 109644 Україна, МПК С04В 7/00 С04В 7/13. В'язуче / Марущак У. Д., Саницький М. А., Позняк О. Р., Сидор Н. І., Мельник В. М. (Україна); Заявл. 19.02.2018; Опубл. 10.07.2018, бюл. №13.

Матеріали міжнародних і вітчизняних наукових конференцій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction. XVI International Scientific Conference Košice-Lviv-Rzeszów. 2017. P. 1–2.

8. Сидор Н. Ефективні інженерні цементуючі композити для мінімалізації забруднення навколишнього середовища. I Всеукраїнська науково-практична конференція «Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві». 2018. С. 28.

9. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N., Braichenko S. Research of Nanomodified Engineered Cementitious Composites. Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties. 2018. Part 2. 8914835. (Scopus).

10. Марущак У., Саницький М., Сидор Н. Дослідження стійкості наномодифікованих дисперсно-армованих бетонів до ударних навантажень. 7-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». 2018. С. 203–208.

11. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N., Braichenko S. Research of impact resistance of nanomodified fiberreinforced concrete. MATEC Web of Conferences. 2018. 230. 03012. (Scopus).

12. Марущак У., Саницький М., Сидор Н. Наномодифіковані дисперсно-армовані будівельні композити. Міжнародний семінар «Моделювання і оптимізація будівельних композитів». 2018. С. 100–102.

13. Марущак У., Сидор Н., Новосад П., Бобецький Ю. Дисперсно-армовані цементуючі композити. Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах». 2018. С. 62–63.

14. Марущак У., Сидор Н., Маргаль І., Солтисік Р. Модифіковані фібробетони для промислових підлог. 8-а міжнародна науково-технічна

конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». 2019. С. 164–166.

15. Marushchak U., Sydor N., Braichenko S., Margal I., Soltysik R. Modified fiber reinforced concrete for industrial floors. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. 708. 012094. (Scopus).

16. Сидор Н., Проць Є. Модифіковані інженерні цементуючі композити. II Науково-практична конференція «Теорія і практика актуальних наукових досліджень». 2020. С. 139–142.

17. Sydor N., Marushchak U. Modified fiber-reinforced concrete and the sustainability concept. International Seminar on Circular Economy and Sustainability in Civil Engineering (ISCESCE). 2020. P. 29.

18. Sydor N., Marushchak U., Braichenko S., Rusyn B., Development of component composition of Engineered Cementitious Composites. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. 100 LNCE. P. 459–465. (Scopus).

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

XVI International Scientific Conference Košice-Lviv-Rzeszów (Кошице, Словаччина, 2017) – заочна участь;

I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві» (Одеса, 2018) – заочна участь;

8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (Одеса, 2018) – заочна участь;

7-й та 8-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2018, 2019) – очна участь;

Міжнародному семінарі «Моделювання і оптимізація будівельних композитів» (Одеса, 2018) – заочна участь;

Міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах» (Київ, 2018) – заочна участь;

II науково-практичній конференції «Теорія і практика актуальних наукових досліджень» (Дніпро, 2020) – заочна участь;

International Seminar on Circular Economy and Sustainability in Civil Engineering (Львів, 2020) – очна участь;

XXIII International scientific and practical conference (Сан-Франциско, США, 2020) – заочна участь;

2-й Міжнародній науково-технічній конференції “Еко-комфорт та сучасні проблеми цивільної інженерії” (Львів, 2020) – очна участь.