

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РИХЛІЦЬКА ОКСАНА ВІТАЛІЇВНА

УДК 693.542:691.322

ДИСЕРТАЦІЯ
БЕТОНИ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ
ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ЗАПОВНЮВАЧІВ РЕЦИКЛІНГУ
БЕТОНУ

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

_____ / О.В. Рихліцька /

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Кропивницька Тетяна Павлівна,
доктор технічних наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Львів – 2023

Анотація

Рихліцька О. В. Бетони з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі заповнювачів рециклінгу бетону. – 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, 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню завдання одержання бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі заповнювачів рециклінгу бетону за рахунок оптимізації гранулометричного складу суміші заповнювачів різних типів для формування щільної макро- та мезоструктури штучного каменю та введення пуцоланових добавок у поєднанні з полікарбосилатними суперпластифікаторами для збільшення міцності контактної зони на межі «заповнювач рециклінгу бетону – цементне тісто», що забезпечує підвищення міцності, водонепроникності та довговічності.

У першому розділі на основі аналітичного огляду літературних джерел проаналізовано сучасні тенденції низьковуглецевого розвитку у будівельній галузі. Показано, що важливою проблемою згідно напрямків Європейського зеленого курсу (Green Deal) є забезпечення вуглецевої нейтральності, впровадження інновацій, екологізації промисловості. Розглянуто проблеми в галузі будівництва щодо значної кількості будівельних відходів, утворених від зруйнованих об'єктів цивільної інфраструктури, в тому числі в результаті військових дій в Україні. Показано, що перспективним напрямком є повторне застосування перероблених відходів будівництва, зокрема на основі бетону (бетонні, залізобетонні конструкції та вироби, їх уламки) в якості крупного та дрібного заповнювачів для бетонів. Обґрунтовано можливість одержання «зелених» клінкер-ефективних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону. Звернено увагу, що застосування перероблених бетонних відходів різних фракцій в якості заповнювачів для бетону супроводжується проблемою підвищення їх пористості, водопоглинання та пониження міцності. Розглянуто

способи керування процесами структуроутворення цементуючої матриці та формування контактної зони клінкер-ефективних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону та проаналізовано методи підвищення їх довговічності.

Аналіз даних у області технології цементів та бетонів, а також відомих закономірностей формування структури штучного каменю із заданими властивостями дозволяє висунути наукову гіпотезу про доцільність розроблення клінкер-ефективних бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями, що отримуються за рахунок використання заповнювачів рециклінгу бетону з оптимізованим гранулометричним складом і модифікування полікарбоксилатними суперпластифікаторами та пуцолановими активними мінеральними добавками із забезпеченням формування міцної контактної зони між поверхнею заповнювача і цементним каменем, що сприяє зниженню капілярно-пористої структури бетону на мікро-, мезо- та макрорівнях. У заключній частині огляду літератури наведено блок-схему досліджень.

У другому розділі представлено характеристики використаних матеріалів та описано методики проведення експериментальних досліджень. Наведено фізико-механічні властивості портландцементу з вапняком СЕМ ІІ/А-LL 42,5R і портландцементу з гранульованим доменним шлаком СЕМ ІІ/А-S 42,5R виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент», також показано їх хімічний та мінералогічний склади. Представлено характеристику пуцоланових активних мінеральних добавок, зокрема золи-винесення та мікрокремнезему, а також полікарбоксилатних суперпластифікаторів (PCE) на різній полімерній основі: етери, акрилові полімери. Наведено зерновий склад і показники якості заповнювачів для бетону та їх хімічний склад. Дослідження фізико-механічних і будівельно-технічних властивостей еко-ефективних швидкотверднучих бетонів проведено відповідно до діючих нормативних документів і загальноприйнятих методик. Для дослідження поверхні заповнювачів природних та після рециклінгу бетону, а також процесів структуроутворення в

цементуючій матриці еко-ефективних бетонів використано сучасні методи фізико-хімічного аналізу (рентгенівська дифрактометрія, оптична та електронна мікроскопія, термогравіметрія та ін.).

У третьому розділі проведено оцінку якості заповнювачів рециклінгу бетону за фізичними та механічними показниками, розроблено склади модифікованих швидкотверднучих дрібнозернистих бетонів. Встановлено, що заповнювачі рециклінгу бетону (ЗРБ) характеризуються маркою за дробимістю D800, середньою густиною зерен 2400 кг/м^3 . Методом оптичної мікроскопії показано, що поверхня заповнювача рециклінгу бетону вкрита мікротріщинами, що призводить до збільшення пористості – до 9,3% та водопоглинання. Так, для ЗРБ фракції 5-20 мм водопоглинання становить 6,1%, а для дрібної фракції менше 5 мм – 7,8%; тоді як для щебеню гранітного фракції 5-20 мм – 1,2%. Методом рентгенофазового аналізу встановлено, що на поверхні ЗРБ фіксуються фази кварцу $\beta\text{-SiO}_2$ – 21%, портландиту – 12,2%, еtringіту – 0,8%; закарбонізована частина (CaCO_3) складає 35,8%, що відповідає затверділим залишкам цементно-піщаного розчину, при цьому в.п.п. складають 32%.

Дослідженнями впливу пісків різної крупності на фізико-механічні властивості мезоструктури бетонів (склади Ц:П=1:2,36, Ц:П=1:1,94, Ц:П=1:1,65) встановлено, що найнижчим водоцементним відношенням В/Ц=0,35 (РК=175 мм) і найвищою міцністю на стиск ($R_{c28}=77,8 \text{ МПа}$) характеризується дрібнозернистий бетон (Ц:П=1:1,94) на основі піску середньої крупності ($M_k=2,3$). Експериментально підтверджено, що для дрібнозернистих бетонів на основі дуже дрібних пісків ($M_k=1,3$) водопотреба збільшується в 1,4 рази, міцність зменшується в 1,3 рази. Встановлено, що введення полікарбоксилатних суперпластифікаторів на різній полімерній основі за рахунок водоредукуючого ефекту $\Delta\text{В/Ц}=20\text{-}30\%$ забезпечує збільшення міцності через 1 добу в 2,9-3,4 рази, через 28 діб – в 1,2-1,5 рази.

Дослідженнями впливу зернового складу дуже дрібного кварцового піску ($M_k=1,3$) та крупного піску рециклінгу бетону ($M_k=2,75$) на формування мезоструктури та властивостей бетонів встановлено, що найбільшою насипною

густиною $\rho_n=1450 \text{ кг/м}^3$ і найнижчою пористістю $\Pi=36,1\%$ характеризується склад суміші з пісків природного та ЗРБ у відношенні $M_{k1,3} : M_{k2,75}=50 : 50$. Методом оптичної мікроскопії встановлено, що природний пісок характеризується включеннями голкоподібних кварцових трубок, що може забезпечувати часткове армування мезоструктури бетону. Розроблено швидкотверднучі модифіковані дрібнозернисті бетони на основі портландцементу з вапняком та дрібного заповнювача оптимізованого зернового складу. Встановлено, що дрібнозернистий бетон (Ц:П=1:1,94), модифікований РСЕ, характеризується міцністю на стиск через 2 доби – 77,6,4 МПа, через 28 діб – 110,3 МПа. Експериментально підтверджено, що модифікування структури бетону на мікрорівні активною пуцолановою добавкою (АПД) «зола - винесення – мікрокремнезем» ($S_{\text{пит}}=5800 \text{ см}^2/\text{г}$) у поєднанні з РСЕ забезпечує збільшення міцності через 2 доби до 82,7 МПа, а через 28 діб – до 125,7 МПа.

Розкрито закономірності формування фазового складу та мікроструктури цементного каменю на основі портландцементу з вапняком, модифікованого РСЕ – АПД. Методом рентгенофазового аналізу встановлено, що комплексне поєднання РСЕ та високодисперсної АПД «зола-винесення – мікрокремнезем» забезпечує вже через 1 добу гідратації прискорене зв'язування кальцію гідроксиду, кількість якого зменшується від 16,2 до 10,2 % тобто в 1,6 рази порівняно з цементним каменем без добавок. Відповідно до даних електронної мікроскопії встановлено, що в цементуючій матриці за рахунок явища адсорбційного модифікування переважно утворюються дрібнодисперсні кристали гідратних фаз, що свідчить про створення однорідної, щільної дрібнодисперсної мікроструктури, яка сприяє підвищенню міцності бетонів. Направлене регулювання процесів раннього структуроутворення модифікованих дрібнозернистих бетонів визначає їх покращені будівельно-технічні властивості.

У четвертому розділі запроєктовано склади еко-ефективних бетонів з урахуванням впливу активності цементу, показника В/Ц та якості заповнювачів

на міцність бетонів у відповідності до формули Болоея. На основі результатів міцності контрольних складів бетонів (для звичайного бетону при В/Ц більше 0,4) встановлено, що коефіцієнт якості гранітного щебеню складає $A=0,60$ (рядовий), а для заповнювачів рециклінгу бетону знижується до $A=0,55$, що дозволяє їх віднести до заповнювачів пониженої якості. Встановлено, що одним з основних факторів впливу на будівельно-технічні властивості бетонів є гранулометричний склад заповнювачів. Проведено оптимізацію гранулометричного складу суміші заповнювачів еко-ефективних бетонів та отримано їх залежності згідно з ДСТУ EN 933-1:2021.

На основі одержаних результатів запроєктовано оптимальні склади бетонів на основі портландцементу з вапняком ($\rho=350$ кг/м³, марка за осадкою конуса S4) із застосуванням експериментально-статистичного моделювання з параметрами планування: ЗРБ ($X_1 = 0; 50; 100$ мас.%) та РСЕ ($X_2 = 0; 1,5; 3,0$ мас.%). Встановлено, що при заміні в складі бетонної суміші 50% гранітного щебеню на заповнювачі рециклінгу бетону (фактор X_1) та введенні 1,5 мас.% полікарбоксилатного суперпластифікатора (фактор X_2) через 2 доби досягається міцність бетону 29,8 МПа, а через 28 діб – 59,3 МПа, що відповідає класу міцності на стиск С35/45. Показано, що при введенні 3,0 мас. % РСЕ за рахунок водоредукуючого ефекту $\Delta V/C=45\%$ досягається клас міцності на стиск С50/60, що дозволяє такі бетони віднести до високоміцних (ДСТУ EN 206:2018) та клінкер-ефективних.

Дослідженнями структури бетону на основі поліфракційних заповнювачів на макро-, мезо- та мікрорівнях встановлено, що міцність розчинової частини після розділення бетонної суміші на ситі з отвором 5 мм складає 74 МПа, тоді як для інших компонентів змінюється наступним чином: для щебеню гранітного – 110 МПа, цементного каменю – 90 МПа, бетону - 50 МПа, тобто міцність бетону є менша в 1,8 рази від цементного каменю та в 1,5 рази від його розчинової частини. Це свідчить, що найслабшою частиною в структурі бетону є контактна зона «заповнювач - продукти гідратації цементу». Встановлено, що модифікування РСЕ та комбінованою активною пуцолановою добавкою «зола-

винесення - мікрокремнезем» клінкер-ефективних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону оптимізованого складу на мезо- та мікрорівнях забезпечує через 1; 2 та 28 діб до збільшення міцності до 24,7; 39,6 та 78,7 МПа, що відповідає вимогам щодо високоміцних (клас міцності С50/60) і швидкотверднучих (питома міцність $f_{cm2}/f_{cm28} = 0,50$) бетонів. Розроблені швидкотверднучі еко-ефективні бетони на основі заповнювачів рециклінгу бетону характеризуються підвищеними будівельно-технічними властивостями: модуль пружності $E_{cm}=46,5$ ГПа, в'язкість руйнування $K_i=0,95$ МПа·м^{1/2}, водонепроникність W12, морозостійкість F300.

У п'ятому розділі наведено результати дослідно-промислової апробації еко-ефективних бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями. Розроблені швидкотверднучі товарні бетони на основі заповнювачів рециклінгу бетону, виготовлені ТзОВ «Бетонікс», впроваджені БК «Вікінг» при влаштуванні монолітного залізобетонного перекриття третього поверху житлового багатоквартирного будинку (вул. Пимоненка, м. Львів) у кількості 35 м³. Представлена техніко-економічна ефективність швидкотверднучих еко-ефективних бетонів.

Результати експериментальних досліджень і промислового впровадження використані в програмах навчальних дисциплін, які викладають на кафедрі будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка» при підготовці студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти «Сучасні будівельні матеріали та методи досліджень» (вибірковий блок «Міське будівництво та господарство») та другого (магістерського) рівня вищої освіти (ОПП «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів», «Міське будівництво та господарство») «Наукові дослідження в будівництві» та «Технології утилізації відходів у будівництві».

Ключові слова: еко-ефективний бетон, заповнювачі рециклінгу бетону, зола-винесення, мікрокремнезем, активні пуцоланові добавки,

полікарбосилатні суперпластифікатори, контактна зона, міцність, експлуатаційні властивості.

Abstracts

Rikhlitska O. V. Concretes with enhanced performance properties based on recycled concrete aggregates - Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

The thesis for Doctor of Philosophy (PhD) in speciality 192 Construction and Civil Engineering (19 - Architecture and Construction). - Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2023.

The dissertation is devoted to solving the problem of obtaining concrete with improved performance properties based on recycled concrete aggregates by optimising the optimized granulometric composition of a mixture of aggregates of different types to form a dense macro- and mesostructure of artificial stone and introducing pozzolanic additives in combination with polycarboxylate superplasticisers to increase the strength of the contact zone at the interface "recycled concrete aggregate - cement paste", which provides increased strength, water resistance and durability.

The first section analyses current trends in low-carbon development in the construction industry based on an analytical review of literature. It is shown that an important problem in accordance with the directions of the European Green Deal is to ensure carbon neutrality, introduction of innovations and greening of industry. The problems in the construction industry regarding a significant amount of construction waste generated from the destroyed civilian infrastructure as a result of military operations in Ukraine are considered. It is shown that a promising direction is the reuse of recycled construction waste, in particular, concrete-based waste (concrete, reinforced concrete structures and products, their fragments) as coarse and fine aggregates for concrete. The possibility of producing "green" clinker-efficient concrete based on concrete recycling aggregates is substantiated. It is noted that the use of recycled concrete waste of various fractions as aggregates for concrete is

accompanied by the problem of increasing their porosity, water absorption and decreasing strength. Methods of controlling the processes of cementitious matrix structure formation and formation of the contact zone of clinker-efficient concrete based on recycled concrete aggregates are considered, and methods of increasing their durability are analysed.

The analysis of data in the field of cement and concrete technology, as well as the known patterns of formation of the structure of artificial stone with specified properties, allows us to put forward a scientific hypothesis about the feasibility of developing clinker-efficient concrete with improved performance properties obtained by using recycled concrete aggregates with optimised optimized granulometric composition and modification with polycarboxylate superplasticisers and pozzolanic active mineral additives to ensure In the final part of the literature review, a flowchart of the research is presented.

The second section presents the characteristics of the materials used and describes the methods of experimental research. The physical and mechanical properties of Portland cement with limestone CEM II/A-LL 42.5R and Portland cement with granulated blast furnace slag CEM II/A-S 42.5R produced by PJSC Ivano-Frankivskcement are presented, as well as their chemical and mineralogical compositions. The characteristics of pozzolanic active mineral additives, in particular fly ash and microsilica, as well as polycarboxylate (PCE) on different polymeric bases: ethers, acrylic polymers, are presented. The grain size distribution and quality indicators of fine and coarse aggregates for concrete and their chemical composition are presented. It is shown that the study of the physical, mechanical, and construction and technical properties of eco-efficient rapid-hardening concrete was carried out in accordance with current regulatory documents and generally accepted methods. Modern methods of physicochemical analysis (X-ray diffractometry, optical and electron microscopy, thermogravimetry, etc.) were used to study the surface of natural aggregates and aggregates after concrete recycling, as well as the processes of structure formation in the cementitious matrix of clinker-efficient concrete.

In the third section, the quality of recycled concrete aggregates was assessed by physical and mechanical parameters, and compositions of modified rapid-hardening fine-grained concrete were developed. It has been established that recycled concrete aggregates (RCA) are characterised by a grade of D800 in terms of crushability and an average grain density of 2400 kg/m^3 . Optical microscopy has shown that the surface of the recycled concrete aggregate is covered with microcracks, which leads to an increase in porosity - up to 9.3% and water absorption. For example, for the 5-20 mm fraction of RCA, the water absorption is 6.1%, and for the fine fraction of less than 5 mm - 7.8%; while for crushed granite stone fraction of 5-20 mm $W_m = 1.2\%$. The X-ray phase analysis method has established that the surface of the RCA contains the phases of quartz $\beta\text{-SiO}_2$ - 21%, portlandite - 12.2%, ettringite - 0.8%, the carbonised part (CaCO_3) is 35.8%, which corresponds to the hardened residues of the cement-sand mortar; calcination losses are 32%.

Studies of the influence of sands of different sizes on the physical and mechanical properties of the concrete mesostructure (compositions C:S = 1:2.36, C:S = 1:1.94, C:S = 1:1.65), it was found that the lowest water-cement ratio of $W/C = 0.35$ (slump = 175 mm) and the highest compressive strength ($R_{c28} = 77.8 \text{ MPa}$) is characterised by fine-grained concrete (C:S = 1:1.94) based on medium-sized sand. It has been experimentally confirmed that for fine-grained concrete based on very fine sands, the water demand increases by 1.4 times, and the strength decreases by 1.3 times. It was found that the introduction of polycarboxylate superplasticisers on different polymeric bases due to the water-reducing effect of $\Delta W/C = 20\text{-}25\%$ provides an increase in strength by 2.9-3.4 times in 1 day, and by 1.2-1.5 times in 28 days.

The study of the influence of the grain size distribution of very fine quartz sand and coarse recycled concrete sand on the formation of the mesostructure and properties of concrete has established that the composition of a mixture of natural and recycled concrete sand in the ratio $Mk_{1,3} : Mk_{RCA3,5} = 50:50$ is characterised by the highest bulk density $\rho_H = 1450 \text{ kg/m}^3$ and the lowest void $P_H = 36.1\%$. Optical

microscopy has shown that natural sand is characterised by inclusions of needle-like quartz tubes, which can provide partial reinforcement of the concrete mesostructure. rapid hardening modified fine-grained concrete based on Portland cement with limestone and fine aggregate of optimised grain size distribution was developed. It was found that the fine-grained concrete (C:S=1:1.94) modified with PCE is characterised by a compressive strength of 77.6 MPa after 2 days and 110.3 MPa after 28 days. It has been experimentally confirmed that modification of the concrete structure at the micro level with a active pozzolanic additive (APA) "fly ash - microsilica" ($S_n = 5800 \text{ cm}^2 / \text{g}$) in combination with PCE provides an increase in strength after 1 day - up to 82.7 MPa, and after 28 days - up to 125.7 MPa.

The regularities of formation of the phase composition and microstructure of cement stone based on Portland cement with limestone modified with PCE - APA are revealed. By the method of X-ray phase analysis, it was found that the complex combination of PCE and highly dispersed fly ash-microsilica provides accelerated binding of calcium hydroxide after 1 day of hydration, the amount of which decreases from 16.2 to 10.2%, i.e. by 1.6 times compared to cement stone without additives. According to the electron microscopy data, it was found that fine crystals of hydrate phases are mainly formed in the cementitious matrix due to the phenomenon of adsorption modification, which indicates the creation of a homogeneous, dense fine microstructure, which contributes to the increase in the strength of concrete. Targeted regulation of the early structure formation processes of modified fine-grained concrete determines their improved construction and technical properties.

In the fourth section, the compositions of eco-efficient concrete were designed taking into account the influence of cement activity, W/C and aggregate quality on the strength of concrete in accordance with the Bolomey formula. Based on the strength results of the control concrete compositions (for conventional concrete with a W/C of more than 0.4), it was found that the quality factor of granite crushed stone is $A=0.60$ (ordinary), and for concrete recycling aggregates it decreases to $A=0.55$, which allows them to be classified as low-quality aggregates. It has been established that one of the main factors influencing the construction and technical properties of

concrete is the optimised grain size distribution of aggregates. The granulometric composition of the mixture of aggregates for eco-efficient concrete was optimised and their dependencies were obtained in accordance with DSTU EN 933-1:2021.

Based on the results obtained, the optimal compositions of concrete based on Portland cement with limestone ($C = 350 \text{ kg/m}^3$, cone slump class S4) were designed using experimental and statistical modelling with planning parameters: RCA ($X_1 = 0, 50, 100 \text{ wt.}\%$) and PCE ($X_2 = 0, 1.5, 3.0 \text{ wt.}\%$). It has been established that when replacing 50% of granite crushed stone in the concrete mix with recycled concrete aggregate (factor X_1) and introducing 1.5 wt.% polycarboxylate superplasticizer (factor X_2), the concrete strength of 29.8 MPa is achieved after 2 days, and after 28 days – 59.3 MPa, which corresponds to the compressive strength class C35/45. It is shown that when 3.0 wt. % PCE, due to the water-reducing effect of $\Delta W/C=45\%$, the compressive strength class C50/60 is achieved, which allows such concretes to be classified as high-strength (DSTU EN 206:2018) and clinker-efficient.

Studies of the structure of concrete based on polyfractional aggregates at the macro-, meso- and micro-levels have shown that the strength of the mortar part after separation of the concrete mixture on a 5 mm mesh sieve is 74 MPa, while for other components it varies as follows: for crushed granite stone - 110 MPa, cement stone - 90 MPa, mortar part - 74 MPa, concrete is only 50 MPa, i.e. the strength of concrete is 1.8 times less than that of cement stone and 1.5 times less than that of mortar. This indicates that the weakest link in the concrete structure is the contact zone "aggregate - cement hydration products". It has been established that modification of clinker-efficient concrete based on recycled concrete aggregates of optimized composition with a active pozzolanic additive "fly ash - microsilica" at the meso- and microlevels provides an increase in strength after 1; 2 and 28 days to 24.7; 39.6 and 78.7 MPa, which meets the requirements for high-strength (strength class C 50/60) and rapid hardening (specific strength $f_{cm2}/f_{cm28} = 0.50$). The developed eco-efficient concrete based on recycled concrete aggregates is characterised by improved construction and technical properties: elastic modulus $E_{cm} = 46.5 \text{ GPa}$, fracture toughness $K_i = 0.95 \text{ MPa m}^{1/2}$, water resistance W12, frost resistance F300.

Chapter 5 presents the results of the pilot testing of eco-efficient concrete with improved performance properties. The developed quick-setting commercial concrete based on recycled concrete aggregates was manufactured by Betonix LLC and implemented by Viking Construction Company in the construction of a monolithic reinforced concrete (floor slab $a \times b \times c = 25 \times 7 \times 0.2$ m) on the third floor of a residential apartment building (Pimonenko St., Lviv) in the amount of 35 m^3 . The paper presents the technical and economic efficiency of rapid hardening eco-efficient concrete.

The results of the experimental research and industrial implementation are used in the educational process of Lviv Polytechnic National University in teaching the disciplines "Modern Building Materials and Research Methods", "Waste Management Technologies in Construction", "Scientific Research in Construction" for students of the speciality 192 "Civil Engineering and Construction".

Keywords: eco-efficient concrete, recycled concrete aggregates, fly ash, microsilica, active pozzolanic additives, polycarboxylate superplasticisers, contact zone, strength, performance properties.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	24
1.1. Еко-ефективні бетони в сучасному будівництві	24
1.2. Роль заповнювачів рециклінгу бетону в формуванні структури та властивостей бетонів	29
1.3. Способи керування процесами структуроутворення цементуючої матриці та формування контактної зони бетону	36
1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза	45
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	48
2.1. Характеристика матеріалів.....	48
2.2. Фізико-механічні методи випробувань.....	57
2.3. Фізико-хімічні методи досліджень	61
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕЗОСТРУКТУРИ БЕТОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАПОВНЮВАЧІВ РЕЦИКЛІНГУ БЕТОНУ ..	64
3.1. Дослідження фізичних та механічних властивостей заповнювачів рециклінгу бетону	64
3.2. Вплив пісків природного та рециклінгового походження на властивості дрібнозернистих бетонів	77
3.3. Дослідження впливу пуцоланових добавок і полікарбоксилатних суперпластифікаторів на реологічні та фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів	88
3.4. Фазовий склад та мікроструктура цементного каменю, модифікованого активною пуцолановою добавкою та полікарбоксилатним суперпластифікатором	97
Висновки до розділу	106

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ЗАПОВНЮВАЧІВ РЕЦИКЛІНГУ БЕТОНУ	109
4.1. Проектування складів модифікованих еко-ефективних бетонів	109
4.2. Оптимізація складів швидкотверднучих модифікованих бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону	115
4.3. Дослідження мезо- та мікроструктури еко-ефективних бетонів на основі поліфракційних заповнювачів рециклінгу	124
4.4. Будівельно-технічні властивості модифікованих бетонів на основі заповнювачів рециклінгу	129
Висновки до розділу	138
РОЗДІЛ 5. ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ЗАПОВНЮВАЧІВ РЕЦИКЛІНГУ БЕТОНУ	140
5.1. Дослідно-промислова апробація бетонів з використанням заповнювачів рециклінгу бетону	140
5.2. Техніко-економічні показники бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону	146
Висновки до розділу	147
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ.....	167

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СЕМ II/A-LL	–	портландцемент з вапняком
ЗРБ, RSA	–	заповнювач рециклінгу бетону
ЗВ	–	зола-винесення
МК	–	мікрокремнезем
PCE	–	полікарбоксилатний суперпластифікатор
АПД	–	активна пуцоланова добавка
$S_{пит}$	–	питома поверхня
В/Ц	–	водоцементне відношення
НГТ	–	нормальна густина тіста
РК	–	розплив конуса
$R_{ст}$	–	міцність при стиску
ОК	–	осадка конуса бетонної суміші
РФА	–	рентгенофазовий аналіз
ДТА	–	диференційно-термічний аналіз
РЕМ	–	растрова електронна мікроскопія
λ	–	середній розмір пор
α	–	однорідність пор за розміром
f_{cm}	–	міцність при стиску
E	–	модуль пружності
f_{cm}	–	призмova міцність
ν	–	коефіцієнт Пуассона
K_i	–	в'язкість руйнування
W	–	марка за водонепроникністю
F	–	марка за морозостійкістю

ВСТУП

Актуальність теми. Бетон є найбільш широко використовуваний у регіональному, національному та світовому секторі будівництва матеріал, який завдяки своїй високій конструкційній міцності та довговічності є важливим компонентом сучасної інфраструктури. В той же час, при виготовленні нового бетону основними складниками є природні заповнювачі: гранітний щебінь, гравій, пісок, видобування яких є високовартісними процесом. Відповідно до звітів Big Market Research (BMR), Aggregates Market Development by 2026 і Grand View Research (GVR), Aggregates Market Size, Share and Trends Analysis Report, вартість природних заповнювачів у світі в 2018 році складала близько 430 млрд. доларів, і очікується, що у 2026 році - зросте в 1,4 рази і досягне 600 млрд. доларів. При цьому близько 60% заповнювачів використовуються для виготовлення бетону. Однією з багатьох проблем у галузі будівництва є значна кількість зруйнованого бетону, цегли та ін. Слід зазначити, що в результаті військових дій в Україні було зруйновано або пошкоджено значну кількість об'єктів цивільної інфраструктури. Одним із можливих шляхів повторного використання бетонних відходів (бетонні, залізобетонні конструкції та вироби, їх уламки) від руйнування є виробництво крупного та дрібного заповнювачів для бетонів. В той же час, поверхня заповнювачів рециклінгу бетону вкрита залишками цементного розчину, структура якого є пористою з утворенням тріщин, що призводить до підвищеного їх водопоглинання та зниження міцності контактної зони між заповнювачем і цементним тістом. Тому модифікування поверхні заповнювачів рециклінгу бетону на мікрорівні шляхом застосування високодисперсних пуцоланових добавок та високоефективних полікарбосилатних суперпластифікаторів дозволить отримати більшу щільність та міцність контактної зони та забезпечить підвищення довговічності бетону. Отже, розроблення низькоенергоємних швидкотверднучих бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі заповнювачів рециклінгу бетону є актуальним і відповідає світовій концепції низьковуглецевого розвитку.

Узагальнення результатів досліджень в області будівельного матеріалознавства свідчить, що вирішення завдання одержання ефективних товарних бетонів з використанням заповнювачів рециклінгу бетону значною мірою досягається за рахунок оптимізації зернового складу суміші природних і рециклінгових заповнювачів різних типів, що сприяє створенню жорсткого скелету, який є основою для формування щільної макро- та мезоструктури штучного каменю та використанні пуцоланових мінеральних добавок у поєднанні з полікарбонатними суперпластифікаторами на основі модифікованих акрилових полімерів з метою покращення контактної зони поверхні заповнювача рециклінгу бетону з цементним розчином, в напрямку формування міцної поверхні контакту «заповнювач рециклінгу бетону – продукти гідратації цементу» для одержання бетонів з підвищеною міцністю, та довговічністю. Тому актуальним науковим і практичним завданням є розроблення економічно доцільних, низькоенергоємних швидкотверднучих бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі заповнювачів рециклінгу бетону.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації Рихліцької О.В. відповідає науковому напрямку кафедри будівельного виробництва «Технологія будівництва, дослідження прогресивних конструкцій, матеріалів та методів зведення будівель та споруд». Дисертація виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт “Лужно-сульфатноактивовані композиційні цементы з високою ранньою міцністю та низькоенергоємні бетони на їх основі” (номер держреєстрації 0119U002253, 2019-2021 рр.), «Розроблення основ технологій швидкотверднучих надвисокоміцних інженерних цементуючих композитів з високими експлуатаційними властивостями» (номер держреєстрації 0122U000959, 2022-2023 рр.), відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України та «Дослідження цементуючих матеріалів та випробування бетонів на їх основі» відповідно до госпдоговору №567. У зазначених роботах автор була виконавцем.

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення еко-ефективних бетонів на основі поліфракційних заповнювачів рециклінгу бетону з полікарбосилатними суперпластифікаторами на основі акрилових полімерів для монолітного будівництва, оптимізація їх складів, дослідження процесів структуроутворення та будівельно-технічних властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз сучасних досліджень щодо впливу заповнювачів рециклінгу бетону на технічні та екологічні показники еко-ефективних бетонів;
- дослідити зерновий склад, фізичні властивості та фізико-хімічні особливості заповнювачів рециклінгу бетону;
- провести оптимізацію мезоструктури дрібнозернистих бетонів з використанням заповнювачів різного генезису і зернового складу;
- дослідити вплив активної пуцоланової добавки (АПД) «зола-винесення – мікрокремнезем» та полікарбосилатних суперпластифікаторів (РСЕ) на фізико-механічні властивості бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону;
- встановити фазовий склад і мікроструктуру цементного каменю на основі АПД «зола-винесення – мікрокремнезем» та полікарбосилатних суперпластифікаторів;
- запроєктувати склади еко-ефективних бетонів на основі поліфракційних заповнювачів і дослідити показники якості;
- дослідити фізико-хімічні закономірності процесів структуроутворення контактної зони бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону на макро- та мікроструктурному рівнях;
- дослідити експлуатаційні властивості еко-ефективних бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями;
- здійснити промислове впровадження бетонів з використанням заповнювачів рециклінгу бетону, представити техніко-економічне обґрунтування їх ефективності.

Об'єктом досліджень є процеси регулювання технологічних і міцнісних властивостей бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону для направленою формування контактної зони «заповнювач ЗРБ – продукти гідратації цементу» на макро-, мезо та мікроструктурних рівнях.

Предметом досліджень є бетони на основі заповнювачів рециклінгу бетону з покращеними показниками якості та підвищеними експлуатаційними властивостями.

Методи досліджень. Експериментальні результати отримані з використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу: рентгенівської дифрактометрії, термогравіметрії, оптичної та електронної мікроскопії та ін. Визначення фізичних, механічних та експлуатаційних властивостей бетонів на основі заповнювачів рециклінгу проведено відповідно до діючих нормативних документів і загальноприйнятих методикам. Оптимізацію гранулометричного складу суміші заповнювачів для вискоефективних бетонів проведено відповідно до ДСТУ EN 937:2021

Наукова новизна одержаних результатів:

- теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість одержання ефективних бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі заповнювачів рециклінгу бетону за рахунок комплексного модифікування полікарбосилатними суперпластифікаторами на різній полімерній основі та високодисперсними пуцолановими мінеральними добавками для забезпечення максимальної щільності контактної зони;

- встановлений характер впливу складу заповнювачів рециклінгу бетону на формування структури цементного каменю і контактної зони новоутворень, що полягає в тому, що в початковий період заповнювач поглинає воду з бетонної суміші, а після утворення капілярно-пористої структури вода з пор заповнювача відсмоктується клінкерними мінералами і новоутвореннями, збільшуючи тим самим ступінь гідратації цементу без негативного впливу на рухомість бетонної суміші;

- вперше встановлено особливості формування структури важких бетонів на макро-, мезо- та мікрорівнях за рахунок визначення міцності компонентів бетону, яка зменшується в порядку гранітний щебінь (110 МПа), цементний камінь (90 МПа), розчинова частина (74 МПа) та звичайний важкий бетон (50 МПа);

- подальший розвиток отримало розроблення наукових засад проєктування еко-ефективних бетонів на основі поліфракційних заповнювачів рециклінгу бетону з оптимізованою структурою на макро-, мезо- та мікрорівнях за критеріями легковкладальності та міцності з врахуванням економічних та екологічних показників;

- запропоновано новий підхід до проєктування еко-ефективних бетонів шляхом раціоналізації добору зернового складу фракцій природного та рециклінгового заповнювачів на різних структурних рівнях з одержанням щільного жорсткого скелету бетону, який є основою для створення низькопористої макро- та мезоструктури штучного каменю, та показано, що за рахунок використання високодисперсної пуцоланової мінеральної добавки «зола-винесення - мікрокремнезем» у поєднанні з полікарбосилатними суперпластифікаторами на основі модифікованих акрилових полімерів забезпечується формування міцної контактної зони на границі «заповнювач ЗРБ – продукти гідратації цементу», що сприяє одержанню швидкотверднучих високоміцних бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями (клас міцності C50/60, водонепроникність W10-W12, морозостійкість F300).

Практичне значення одержаних результатів:

- отримано заповнювач з переробленого бетону класу міцності C20/25 (марка за подрібнюваністю D800, водопоглинанням 6,8%), вартість якого в 2 рази менша порівняно з щебенем гранітним;

- розроблено склади еко-ефективних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону з вмістом комбінованої пуцоланової мінеральної добавки, полікарбосилатного суперпластифікатора та експериментально підтверджено

технічні та економічні переваги розроблених бетонів порівняно з традиційними;

- розроблено нові рецептури бетонних сумішей на основі поліфракційного зернового складу змішаного гранітного та рециклінгового заповнювачів з покращеними експлуатаційними характеристиками, а саме з підвищеною міцністю, водонепроникністю W12, морозостійкістю F300.

- здійснено апробацію на ТзОВ «Бетонікс» еко-ефективного товарного бетону на основі заповнювачів рециклінгу бетону для влаштування монолітного залізобетонного перекриття (плита перекриття $a \times b \times c = 25 \times 7 \times 0,2$ м) третього поверху житлового багатоквартирного будинку в кількості 35 м³; результати експериментальних досліджень використовуються на ТзОВ «Бетонікс».

- теоретичні положення дисертаційної роботи, результати експериментальних досліджень і промислового впровадження використовуються при підготовці студентів в програмах навчальних дисциплін, які викладають на кафедрі БВ Національного університету «Львівська політехніка» при підготовці студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти «Сучасні будівельні матеріали та методи досліджень» (вибірковий блок «Міське будівництво та господарство») та другого (магістерського) рівня вищої освіти (ОПП «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів», «Міське будівництво та господарство») «Наукові дослідження в будівництві» та «Технології утилізації відходів у будівництві».

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні експериментальних досліджень, обробленні одержаних даних, впровадженні результатів роботи у виробництво. Постановка завдання та формулювання основних положень і висновків проводились під керівництвом наукового керівника д.т.н., проф. Кропивницької Т.П. та при науковому консультуванні д.т.н., проф. Саницького М.А.

Усі наукові результати дослідження дисертаційної роботи отримані автором особисто. В роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1] – проектування складів швидкотверднучих еко-ефективних бетонів; [2, 6] – визначення ефективності розроблення змішаних цементів з добавкою вапняку; [3] – дослідження впливу полікарбоксилатних суперпластифікаторів на різній полімерній основі на технологічні властивості товарних бетонів; [4] - визначення наростання міцності бетону та оцінка питомої міцності бетону відповідно до ДСТУ EN 206-1; [5, 7] - дослідження впливу пуцоланових добавок на фізико-механічні властивості екологічних еко-ефективних цементів і бетонів; [8] – дослідження фізичних характеристик заповнювачів рециклінгу бетону та проектування складів еко-ефективних бетонів; [9] – патентний пошук, розроблення складів цементних композицій на основі золи-винесення.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях і семінарах: XI Міжнародний науково-практичний семінар «Структура, властивості та склад бетону» (Рівне, 2020); 6-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2021), Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективне місто. XXI століття» (Одеса, 2020, 2022).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, з них 3 статті у наукових фахових виданнях України, 1 – у науковому періодичному виданні іншої держави, 1 – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 3 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій та 1 патент на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 176 сторінки та включає 37 таблиць, 71 рисуноків, список використаних джерел із 138 найменування на 14 сторінках і 6 додатки.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Еко-ефективні бетони в сучасному будівництві

У будівництві бетон є одним з найбільш використовуваних будівельних матеріалів, що має важливе економічне та народногосподарське значення в розвитку ресурсозберігаючих технологій [21, 36, 40, 44, 72, 92]. Термін експлуатації бетонних конструкцій і характеризується пониженою енергоємністю. Бетон забезпечує вогнестійкість будівельних конструкцій і здатність зменшувати споживання енергії на опалення та охолодження на 25%. Більш циклічний підхід до будівель є ключовим для зменшення викидів, що відкриває значні можливості не лише для бетону, але й для всього будівельного сектору [78, 84].

Будівельний сектор пов'язаний із значним впливом на навколишнє середовище, головним чином, що спричинене виробництвом та зростаючою кількістю бетону [79]. Згідно з Європейською Зеленою Угодою (European Green Deal) [78], основою архітектурного середовища є стійкість, яка визначається трьома складовими: безпечні, довговічні та доступні конструкції (соціальна складова); зниження емісії CO₂ та енергоефективність (екологічна складова); будівництво та реконструкція, як ключовий рушій зростання та створення робочих місць (економічна складова). Deja J. та ін. [72] показують філософію «Економіки замкнутого циклу» GOZ (Gospodarka o cyklu zamknietym), яка поєднує: клінкер – цемент – бетон – конструкцію – карбонізацію – рециклінг; це підтверджує те, що цемент і бетон є перспективою у боротьбі зі змінами клімату.

Щорічно в світі використовується близько 25 Гт бетону, що еквівалентно більше 3,8 тонн бетону на людину на рік. У той же час, близько 88% викидів

CO₂, під час виготовлення бетону, пов'язані з виробництвом цементу [7, 24, 42, 64, 69]. Одержання цементу є надзвичайно енергоємним процесом, який призводить до емісії значної кількості парникових газів, тоді як надмірне використання заповнювачів пов'язане з масовим виснаженням природних ресурсів [130, 135]. Крім того, в процесі людської діяльності, окрім виробництва бетону, створюється значна кількість відходів, управління якими в наш час є ваговою екологічною проблемою [77, 80]. У зв'язку з цим, для досягнення збалансованого розвитку, виникає необхідність зменшити споживання природних ресурсів і повторно використовувати промислові відходи.

Концепція низьковуглецевого розвитку встановлює вимоги щодо екологічної свідомості, моральності та соціальної відповідальності [40, 42]. «Зелений» бетон - це форма екологічно-чистого бетону, який можна виготовляти з використанням відходів будівництва, що дозволяє зменшити навантаження на природні невідновлювані ресурси [8, 137]. Тенденції сталого розвитку останнім часом прискорилися внаслідок обмеження ресурсів, що призводить до збільшення проблем, які розвиваються з стратегічної та управлінської точок зору [41, 126].

За останні роки була запропонована стратегія, яка полягає в повторній утилізації відходів у складах будівельних матеріалів. Слід зауважити, що будівельна галузь продукує від 45 до 65% відходів, які утилізують на полігонах, що призводить до глобальних викидів CO₂. Завдяки такому підходу відходи та побічні продукти можуть ефективно повторно вводитися у виробничий ланцюг, що дозволить значно скоротити використання природної сировини для виробництва бетону та інших будівельних матеріалів [11, 20, 21].

На даний час, використання бетону вже не обмежується стандартним складом. У багатьох стратегій, які використовуються для досягнення збалансованості за допомогою екологічно чистого бетону, є часткова заміна високоенергоємного портландцементного клінкеру штучними мінеральними добавками, такими як зола-винесення (ЗВ), гранульований доменний шлак

(ГДШ), кремнезем та ін. [6, 40, 70, 109]. Такі мінеральні добавки характеризуються вмістом оксиду кремнію та оксиду алюмінію, що забезпечує їх здатність до пуцоланової активності [37, 45]. Використання додаткових цементуючих матеріалів забезпечує модифікування матриці та структури пор, сприяє зменшенню емісії CO₂, зниженню вартості та збільшенню довговічності еко-бетонів. В той же час, автори Гоц В.І., Дворкін Л.Й., Кривенко П.В., Пушкарьова К.К. та ін. [11, 21] зазначають, що використання надлишкової кількості золи-винесення призводить до підвищення пористості та зниження швидкості набирання міцності в часі, при цьому знижуються експлуатаційні характеристики, зокрема морозо- і корозійна стійкість.

Розвиток індустріалізації та урбанізації вимагає значного оновлення існуючих структур, що призводить до значної кількості відходів будівництва та знесення [1, 57, 63, 87]. Для виробництва вторинного бетону можна виділити три різні класи відходів: відходи знесення (I), промислові відходи (II) та сільськогосподарські відходи (III). Особливу увагу слід приділити відходам знесення, так як відомо, що бетон є найпоширенішим будівельним матеріалом у світі, проте його життєвий цикл є також обмежений. Індустріалізація заохочує розвиток будівництва та демонтажних робіт і, як наслідок, утворення все більшої кількості сміття та відходів. З іншої сторони, в результаті військових дій в Україні, було зруйновано або пошкоджено значну кількість об'єктів цивільної та транспортної інфраструктури, які в більшості не підлягають відновленню та мають бути демонтовані, а будівельні відходи, що утворилися, необхідно утилізувати. Це свідчить, що ефективне повторне використання відходів від знесення будівель і споруд може представляти шлях до більш збалансованого їх використання [18, 27, 32, 46].

Згідно з даними European Green Deal [78], повторна карбонізація (re-carbonation) збільшується після руйнування залізобетонних будівель і споруд. Перероблені бетонні заповнювачі мають більшу площу поверхні та можуть легше поглинати CO₂ всередині бетонної маси з навколишнього середовища. Додатковою перевагою дрібних заповнювачів переробленого бетону є більш

високий рівень уловлювання CO₂ за рахунок їх використання як заміни частини клінкеру в цементі, або ж як заповнювачів у складі бетону.

Згідно з даними авторів [46], на даний час у країнах ЄС щорічно піддається руйнуванню близько 50 млн. т бетонних і залізобетонних конструкцій, у США – 60 млн. т, а в Японії – 12 млн. т. В окремих країнах (Японія, Німеччина та ін.) практично немає територій для організації звалищ або захоронення бетонного брухту. У той же час, ряд країн працює на привізному щебені. Відповідно до Big Market Research (BMR), Aggregates Market Development by 2026 і Grand View Research (GVR), Aggregates Market Size, Share and Trends Analysis Report, вартість природних заповнювачів у світі в 2018 році складала 430 млрд. доларів, а до 2026 року – може зрости в 1,4 рази і досягне 600 млрд. доларів [81]. При цьому близько 60-70% заповнювачів використовуються для виготовлення бетону.

Перспективним напрямком у будівництві є застосування будівельних відходів, які відносяться до заповнювачів рециклінгу бетону, що стає альтернативою природним заповнювачам під час виготовлення конструкційних бетонів [15]. Тенденція до урбанізації в усьому світі сприяє значному попиту на заповнювачі низької вартості, які наявні у значних кількостях для розробки еко-бетонів. Джерелами відходів на основі бетону можуть служити будівельні відходи, що одержують від демонтажу та знесення, браковані збірні залізобетонні елементи, «власний» бетонний лом та ін. Виявлено, що відходи знесення під час процесу руйнування містять різного роду домішки, такі як скло, метал, гіпс або дерево. У зв'язку з тим, основним етапом перед застосуванням вторинних бетонних заповнювачів (RCA) для виробництва нових композитів є процес сортування та подрібнення [18].

Заповнювачі рециклінгу бетону широко застосовуються в якості вторинної ресурсної сировини в різних високорозвинених країнах світу (США, Японія, Китай та ін). Так, в США щорічно переробляється понад 20 млн. т бетонних відходів; при одержанні щебеню з бетону витрата палива в 8 разів менше, ніж при його видобутку в природних умовах, а собівартість бетону на

вторинному щебені знижена до 25% [60]. В Англії та Німеччині широко застосовується під час приготування бетонної суміші в якості крупного заповнювача бетонний брукхт, який утворився після руйнування будівель і споруд. На рис. 1.1 наведено схему [107], яка показує замкнутий цикл використання відходів переробленого бетону (C&D). Перероблений бетонний заповнювач може конкурувати вигідно з природними заповнювачами, зокрема з гранітним щебенем, як неструктурний, і як структурний матеріал. Вторинна продукція промисловості збірного залізобетону може бути частково використана в менш відповідальних будівлях і спорудах із зниженою поверховістю, при будівництві тимчасових доріг, тротуарних покриттів, індивідуальних забудовах.



Рисунок 1.1 - Схема процесу перероблення та застосування заповнювачів рециклінгу бетону [107]

Кабінет Міністрів України від 27 вересня 2022 р. затвердив Порядок поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків [32]. Відповідно до даного порядку, одним із можливих шляхів повторного використання бетонних відходів (бетонні, залізобетонні конструкції та вироби, їх уламки) від руйнування є виробництво крупного та дрібного заповнювачів для бетонів класів за міцністю до С20/25. Згідно з ДСТУ 9171:2021 [15], будівельні відходи

до складу яких входить переважно залізобетон, рекомендовано сортувати за допомогою спеціальної техніки, невеликі фрагменти будівельних відходів можна подрібнювати на щебінь необхідної фракції із застосуванням дробильних установок.

Таким чином, підвищення вартості природних заповнювачів і збільшення кількості зруйнованих будівель та споруд із залізобетону, що підлягають знесенню, призводить до пошуку шляхів впровадження у виробництво технологій, які б ґрунтувалися на повторному використанні вторинних будівельних матеріалів - заповнювачів рециклінгу бетону.

1.2. Роль заповнювачів рециклінгу бетону в формуванні структури та властивостей бетонів

Бетон є одним з найважливіших матеріалів, що використовується в будівництві [3, 9, 23, 41]. Якість бетону безпосередньо впливає на міцність і довговічність будівельних конструкцій [4, 54]. Основною складовою бетонної суміші є заповнювачі, які безпосередньо впливають на співвідношення компонентів, визначають технологічні та міцнісні властивості бетонів. Заповнювачі призначені для створення жорсткого скелету, який є основою для формування структури штучного каменю і сприяє здатності до витримки експлуатаційних навантажень. Разом з тим, вміст заповнювачів у бетоні є фактором, який впливає як на якість, так і вартість бетону. Кількість заповнювачів у бетонних сумішах різних складів може досягати 80%. Як правило, крупний заповнювач становить 50–75% об'єму бетону. Заповнювачі можуть бути отримані як шляхом подрібнення та класифікації гірських порід різного походження або відходів промисловості, так і повторного перероблення будівельних відходів, зокрема бетонних - заповнювачі рециклінгу.

Для приготування розчинових та бетонних сумішей важливе значення має гранулометричний склад заповнювачів [28, 53, 138]. Гранулометричний підхід – це спосіб використання заповнювачів різних розмірів для щільного заповнення простору бетону. Заповнювачі для бетонів, залежно від їх розміру класифікуються як дрібні та крупні. Так, природний або подрібнений пісок, що розподілений на фракції з розміром сита нижче 5 мм зазвичай використовується як дрібний заповнювач у бетонних сумішах. Дрібні заповнювачі відрізняються за формою частинок і якістю поверхні, що впливає на вміст порот і властивості свіжого та затверділого бетону [10, 95]. Крупні заповнювачі характеризуються розміром понад 5 мм. Згідно з ДСТУ EN EN 12620:2013 заповнювачі класифікують як дрібнодисперсні - з фракцією до 0,063 мм, крупні при $D > 4$ мм і $d > 1$ мм та дрібні з розміром зерен - $D \leq 4$ мм і $d = 0$ мм; натуральний гранульований заповнювач 0/8 мм. Гранулометричний склад заповнювачів впливає та визначає технологічні та міцнісні характеристики бетонів [40, 90].

При виборі заповнювачів необхідно також враховувати їх форму. Так, в бетонах при застосуванні заповнювачів грубої текстури та з гострими кутами необхідно використати більше цементного тіста, порівняно з округлими зернами; бетонна суміш важче перекачується бетононасосом. Зерна кубовидної форми є найбільш бажаними для виготовлення бетонів. Незважаючи на те, що крупний заповнювач забезпечує міцність, пісок призначений для одержання кращої легковкладальності. Крупний і дрібний заповнювачі дозволяють виготовляти бетонні суміші більш щільними, зменшують споживання цементу та води і сприяють механічній міцності бетону, що робить їх незамінними компонентами в будівництві. При виборі виду заповнювача, форми його зерен та гранулометричного складу необхідно також враховувати і його властивості - морозостійкість, стираність, умови навколишнього агресивного середовища під час експлуатації бетону [5, 9, 14, 22].

Згідно з ДСТУ Б EN 13242:2013 заповнювач – це зернистий матеріал, що використовують у будівництві та може бути природним, штучним або таким, що повторно використовують. Заповнювач, що повторно використовують,

отримується шляхом переробки неорганічного матеріалу, який раніше використовували в будівництві. Заповнювачі рециклінгу отримують шляхом сортування та подрібнення відходів будівельних матеріалів [46, 107, 134]. Вимоги до заповнювачів рециклінгу є наближені до вимог для традиційних заповнювачів, які застосовуються для виготовлення бетонів.

Пушкарьовою К. К. [30] проведено порівняльний аналіз української, німецької та європейської нормативної бази щодо оцінки якості заповнювачів для розчинів та бетонів. Так, для виготовлення бетону за вимогами ДСТУ EN 206-1 DIN 1045-2 можуть бути використані наступні види заповнювачів: важкі (щільні) на основі гірських порід згідно з DIN EN 12620 (ДСТУ Б В 2.7-74-98); легкі (пористі) згідно з DIN EN 13055-1 (ДСТУ Б В 2.7-17-95) та рециклінгові, отримані повторною переробкою некондиційних будівельних матеріалів згідно з DIN 4226-100. Згідно з німецькими стандартами є 4 типи заповнювачів рециклінгу, які рекомендовані до використання. Згідно з DIN 4226-100 щебінь та пісок з подрібненого бетону (тип 1) повинен містити більше 90 мас.% бетону, а решта – менше 10 мас. %, може бути кінкерна цегла, вапняк, інші компоненти. При цьому максимальне водопоглинання має складати не більше 10%. Відповідно до німецьких стандартів максимальний вміст заповнювача рециклінгу (фракція більше 2 мм) може складати 45% (1 тип) і 35% (2 тип).

При виготовленні будівельних конструкцій, експлуатація яких передбачена у вологих умовах, до заповнювачів висувають додаткові обмеження відносно максимально дозваної кількості заповнювача рециклінгу. Згідно з вимогами DIN 4226-100 [73], дозволено використання заповнювачів рециклінгу фракції більше 2 мм, для класів впливу небезпечного навколишнього середовища (у вологих умовах) ХО, ХС1- ХС4 не більше 45 % та класів XF1 та XF3 - не більше 35 % від загального об'єму заповнювача. Згідно з ДСТУ Б EN 12620:2013 дозволено використання утилізованого заповнювача лише з промивної води бетонозмішувача або з свіжовиготовленої бетонної суміші. Невідокремлений утилізований заповнювач не можна використовувати у кількості більше 5% від загальної кількості заповнювача.

Дослідження [61, 135] свідчать, що використання крупного заповнювача рециклінгу в бетоні призводить до збільшення усадки при висиханні, повзучості, при цьому зменшується модуль пружності. Зауважимо, що заповнювачі є хімічно інертні матеріали, які зв'язані цементним тістом та утворюють бетон і складають основну частину його загального об'єму, а отже, вони значною мірою впливають на характеристики бетону. З іншої сторони, заповнювачі також дуже важливі для забезпечення міцності, теплових і пружних властивостей бетону, стабільності розмірів і об'єму. Встановлено, що цементний камінь частіше піддається усадці [72, 47]. Введення заповнювачів у суміш може контролювати рівень усадки та запобігати розтріскуванню. Разом з тим, заповнювачі рециклінгу можуть призвести до отримання бетонів з низькою міцністю та зносостійкістю, тоді як використання порід з вищою твердістю забезпечує високу міцність та стійкість до стирання.

Для попередження негативних наслідків у ДСТУ Б EN 206:2018 встановлено обмеження на відсоток заміни крупного заповнювача (для $d > 4$ мм). Відповідно до цього визначено два класи заповнювачів рециклінгу, які позначають А і В. Класифікація ґрунтується на природі та кількості перероблених матеріалів, відповідно до європейського стандарту ДСТУ Б EN 12620:2013. Так, заповнювачі типу А повинні включати принаймні 90% (R_{c90}) переробленого бетону та розчину або 95% (R_{cu95}) переробленого бетону, розчину, заповнювачів і природного каменю. При цьому для заповнювача типу А обмежено вміст різного роду домішок: глинистих не більше 10% (R_{b10-}), силікатно-кальцієвих з блоків газобетону, не більше 1% (R_{a1-}), бітумних матеріалів, не більше 2% (FL_{2-}) і глини та ґрунту не більше 1% (XR_{g1-}) та ін. (метали, деревина, пластик, гума, гіпсова штукатурка, скло). Згідно з ДСТУ Б EN 206:2018 максимальний відсоток заміщення крупних природних заповнювачів на вторинні заповнювачі рециклінгу для типу А (R_{c90} , R_{cu95} , R_{b10} , R_{a1-} , FL_{2-} , XR_{g1-}) відповідно до класів експозиції може складати: 50% - для класу ХО, 30% - для класів ХС1-ХС4, ХФ1, ХА1, ХД1 і 0% - для інших класів, з можливими змінами. Для заповнювачів рециклінгу типу В, крім класу ХО,

стандартом дозволений більший вміст домішок. Так, максимальний відсоток заміни щебеню для класів впливу XC1-XC2 не повинен перевищувати 20% і не допускається для всіх інших класів впливу. При цьому вторинні заповнювачі типу В не можуть бути використаними в бетонах з класом за міцністю на стиск більше C30/37 [73].

На даний час проводяться інтенсивні дослідження фізико-механічних властивостей переробленого бетонного заповнювача (RCA). Для виробництва нових бетонних композитів відходи бетону в процесі подрібнення перетворюють на дрібні зерна - перероблені бетонні заповнювачі. Такі заповнювачі відрізняються від природних, традиційних своїм складом: після подрібнення «старого» бетону утворюються фракції зерен, які можуть містити на поверхні залишки затверділого цементного розчину. Це визначає пониження якості RCA: вища пористість, менша щільність порівняно з природним заповнювачем. Крім того, слабка якість зчеплення між вихідним заповнювачем і прикріпленим залишком будівельного розчину разом із наявністю дрібних тріщин, викликаних процесом подрібнення, а також високодисперсними частинками RCA, призводять до подальшого збільшення пористості та зменшення механічної міцності в новому вторинному бетоні [97, 99, 132]. Таким чином, RCA в бетонах, реалізовані із частковою заміною первинних заповнювачів вторинними, призводять до загального зниження їх механічних властивостей. Разом з тим, використання спеціальних технологічних прийомів (покриття RCA, видалення домішок, прожарювання RCA та ін.) дозволяє значно підвищити їх якість.

В роботах [56, 91] зазначено, що при дослідженні впливу заповнювачів рециклінгу бетону на властивості бетонів виявлено зниження міцності на стиск, розтягу при стиску, модуля пружності та ін. Показано, що перероблений бетонний заповнювач характеризується підвищеною абсорбцією і водопоглинанням (від 3% до 10%) та меншою середньою густиною порівняно з природним заповнювачем. При цьому значення водопоглинання зростають із зменшенням розміру крупних часток, що призводить до збільшення витрати

води для досягнення такої легкоукладальності та осідання конуса, як для бетону зі звичайними заповнювачами. Вміст додаткової води призводить до підвищення пористості, погіршенні механічних властивостей та довговічності бетонів.

Авторами [56] виявлено покращення характеристик традиційного бетону після заміни натуральних дрібних заповнювачів на RCA. При заміні природного піску на 50% переробленого дрібного заповнювача з бетону зниження міцності на стиск не спостерігається. В той же час, дослідженнями [61] показано, що при заміні 25%, 50% і 75% природного піску двома різними типами RCA (перший, отриманий шляхом переробки звичайного бетону, а інший - із відходів зруйнованого залізобетону) міцність бетону знижується на 10-40%.

Paul S. Ch. та ін. [116] зазначають, що застосування 30% заповнювача рециклінгу бетону в складі конструкційного бетону не має суттєвих відмінностей у показниках міцності та довговічності порівняно з бетоном на основі природного заповнювача цього ж класу міцності. При цьому сорбційна здатність такого бетону на 14% вища, без зменшення міцності. Показано, що бетон з 30% RCA має аналогічну стійкість до проникнення кисню, води та хлоридів як і звичайний бетон. У той же час, деякі бетонні відходи RCA можуть містити хлориди, що може мати негативний вплив на довговічність залізобетонних конструкцій. Silva R.V. та ін. [128] встановили, що в бетоні з високим вмістом RCA глибина карбонізації знижується, і в подальшому істотного її збільшення не спостерігається.

Авторами [124] показано, що при однакових значеннях міцності на стиск, міцність на вигин бетону на основі заповнювачів рециклінгу є більша, ніж на природних заповнювачах. В той же час, зазначено, що RCA характеризується більш низькою щільністю в порівнянні з природними заповнювачами, а бетон на його основі має нижчу міцність на стиск. При цьому бетони на основі RCA характеризуються пластичною усадкою, яка спричинена всмоктуванням води з тіста у затверділий розчин. Попереднє зволоження та насичення поверхні

перероблених заповнювачів RCA дозволяє покращити легковкладальність бетонної суміші, при цьому підвищена витрата води призводить до виникнення усадочних деформацій бетону.

Malešev M. та ін. [113] встановлено, що при заміна 50% і 100% крупного заповнювача на RCA з відходів лабораторних випробувань суттєвих змін міцності контрольного бетону не спостерігалось. Однак, експериментальні дослідження було проведено з використанням якісного крупного заповнювача вторинного бетону, з дотриманням правил проектування та виробництва нового типу бетону.

Троян В., Гоцом В. та ін. [136] висвітлено проблеми з перероблення будівельних матеріалів для післявоєнної реконструкції в Україні. Показано, що залежно від технології та ступеня переробки заповнювачів, бетон може характеризуватися пониженими технологічністю, механічними властивостями та підвищеною усадкою. Таке погіршення властивостей переробленого бетону зазвичай пояснюється налипанням затверділого цементного розчину на поверхні перероблених заповнювачів, які характеризуються підвищеною пористістю. Автори зазначають, що такі ключові концепції допомагають сформулювати поточний стан знань про перероблення бетону, щоб визначити прагматичні та ефективні шляхи для розширення використання заповнювачів рециклінгу бетону в Україні.

Таким чином, підвищена пористість та проникність, а також знижені механічні та хімічні властивості перероблених заповнювачів можуть призводити до зростання водопотреби та негативно впливати на реологічні показники нового бетону, що сприяє зниженню міцності, модуля пружності, морозостійкості, стійкості до проникнення хлоридів і карбонізації, одночасно збільшуючи усадку та повзучість. З метою підвищення будівельно-технічних властивостей таких еко-бетонів, можливі різні підходи, які включають екобетони зменшення вмісту затверділого розчину на поверхні RCA, зниження його пористості та водоадсорбційних властивостей, сортування, обмеження вмісту та контроль розміру заповнювачів у переробленому бетоні. У зв'язку з

тим, необхідно провести ґрунтовний аналіз із вивчення впливу мінеральних добавок та модифікаторів на процеси структуроутворення цементуючої матриці бетону для розроблення напрямків підвищення міцності та довговічності бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону.

1.3. Способи керування процесами структуроутворення цементуючої матриці та формування контактної зони бетону

Довговічність бетонів визначається як об'єктивними факторами (умови експлуатації, особливості конструктивних рішень та ін.), так і суб'єктивними, що пов'язані з характером мікро-, мезо- та макроструктури штучного каменю [39, 51, 108, 127]. Формування механічних властивостей бетонів обумовлюється міцністю мікро- та макроструктури (40%), адгезійною взаємодією розчинової складової з крупним заповнювачем (40%) та механічним зчепленням цементного тіста з нерівностями поверхні заповнювача (20%) [22, 38, 47].

Найбільш важливими досягненнями в галузі сучасного бетонознавства є дослідження на мікрорівні процесів, що дозволяють покращити основні фізико-механічні властивості та довговічність бетонів [31, 48, 71, 129]. Від ранньої стадії та до періоду гідратаційного тверднення, заповнювачі виконують роль підкладки, що регулює роль контактів адгезії, які виникають у процесі гідратації та тверднення в'язучих речовин. Процес структуроутворення в цементних бетонах на контакті з інертними заповнювачами залежить від кристалохімічних властивостей цементуючої матриці, гідратних фаз та їх питомої поверхні [29]. Фізико-хімічна взаємодія між заповнювачами і цементним тістом на всіх стадіях виготовлення бетону проявляється у змочуванні, адсорбції, хемосорбції, утворенні адгезійних зв'язків різної природи.

Кривенком П.В., Пушкарьовою К.К. та ін. [22] показано, що основний вклад у формуванні міцності та будівельно-технічних властивостей цементних матеріалів вносить контактна зона (interfacial transition zone ITZ), що являє собою поверхні поділу між цементним каменем і заповнювачем. Контактну зону розглядають як окремий структурний елемент цементних матеріалів, що відповідає за їх експлуатаційні характеристики. Властивості контактної зони обумовлені фізико-хімічним складом і фізико-механічними характеристиками заповнювачів, способом приготування, укладання, ущільнення бетонної суміші, умовами тверднення.

Стан зони контакту, який обумовлює силу зчеплення цементного каменю з зернами заповнювача, склад та структуру новоутворень, визначає основні технічні властивості бетонів, а саме: міцність, морозостійкість, корозійну стійкість та ін. Згідно з даними Малолєпши Я. [114], зона контакту формується за загальною схемою структуроутворення цементних матеріалів і обумовлює особливості структури, що утворюється. Прийнято зоною контакту вважати мікрооб'єм поверхні поділу «цементний камінь-заповнювач», що включає поверхневий шар заповнювача, шар цементу, що прилягає та границю поділу між ними. Згідно з дослідженнями [22, 102], міцність контактної зони залежить від типу використаної породи, вмісту кристалічної фази, наявності частинок сферичної форми, шорсткості поверхні зерен, здатності до подрібнення, а також морфології, пористості, щільності та хімічного складу.

Саницьким М.А. та ін. [40] показано, що характер контактної зони визначається особливостями гідратаційного тверднення в'язучих і структурою штучного каменю навколо поверхні заповнювача з різними кристалохімічними та структурними особливостями. Варто зазначити, що гідратаційне тверднення в'язучих залежить від багатьох факторів: умов тверднення, хімічного та мінералогічного складів, а також зовнішніх факторів, що включають водотвердне відношення, наявність добавок різного генезису та технологій, які використовуються.

Структура бетону з заповнювачами різної природи може відрізнятися перехідними поверхнями поділу між заповнювачами та розчиною частиною навколо них. Як зазначають автори [22], на макрорівні можна виділити такі типи поверхонь поділу: розчинова частина і заповнювачі вступають у хімічну реакцію з утворенням перехідного шару з специфічними властивостями (властивості шару відрізняються від характеристик контактуючих матеріалів); заповнювачі та розчинова частина взаєморозчиняються, продукти гідратації утворюють зону модифікованого матеріалу; в хімічну реакцію із заповнювачами розчинова частина не вступає. В той же час, стан контактної зони макроструктури бетону може бути оцінений силою зчеплення заповнювачів з розчиною частиною, мікротвердістю та фазовим складом гідратних новоутворень.

Природа новоутворень, яка виникає у контактній зоні внаслідок фізико-хімічних процесів взаємодії заповнювачів різного мінерального складу з компонентами в'язучої речовини, визначає мікротвердість та зчеплення заповнювачів різного генезису в бетоні з цементним тістом. Бетони з використанням природних заповнювачів руйнуються за типом А (по розчину та заповнювачу) та типом Б (по розчину і поверхні зчеплення). Найбільш інтенсивна взаємодія відбувається в контакті з заповнювачами, які за складом подібні до розчинової частини бетону, для яких сила зчеплення може досягати значення 4 МПа. Для визначення ступеня досконалості структури контакту «мінерал-заповнювач – продукти гідратації в'язучої речовини» необхідно оцінювати можливість зростання мінералів за Руайе, що враховує параметри ґраток у площині сполучення кристалів.

Дослідження свідчать, що фізичні характеристики R_{CA} значно впливають на властивості бетонної суміші та затверділого бетону. Бетон, одержаний на основі рециклінгових заповнювачів, перероблених з відходів R_{AC} , як при повній, так і частковій заміні природних заповнювачів, в основному складається з фаз розчину, заповнювача та контактної зони (ITZ) між крупним

заповнювачем, свіжим і затверділим розчином на поверхні переробленого заповнювача.

Лі Х. та ін. [107] встановлено, що структура цементуючої матриці бетону на основі природного і RCA заповнювачів має різний характер (рис. 1.2, а, б). Як видно з рис. 1.2, б, заповнювачі RCA вкриті тріщинами та залишками затверділого розчину, що обумовлено процесами подрібнення та властивостями вихідного бетону, які переважно визначаються водоцементним відношенням (В/Ц). Тріщини, що утворюються в структурі RCA, знижують його міцність і призводять до проникнення, дифузії та поглинання рідин, що послаблює ITZ в бетоні.

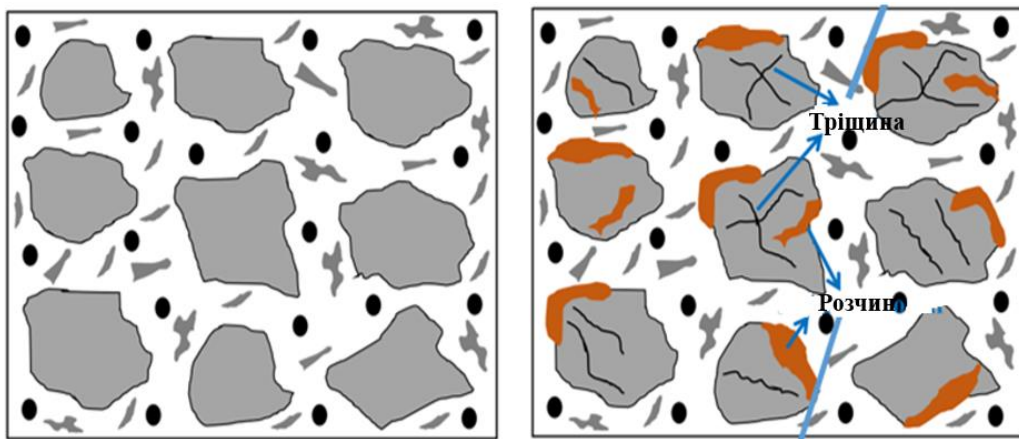


Рисунок 1.2 - Бетонна матриця з використанням: а – природних заповнювачів, б – заповнювача рециклінгу бетону [107]

Авторами [67, 68] описано, що RCA, отриманий з відходів бетону, містить 65–70 % крупнодисперсних і дрібнодисперсних природних заповнювачів і 35–30 % цементного тіста за об'ємом. Так, кількість приєднаного розчину в RCA коливається від 25% до 60% залежно від розміру заповнювача. Слід зазначити, що гранулометричний склад RCA є неоднорідний з високим вмістом дрібних фракцій, які характеризуються підвищеною питомою поверхнею. При цьому біля 20% цементного тіста є приєднано до RCA з розміром частинок від 20 до 30 мм. Підвищена пористість RCA призводить до збільшення водопоглинання в 2–3 рази порівняно з природним заповнювачем і може досягати до 12-15% як для крупного, так і дрібного заповнювачів. Слід зазначити, що через налипання розчину або цементного

тіста навколо зерен RCA створюється міжфазна перехідна зона, яка характеризується наявністю пустот у приєднаному розчині, має слабку адгезію, що призводить до зменшення механічних властивостей. Так, підвищена пористість бетону та слабка міжфазна контактна зона «заповнювач – матриця» може призводити до зниження міцності на стиск та розтяг до 40%.

Згідно з дослідженнями Makul N. та ін. [112] є різні типи ITZ в бетоні, виготовленому з різними видами дрібних заповнювачів (пісок кварцовий або після рециклінгу). Для вирішення проблеми збільшення міцності в контактній зоні та довговічності бетонів, автори пропонують встановити обмеження на мінімальну витрату цементу та максимальне водоцементне співвідношення, що використовується для конструкційних бетонів. При цьому введення пуцоланових добавок, таких як кремнезем, зола-винесення та ГДШ з різними методами змішування та прискореної карбонізації дозволить покращити мікроструктуру RCA.

Дослідження свідчать [97, 99, 111], що використання мінеральних добавок різної природи для виробництва екобетонів на основі перероблених заповнювачів викликає значний інтерес, що дозволить одержати будівельні композити з необхідними характеристиками. Автори [132] наводять результати систематичних досліджень ефекту впливу мінеральних добавок на міцність, усадку при твердненні в повітряно-сухих умовах, проникнення іонів хлориду з бетонів на основі переробленого заповнювача.

Çakır Ö. [75] встановлено, що бетони на основі переробленого наповнювача, що містять 50% гранульованного шлаку (ГДШ), характеризуються зменшенням втрати міцності. В той же час, випробування показали збільшення коефіцієнта проникності та дифузії хлоридів при використанні переробленого заповнювача в бетонах. При цьому введення ГДШ до складу бетонної суміші дозволило зменшити коефіцієнт дифузії хлоридів. Бетони, виготовлені з використанням шлакоцементу, мають тенденцію до повільнішого приросту міцності та більш високої міцності в подальші терміни тверднення. Це обумовлено пуцолановою реакцією з утворенням додаткового

C–S–H гелю в камені; зі збільшенням вмісту шлакоцементу в таких бетонів спостерігається зменшення водопроникності.

Кривенком П.В., Руновою Р.Ф. та ін. [22, 101] встановлено, що при використанні більш активних в'язучих систем, наприклад, шлаколужних, відбувається зміцнення та розширення контактної зони з гранітним заповнювачем, ширина ITZ складає 140 мкм. Підвищення мікротвердості та щільності в міжзерновому просторі можна пояснити інтенсивним утворенням зародків на поверхні підкладки заповнювача, а також кристалохімічною подібністю продуктів гідратації та гранітного заповнювача.

Giergiczny Z. [88] констатує, що зола-винесення (ЗВ) є однією з найкращих добавок для бетонів, оскільки пуцоланова добавка забезпечує підвищення легковкладальності, міцності та зменшення усадки «зелених» бетонів порівняно з традиційним бетоном. При цьому за рахунок пуцоланової активності золи-винесення, яка проявляється у зв'язуванні кальцію гідроксиду в низькоосновні гідросилікати в цементуючій матриці, забезпечується підвищена корозійна стійкість бетонів.

В ряді робіт [45, 62, 93, 96, 123] зауважено про позитивний вплив ЗВ в бетоні, як додаткового цементуючого матеріалу при частковій заміні крупного природного та переробленого заповнювачів. При введенні ЗВ до складу бетону з переробленими заповнювачами RCA структура пор покращується, що забезпечує підвищені механічні характеристики, стійкість до сульфатної корозії та економічні переваги.

Альтернативним рішенням для подальших досліджень бетонів на основі RCA є застосування багатокomпонентних композиційних цементів. Саницьким М.А., Соболю Х.С. та ін. [45, 82] запропоновано системний підхід до вибору мінеральних добавок різного генезису (ГДШ, зола-винесення, цеоліт, вапняк) для одержання малоенерговмісних модифікованих композиційних цементів з підвищеними будівельно-технічними властивостями. На сучасному етапі такий підхід дозволяє керувати процесами структуроутворення цементуючої матриці бетонів, а також одержати зелені бетони з підвищеними технологічними та

експлуатаційними властивостями [50, 66, 74, 76, 131]. В той же час, автори зазначають, що застосування цементозаміщуючих матеріалів, зокрема золи-винесення, призводить до зниження міцності, особливо в ранні терміни тверднення.

Відповідно до досліджень [19, 58, 65], ефективною пуцолановою добавкою штучного походження є мікрокремнезем, що представляє високодисперсний порошок, який утворюється в результаті конденсації діоксиду кремнію та є побічним продуктом феросиліцієвого сплаву і виробництва кремнію. Так, введення близько 7 - 12% мікрокремнезему (МК) дозволяє підвищити міцність, водонепроникність і корозійну стійкість цементуючих матеріалів. У той же час, введення 5 % МК до складу бетону на основі RCA дозволяє збільшити співвідношення міцності на розрив до міцності на стиск. Показано, що заповнювач RCA є більш пористий порівняно з природним і деяка частина цементу змішана з мікрокремнеземом за рахунок високої дисперсності проникає в пори заповнювача, що протягом деякого періоду тверднення дозволить збільшити міцність контакту між заповнювачами і цементуючою матрицею. Крім того, введення МК за рахунок «лікувального» ефекту після тривалого твердіння дозволяє зменшити кількість тріщин в RCA; при цьому, покращується якість міжфазної перехідної зони, підвищується зчеплення між «новим» цементом і залишками затверділого розчину на RCA.

Автори [100] зазначають, що бетонні зразки, які виготовлені шляхом повної заміни дрібних і крупних заповнювачів на перероблені заповнювачі з бетону при частковій заміні цементу на ЗВ і МК, характеризуються пониженою ранньою міцністю, крім цього спостерігається збільшення вмісту хлоридів, що може призвести до корозії сталеві арматури.

На сучасному етапі розвитку технології будівництва проблеми підвищення якості, довговічності, економічності бетону та залізобетону успішно вирішуються шляхом введення хімічних добавок [35, 106, 110, 118]. Класичні пластифікатори вже давно успішно застосовуються в товарних бетонах для зведення залізобетонних конструкцій [52, 98, 105]. Суперпластифікатори (СП)

можна розділити за хімічним складом та механізмом дії на чотири групи: сульфовані мелаїноформальдегідні смоли (МСФ), продукти конденсації нафталінсульфокислот з формальдегідом (НСФ), очищені або модифіковані лігносульфонати (ЛСТМ) та комплексні добавки на їх основі, інші суперпластифікатори на поліакрилатній та полікарбоксилатній основах РСЕ (полігідроксильні вищі карбонові кислоти, водорозчинні олігомери акрилатного ряду, алкілаурил-сульфонати, сульфовані поліоксикетони, олігомери ефірів сульфанової кислоти та ін).

Згідно з дослідженнями [86, 90], за механізмом дії СП характеризується адсорбцією молекул на поверхні гідратних новоутвореннях цементних частинок зі зміною іонно-електростатичного потенціалу (звичайні СП), а також стеричним ефектом (РСЕ). Однак у бетонах водоредукуюча дія суперпластифікаторів як звичайних, так і високоефективних РСЕ поширюється лише на дисперсну фазу, якою є лише цементно-водна дисперсія [89, 120]. При низькій витраті цементу в бетонній суміші знижується вміст водно-дисперсної фази, яка забезпечує водоредукуючу дію СП і РСЕ. Отже, високого водоредукуючого ефекту можна досягти лише в бетонах з високою витратою цементу. Для підвищення ефективності дії СП та РСЕ необхідно ввести в бетонні суміші певну кількість дисперсної фази у вигляді мінеральних модифікаторів з питомою поверхнею $S_{\text{уд}} = 4500 \text{ см}^2/\text{г}$ і більше. З іншої сторони, підвищена водопотреба бетонів на основі РСА для забезпечення високої рухливості, у випадку товарних бетонів, також вимагає високоефективних суперпластифікаторів, які забезпечуватимуть високий водоредукуючий ефект. На даний час, найефективнішими модифікаторами, які забезпечують високі значення водоредукуючого, технологічного та технічного ефектів є полікарбоксилатні суперпластифікатори [83, 89, 91, 94].

Plank та ін. [119] показано, що існує не один вид РСЕ, а сімейство РСЕ, які можуть характеризуватися досить різною дією. Зокрема, слід відзначити їх схильність до несумісності з цементом, що може бути пов'язана з їх молекулярною структурою [49]. Полікарбоксилати можуть містити групи з

поліоксиалкіленом, особливо поліетиленові або поліпропіленгліколеві групи, а також мономери карбонової кислоти та/або ангідриду карбонової кислоти (напр. акрилова кислота, метакрилова кислота, малеїнова кислота, ітонова кислота та їх ангідриди). Крім того, мономери на основі вінілу або акрилату можуть додати свій внесок у хімічну структуру РСЕ.

За твердженнями Aïtcin P., Flatt R., Collepardi M. та ін. [59, 80, 85], введення високоефективних РСЕ дозволяє оптимізувати відношення «вода – цемент» і «вода – в'язуча суміш» при суттєвому водоредукуючому ефекті ($\Delta B/C=25-40\%$) із забезпеченням високої міцності бетону. В той же час, важливим завданням в технології товарного бетону є забезпечення його технологічності – збереження рухливості бетонної суміші в часі. Авторами [118] встановлено, що РСЕ, отримані з акрилової та малеїнової кислоти, мають довгий хребет і бічні ланцюги, а також карбоксилатні групи ($R-COO^-$), що підвищують гідрофільність, але здатні сповільнювати процес гідратації. Введення таких модифікаторів дозволяє сповільнити процеси гідратації цементу. Модифікатори значно зменшують кількість води замішування з одержанням литої суміші товарного бетону. Це дозволяє транспортування бетонних сумішей на тривалі відстані з забезпеченням при цьому необхідного класу міцності бетону. Слід відзначити підвищену вартість РСЕ, що призводить до зниження економічної ефективності бетонів. Разом з тим, застосування заповнювачів рециклінгу вимагає високоефективних суперпластифікаторів для одержання бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Автори [91, 97, 121] стверджують, що механічні властивості бетону, виготовленого з дрібних перероблених бетонних заповнювачів, можуть характеризуватися такими ж властивостями, як і звичайний бетон, якщо використовувати суперпластифікатори для зниження водоцементного відношення. Pereira P. та ін. [117] досліджено вплив суперпластифікаторів на властивості товарних бетонів (заповнювач $D_{max}=25$ мм) з додаванням дрібного переробленого заповнювача (коефіцієнт заміщення 10%, 30%, 50% та 100%), золи виносення та вапняку. Показано, що підвищення міцності під час

використання 3,5 мас.% PCE чітко пов'язане зі зменшенням відношення вода/цемент; при цьому менш ефективною добавкою виявився пластифікатор на основі ЛСТ. В той же час, введення PCE через 28 діб забезпечує збільшення міцності на стиск до 34,8% і 69,5% ($f_{cm}=63-65$ МПа) за рахунок водоредукуючого ефекту дії PCE.

Результати досліджень Makul N. та ін. [112] свідчать, що введення звичайного суперпластифікатора дозволяє знизити В/Ц на 16%, а високоефективного PCE - на 26% для бетонів на основі RCA. Крім того, спостерігається збільшення стійкості до водопоглинання, сорбції, міграції хлоридів і карбонізації. Встановлено, що ефективність бетонів на основі RCA можна покращити шляхом тривалого твердіння, нових способів змішування, введенням пуцоланових добавок і редукуванням водовмісту бетонної суміші.

Підсумовуючи вище наведене, можна стверджувати, що актуальними із теоретичної та практичної точок зору є дослідження, спрямовані на розроблення еко-ефективних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону за рахунок введення активних мінеральних компонентів, полікарбоксилатних суперпластифікаторів на різній полімерній основі, що дозволить керувати процесами структуроутворення, міцністю контактної зони на макро-, мезо- та мікрорівнях і забезпечить підвищені експлуатаційні властивості.

1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза

Розроблення нових інноваційних низькоенергоємних будівельних матеріалів є одним із пріоритетних завдань технологічного та економічного розвитку в галузі будівництва. Дослідженнями Ю.М. Баженова, З.Я. Бліхарського, В.І. Гоца, Л.Й. Дворкіна, П.В. Кривенка, А.А. Пługіна, К.К. Пушкарьової, Р.Ф. Рунової, М.А. Саницького, Х.С. Соболя, С.Й. Солодкого, О.В. Ушерова-Маршака, С.М. Толмачева, В.В. Трояна, Л.О. Шейніча, У.Д. Марущак, С.О. Кровякова, Т.П. Кропивницької, І.І. Руденка, В.В.

Житковського, P.C. Aitcin, S. Fits, Z. Giergiczny, W. Kurdowski, J. Malolepshy, A. Neville J. Plank та ін. висвітлено сучасні уявлення про особливості технологічних рішень щодо проектування і виготовлення бетонів різного функціонального призначення та розглянуто проблеми підвищення їх довговічності. В той же час, особливу актуальність отримує вирішення проблеми підвищення довговічності бетонів при використанні заповнювачів рециклінгу, що потребує розробки нових концептуальних рішень, направлених на перетворення відходів з фактору дестабілізації навколишнього середовища в фактор, який сприяє збереженню невідновлювальних природних ресурсів.

Аналіз відомих закономірностей в області будівельного матеріалознавства дозволяє висунути наукову гіпотезу щодо розроблення ефективних бетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями, що отримуються за рахунок використання рециклінгових заповнювачів бетону з оптимізованим гранулометричним складом і модифікуванням полікарбоксилатними суперпластифікаторами та пуцолановими активними мінеральними добавками із забезпеченням формування міцної контактної зони між поверхнею заповнювача і цементним каменем, що сприяє зниженню капілярно-пористої структури бетону на мікро, мезо- та макрорівнях.

Для досягнення мети та вирішення завдань розроблено структурно-логічну схему досліджень. Блок-схема досліджень (рис. 1.3) розкриває теоретичний аналіз характеристик і понять заповнювачів рециклінгу бетону, встановлення засобів регулювання контактної зони за рахунок введення комбінованої активної пуцоланової добавки «зола-винесення – мікрокремнезем» у поєднанні з полікарбоксилатними суперпластифікаторами та досягнення експлуатаційних властивостей еко-ефективних швидкотверднучих бетонів на макро-, мезо- та мікроструктурному рівнях.

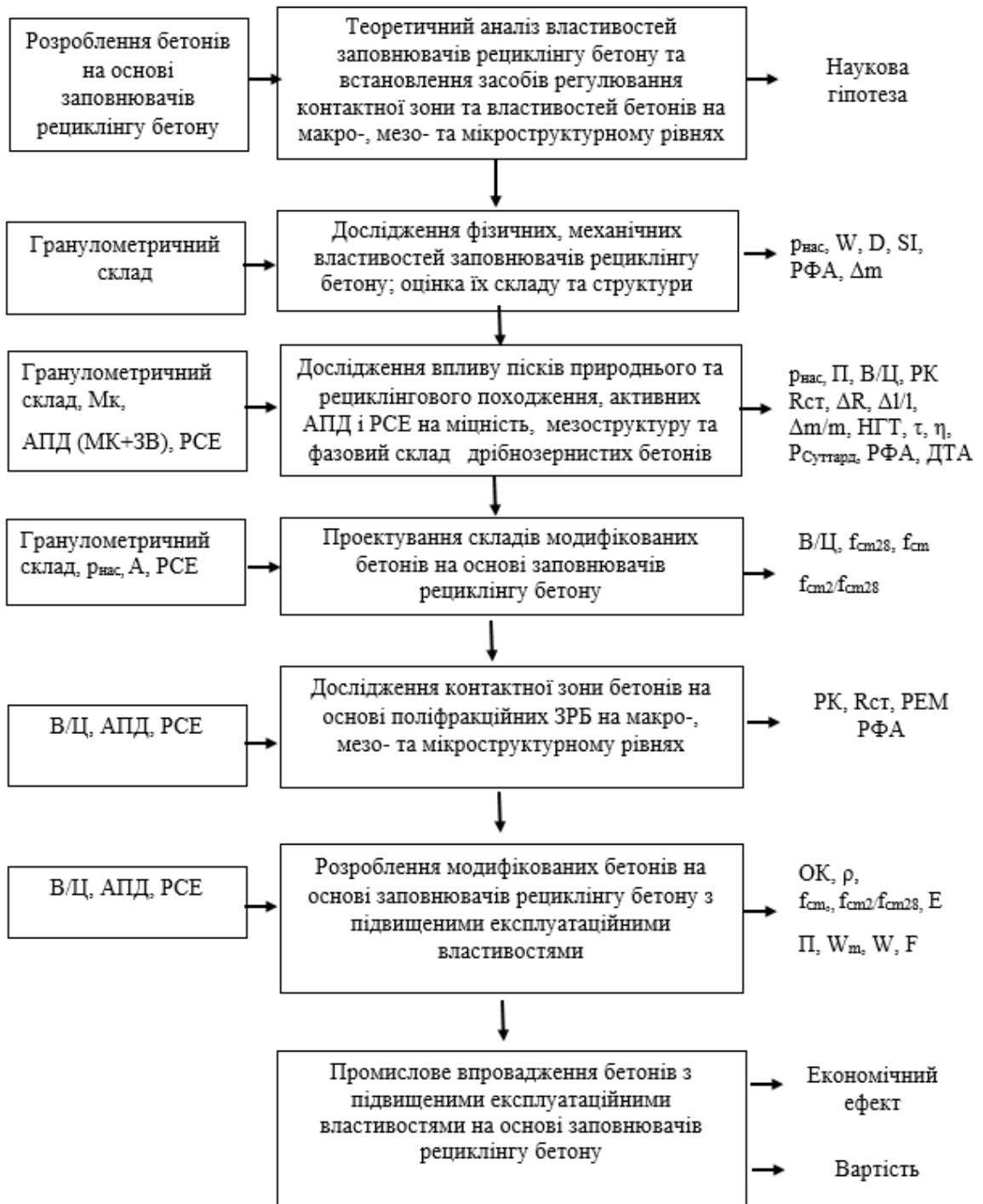


Рисунок 1.3 – Блок-схема досліджень

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика матеріалів

Для виготовлення бетонів у якості в'язучого використано портландцементи СЕМ І 42,5 R, СЕМ ІІ/А-S 42,5 R і СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R ПрАТ «Івано-Франківськцемент», які відповідають вимогам ДСТУ EN 197-1. Фізико-механічні властивості портландцементів наведено в табл. 2.1. Портландцементи з високою ранньою міцністю виготовляють з використанням портландцементного клінкеру нормованого мінералогічного складу (вміст мінералів, мас. %: C_3S – 60,35; C_2S - 13,79; C_3A – 6,96; C_4AF - 12,35).

Таблиця 2.1

Фізико-механічні властивості портландцементів
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

Тип цементу	$S_{\text{пит}}$, м ² /кг	A_{0045} , %	НГТ, %	Терміни тужавіння, год-хв		Границя міцності на стиск, МПа		
				поч.	кін.	2	7	28
СЕМ І 42,5 R	350	3,5	29,5	190	210	31,3	48,7	61,5
СЕМ ІІ/А-S 42,5 R	390	4,0	29,0	170	230	28,4	42,8	58,2
СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R	430	4,0	29,0	190	210	31,0	45,4	56,8

Для розроблення еко-ефективних бетонів для монолітного будівництва застосовано портландцемент з вапняком СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R, хімічний склад якого, одержаний методом флуоресцентного аналізу, наведений в табл. 2.2, мінералогічний кількісний склад представлено на рис. 2.1.

Таблиця 2.2.

Хімічний склад портландцементу з вапняком СЕМ II/A-LL 42,5 R

Оксиди	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	R ₂ O
Вміст, %	60,63	20,15	4,85	0,42	3,49	0,95	2,57	0,85

Як видно з рис. 2.1, для негідратованого портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R є характерні фази: гатруніт (Ca₃SiO₅), мервініт Ca₃Mg(SiO₄)₂, кальцит (CaCO₃), алюмоферит кальцію (Ca₂(Al,Fe³⁺)₂O₅), алюмінат кальцію (Ca₃Al₂O₆), сульфат магнію (MgSO₄), кварц.

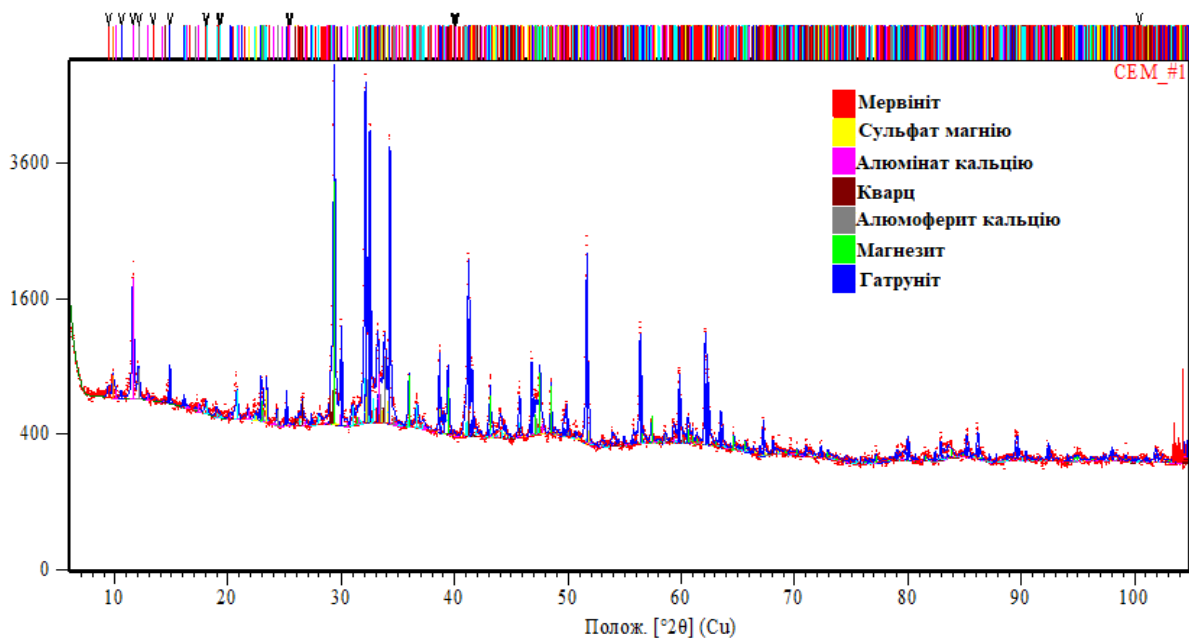


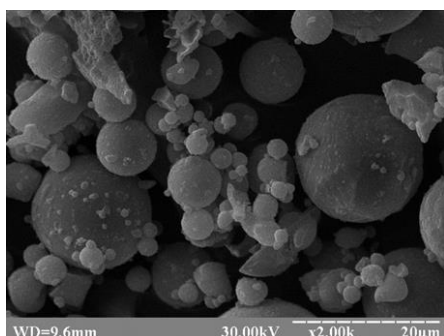
Рисунок 2.1 - Дифрактограма портландцементу з вапняком СЕМ II/A-LL 42,5

В якості активних мінеральних добавок (АМД) використано дрібнодисперсні матеріали штучного походження: зола-винесення (ЗВ) Бурштинської ТЕС та мікрокремнезем (МК) Elkem Microsilica Grade 940-U. Хімічний склад золи-винесення та мікрокремнезему наведено в табл. 2.3. Встановлено, що найвищим вмістом SiO₂ - 95,8 мас. %, характеризується мікрокремнезем, а для золи-винесення вміст SiO₂ складає 53,68 %. Зола-винесення у своєму складі також містить CaO, Al₂O₃ і Fe₂O₃, які становлять відповідно 3,85; 26,02 та 8,92 %.

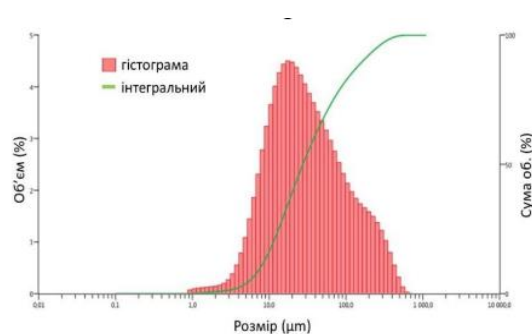
Вміст оксидів у мінеральних добавках

Оксиди	Вміст, %	
	Зола-винесення	Мікрокремнезем
CaO	3,85	0,3
SiO ₂	53,68	95,8
Al ₂ O ₃	26,02	1,0
Fe ₂ O ₃	8,92	0,9
MgO	2,72	0,7
SO ₃	0	0
TiO ₂	1,17	0
K ₂ O	3,06	0
Na ₂ O	0	1,3

Представлено мікрофотографії та гранулометричний розподіл частинок за розмірами (інтегральну та диференційну криві) золи-винесення (рис. 2.2, а, б) та мікрокремнезему (рис. 2.3, а, б). Згідно з даними гранулометричного аналізу для золи-винесення ($S_{\text{пит}}=3240 \text{ см}^2/\text{г}$) вміст фракції $\emptyset 1; \emptyset 5; \emptyset 10; \emptyset 20, \emptyset 45 \text{ мкм}$ становить відповідно 0,55; 9,07; 22,13; 39,39; 64,68 %, а розмір зерен $D_v(10), D_v(50), D_v(90)$ відповідає 5,59, 30,8, 167,0 мкм. Середні об'ємні діаметри $D [3; 2]$ і $D [4; 3]$ для золи-винесення відповідно 13,1 і 60,7 мкм. Максимум на диференційній криві розподілу частинок за розмірами становить 27,4 мкм.



а



б

Рисунок 2.2 – Мікрофотографія (а) та гранулометричний розподіл за розміром (б) золи-винесення Бурштинської ТЕС

Питома поверхня мікрокремнезему становить $S_{\text{пит}}=7200$ $\text{см}^2/\text{г}$. Вміст фракції $\text{Ø}5$; $\text{Ø}20$ $\mu\text{м}$ становить відповідно 5,76 % і 30,71 %, а розмір зерен $D_v(10)$, $D_v(50)$, $D_v(90)$ відповідає 9,5; 43,0; 130,0 $\mu\text{м}$. Середні діаметри D [4; 3] і D [3; 2] для мікрокремнезему складають відповідно 57,9 і 22,1 $\mu\text{м}$.

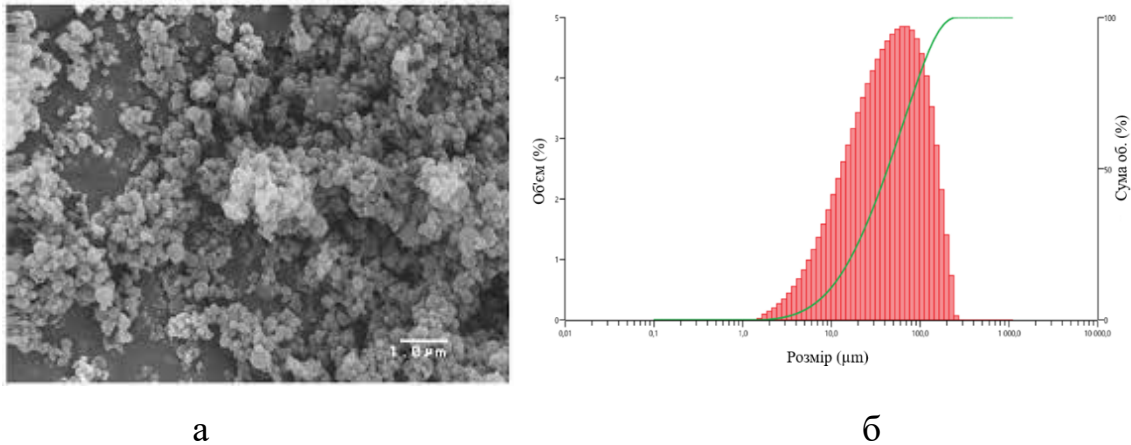


Рисунок 2.3 - Мікрофотографія (а) та гранулометричний розподіл за розміром (б) мікрокремнезему

Для покращення властивостей контактної зони бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону проведено механо-активацію добавок пуцоланічної дії. Зола-винесення і мікрокремнезем змішували у співвідношенні ЗВ : МК=74 : 26 % та активували шляхом помелу у вібротліні. Питома поверхня активної пуцоланової мінеральної добавки (АПД) досягала $S_{\text{пит}}=5800$ $\text{см}^2/\text{г}$. З мікрофотографії (рис. 2.4, а) видно, що активована пуцоланова добавка «зола-винесення – мікрокремнезем» характеризується частинками розміром менше 10 $\mu\text{м}$ з дрібнодисперсною фракцією, яка аломеруються. При цьому показано, що на поверхні крупніших частинок золи приєднуються дрібнодисперсні частинки мікрокремнезему.

Згідно з даними лазерної гранулометрії (рис. 2.4, б), для АПД вміст фракції $\text{Ø}5$; $\text{Ø}10$; $\text{Ø}20$ $\mu\text{м}$ становить відповідно 22,62, 38,01, 59,89 %, а розмір зерен $D_v(10)$, $D_v(50)$, $D_v(90)$ відповідає 1,3; 12,7; 43,2 $\mu\text{м}$. Середні діаметри D [3; 2] і D [4; 3] для АПД складають відповідно 3,1 і 18,2 $\mu\text{м}$.

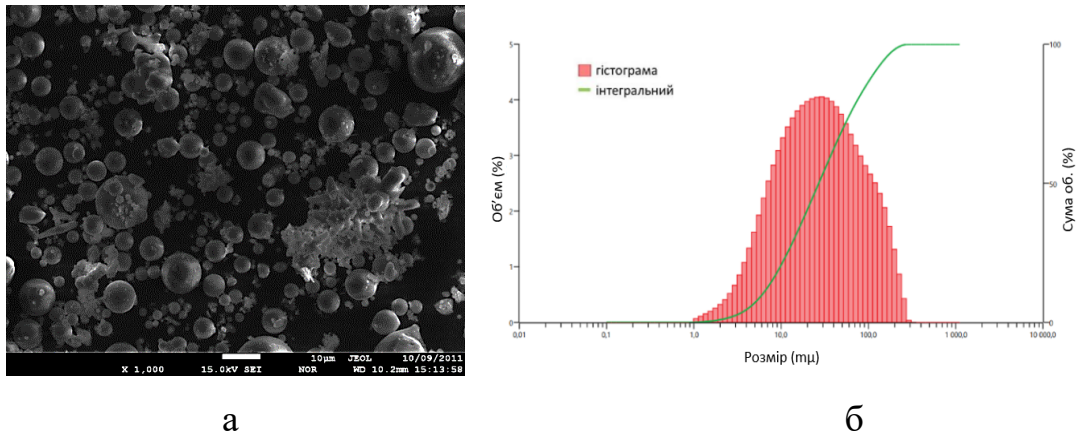


Рисунок 2.4 – Мікрофотографія (а) та гранулометричний розподіл за розміром (б) АПД

Для розроблення бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону як дрібний заповнювач використано піски: Давидівського родовища ($M_k=1,2$, насипна густина 1380 кг/м^3 , пустотність $47,8 \%$, вміст пиловидних і глинистих частинок $1,5 \%$); Миколаївського родовища ($M_k=1,3$, насипна густина 1390 кг/м^3 , пустотність $47,5 \%$, вміст пиловидних і глинистих частинок $2,8 \%$); пісок родовища Побережжя ($M_k=2,5$, насипна густина 1630 кг/м^3 , пустотність $38,4 \%$, вміст пиловидних і глинистих частинок $1,6 \%$). Встановлено, що піски Миколаївського та Давидівського родовищ класифікують за зерновим складом як дуже дрібні, в той же час, пісок родовища Побережжя відносять до групи середніх згідно з ДСТУ Б В.2.7-29-95. Характеристика пісків наведена в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Фізичні властивості пісків

Родовище піску	Насипна густина, ρ_n , кг/м^3	Модуль крупності, M_k	Пустотність $V_{мп}, \%$	Вміст пиловидних і глинистих частинок, $\%$
Давидів	1380	1,2	47,8	1,5
Миколаїв	1390	1,3	47,5	2,8
Побережжя	1630	2,5	38,4	1,6

Криві розсіювання дрібних заповнювачів Давидівського, Миколаївського родовищ та Побережжя наведено на рис. 2.5.

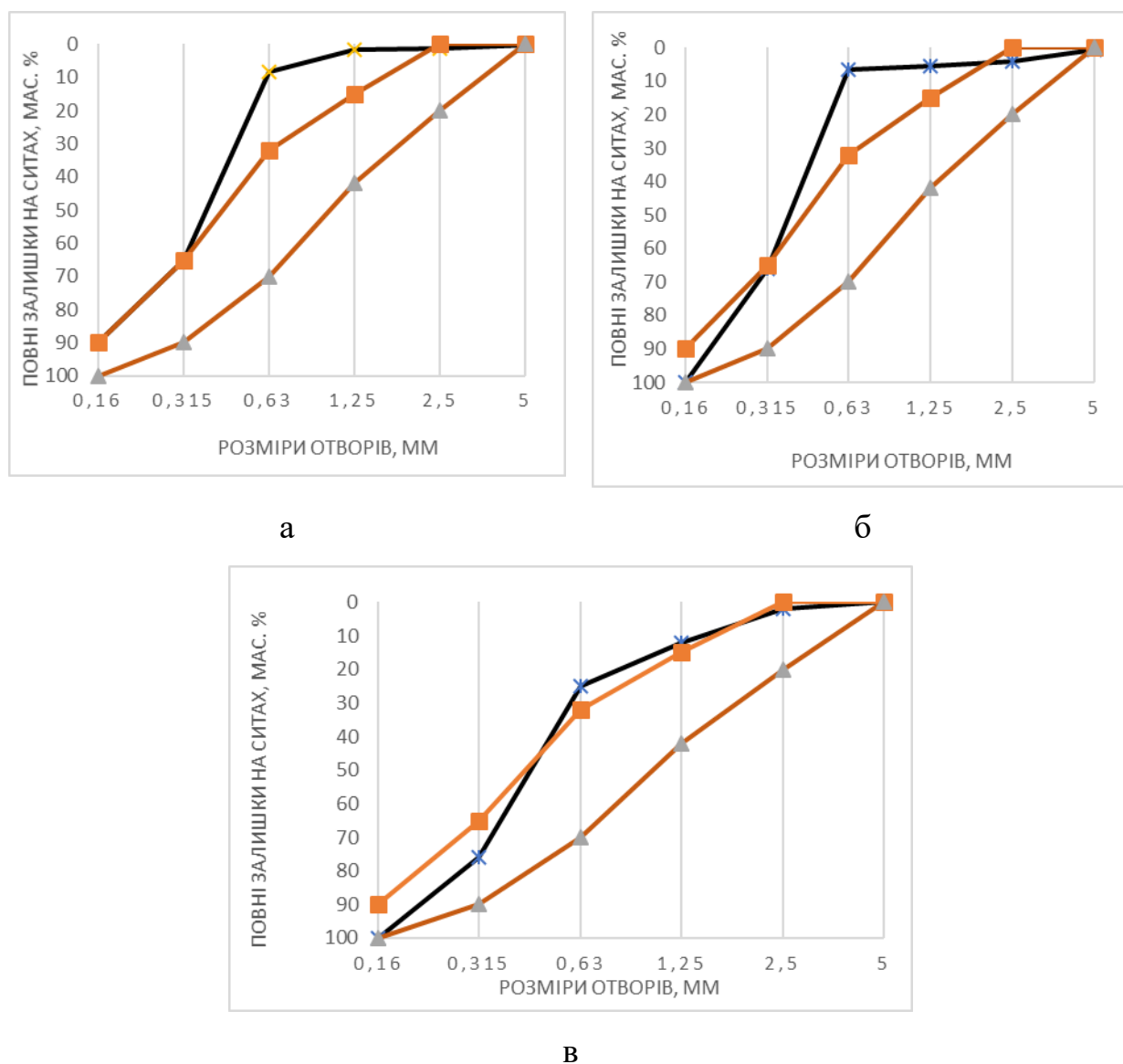


Рисунок 2.5 – Криві розсіювання дрібного заповнювача: а - Давидівське родовище; б - Миколаївське родовище; в - родовище Побережжя

В якості крупного природного заповнювача було використано гранітний щебінь Рокитнянського і Вирівського кар'єрів фракції 5-20 мм, характеристика яких наведено в табл. 2.5. За показниками даний щебінь відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 для виготовлення важких бетонів. Зерновий склад гранітного щебеню зображено на рис. 2.6.

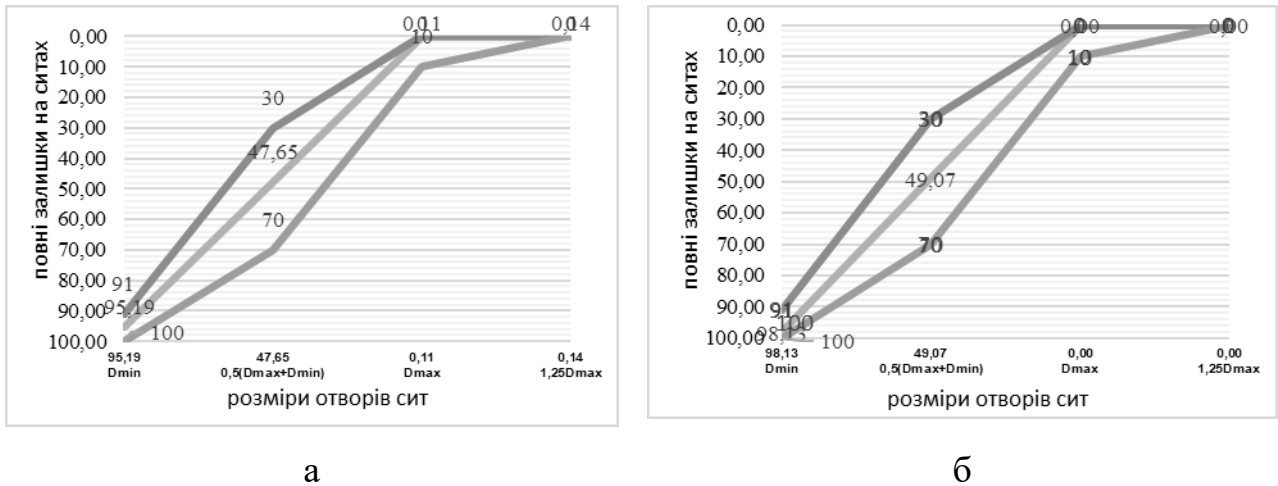


Рисунок 2.6 - Криві зернового складу гранітного щебеню: а - Рокитнянського кар'єру; б - Viriv'sьkogo кар'єру

Для покращення фізико-механічних властивостей клінкер-ефективних бетонів і його структури використано щебінь Рокитнянського кар'єру фракції 2-5 мм. Фізико-механічні властивості гранітного щебеню Рокитнянського та Viriv'sьkogo кар'єрів наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Фізико-механічні властивості гранітного щебеню згідно з ДСТУ Б В.2.7-75-98

Фракція, мм	Насипна густина, кг/м ³	Пустотність, %	Пористість, %	Вміст зерен пластинчатої форми	Марка за подрібнюва ністю
Рокитнянський кар'єр					
5-20	1410	46,7	1,8	11,6	1200
2-5	1280	51,6	2,4	9,2	1100
Viriv'sьkogo кар'єру					
5-20	1450	45,2	1,2	10,3	1400

Як заповнювачі рециклінгу бетону застосовано перероблені відходи товарного бетону класу міцності на стиск С20/25 власного виробництва ТзОВ «Бетонікс».

Для покращення показників якості бетонних сумішей та бетонів використано полікарбоксилатні суперпластифікатори (PCE) на різній полімерній основі фірм Basf, CHRYSO, Westplas, Sika. За ефектами дії полікарбоксилатні суперпластифікатори відносяться до суперводоредуруючих добавок згідно з ДСТУ Б В.2.7-171:2008. Технічні характеристики добавок наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Технічні характеристики полікарбоксилатних суперпластифікаторів

Показник	PCE-1	PCE-2	PCE-3	PCE-4
Густина, кг/м ³	1040-1080	1060-1080	1070 -1090	1040-1050
Діюча речовина	ефери полікарбоксилату	гібридні полімери	акрилові полімери	модифіковані акрилові полімери
pH	3,5-7,5	4,5 -5,5	6,0 -7,0	4,5-6,5

Нове покоління полікарбоксилатних суперпластифікаторів забезпечує стеричний механізм розрідження бетонної суміші. До цієї групи входять сополімери акрилової кислоти з акриловими ефірами (CAE), акрилові смоли (CLAP) і карбонові поліефіри (PCE), сполуки зі специфічною структурою, що містять особливо довгі бічні ланцюги, довжина яких залежить від кількості повторюваних етиленів (рис. 2.7). Макромолекули полімерів, що використовуються як псевдорозріджуючої домішки з групами полікарбоксилатів, мають гребінчасту структуру, тобто складаються з головного ланцюга, функцією якого є адсорбція на зернах цементу і прикріплених до нього бічних ланцюгів, завдання яких є просторове запобігання злежування цементних зерен, і як наслідок, розрідження бетонної суміші.

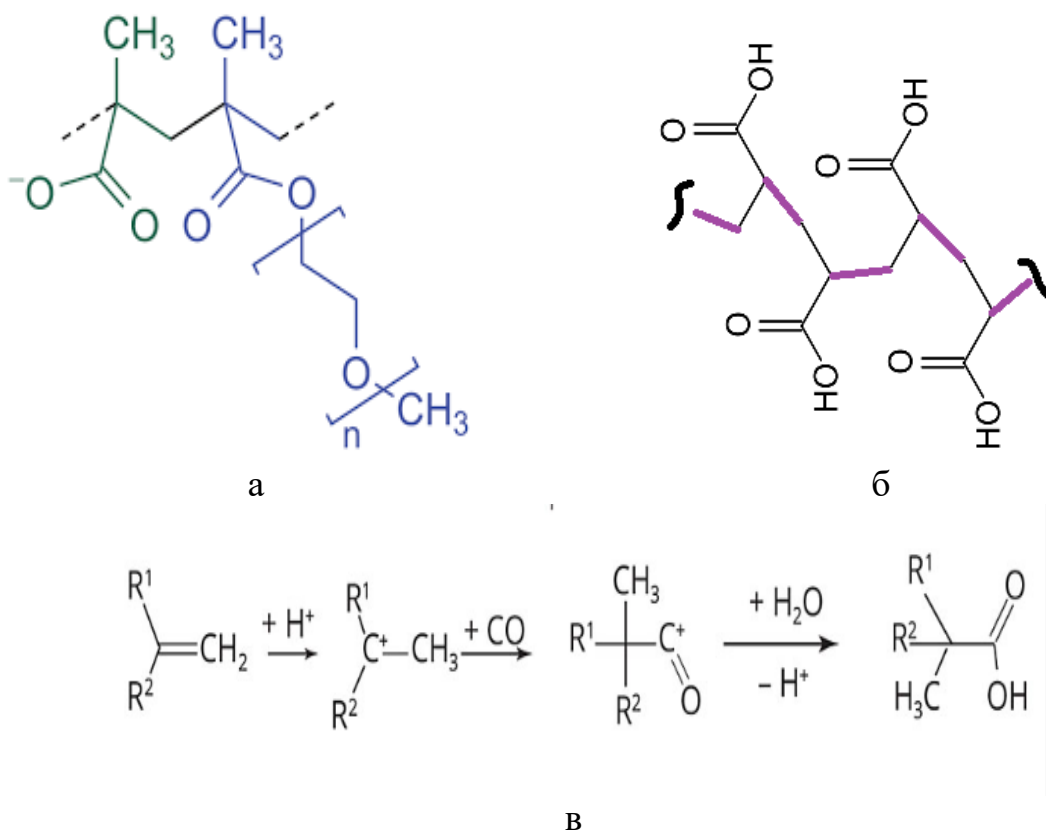


Рисунок 2.7 – Хімічна структура полікарбоксилатних суперпластифікаторів: а – полікарбоксилатні етери; б – акрилові полімери; в - модифіковані акрилові полімери

Ключовим питанням з точки зору дії суперпластифікаторів є правильний вибір трьох основних структурних параметрів полімеру. Механізм дії полікарбоксилатних суперпластифікаторів наведено на рис. 2.8.

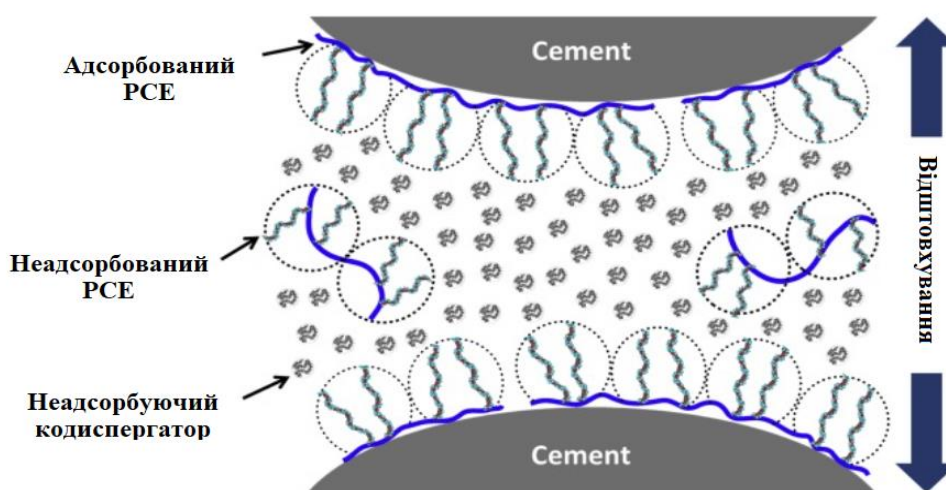


Рисунок 2.8 – Механізм дії полікарбоксилатних суперпластифікаторів

2.2. Фізико-механічні методи випробувань

Визначення фізичних, механічних та експлуатаційних властивостей бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону проведено відповідно до діючих нормативних документів і загальноприйнятих методикам.

Для розроблення еко-ефективних бетонів в якості заповнювачів застосовано будівельні відходи на основі бетону. Для подрібнення відходів бетону використано щоккову дробарку RETSCH ВВ 100 (рис. 2.9). Подрібнення відбувалося за рахунок роздавлення та стирання твердого матеріалу між двома щокковими механізмами.



Рисунок 2.9 – Щоккова дробарка для подрібнення відходів бетону

Визначення зернового складу, модуля крупності, істинної та насипної густин, пустотності дрібних заповнювачів проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Зерновий або гранулометричний склад заповнювачів характеризується вмістом у ньому зерен різної крупності і визначається просіюванням середньої проби через сита. Застосовано набір стандартних сит з круглими отворами діаметром 5; 2,5 мм і з сітками № 1,25; 063; 0315 і 016.

Фізико-механічні випробування гранітного щебеню та будівельних відходів виробництва проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-71-98. Зерновий склад крупних заповнювачів визначали, розсіваючи пробу на стандартному наборі

сит, який включає сито з квадратними отворами розміром 1,25 мм і сита з круглими отворами діаметрами 2,5; 5(3); 7,5; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60, 70(80) мм. Випробування з визначення геометричних характеристик заповнювачів (визначення відсоткового вмісту подрібнених зерен у крупних заповнювачах) виконували згідно з ДСТУ EN 933-5:2021.

Міцність крупних заповнювачів (гранітний щебінь і заповнювачі рециклінгу бетону) визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-71-98. Оцінку міцності проводили за показником подрібнюваності (рис. 2.10), що визначають границею руйнування зерен при стисканні у спеціальному циліндрі.



Рисунок 2.10 – Циліндр для визначення міцності крупного заповнювача

Вміст у кожній фракції щебеню зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форм ($P_{пл}$) визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-71-98 і DIN 4226-1. Співвідношення розмірів зерен визначали за допомогою штангенциркуля.

Ефективність впливу хімічних добавок, зокрема полікарбоксилатних суперпластифікаторів визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-69-98. В'язкість модифікованих цементуючих систем визначали з використанням віскозиметра ВЗ-1 за часом витікання рідини через калібрований отвір.

Визначенні рухливості, середньої густини бетонної суміші поводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-114-2002; міцність бетонів визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Випробування зразків проводили з використанням гідравлічного пресу Jeotest-068 (рис. 2.11). Технічні характеристики гідравлічного пресу

наведені в табл. 2.7. Визначення середньої густини, водопоглинання, пористості бетонів проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-170-2008.



Рисунок 2.11 – Гідравлічний прес типу Jeotest-068

Таблиця 2.7

Технічні характеристики гідравлічного пресу типу Jeotest-068

Характеристики	Значення
Тиск	2000 кН
Жорсткість компресійних пластин	55 НРС
Швидкість завантаження	0,1-25 кН/с

Призмову міцність, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2009. За базовий прийняли зразок розмірами 100 мм х 100 мм х 400 мм. Для вимірювання деформацій застосовували тензометри та індикатори, що забезпечують вимірювання відносних деформацій з точністю не нижче $1 \cdot 10^{-5}$. Витримування зразків і строки випробувань прийнято згідно з ДСТУ Б В.2.7-214. Випробування проводили шляхом поступового (ступенями) навантаження зразків-призм стандартних розмірів осьовим стискальним навантаженням до руйнування, при визначенні призмової міцності та до рівня 30 % руйнівного навантаження з вимірюванням у процесі навантаження зразків їх деформацій, при визначенні модуля пружності та коефіцієнта Пуассона.

Силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-227:2009 та за методикою [47]. Характеристики тріщиностійкості бетону визначали при рівноважних механічних випробуваннях із записом повної діаграми «навантаження- прогин» ($F-V$). Випробування зразків проводилися за схемою триточкового згину з використанням гідравлічного пресу. Загальний вигляд випробувальної установки зображено на рис. 2.12, а. При рівноважних випробуваннях зразки навантажували безперервно до їх розділення на частини з фіксацією повної діаграми стану матеріалу $F-V$.

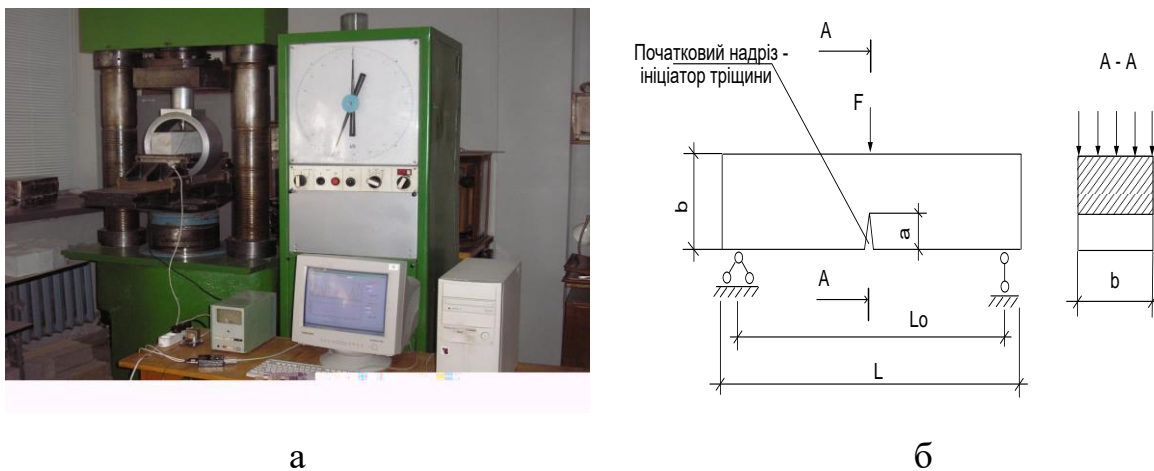


Рисунок 2.12 – Визначення силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості: а - випробувальна установка; б - схема випробувань зразка на згин з ініційованою тріщиною нормального відриву

Під час випробування використано зразки розміром 100x100x400 мм із початковим надрізом висотою 40 мм і шириною 2 мм (рис. 2.12, б). Швидкість навантаження зразків установлюють за швидкістю переміщення плити, що навантажує, преса в межах від 0,02 мм/с до 0,2 мм/с; при цьому час випробувань повинен становити не менше 1 хв.

Оцінку морозостійкості еко-ефективних бетонів на основі рециклінгу бетону проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-47-96. Дослідження морозостійкості проводили за прискореною методикою в кліматичній камері HS280/75 при температурі -50°C .

Водонепроникність еко-ефективних бетонів визначали з використанням моделі WUP 3-M TESTING згідно з EN 12390-8. Зразки-куби розміром

150x150x150 мм випробовували протягом (72 ± 2) год за тиску води 8 бар (рис. 2.13).

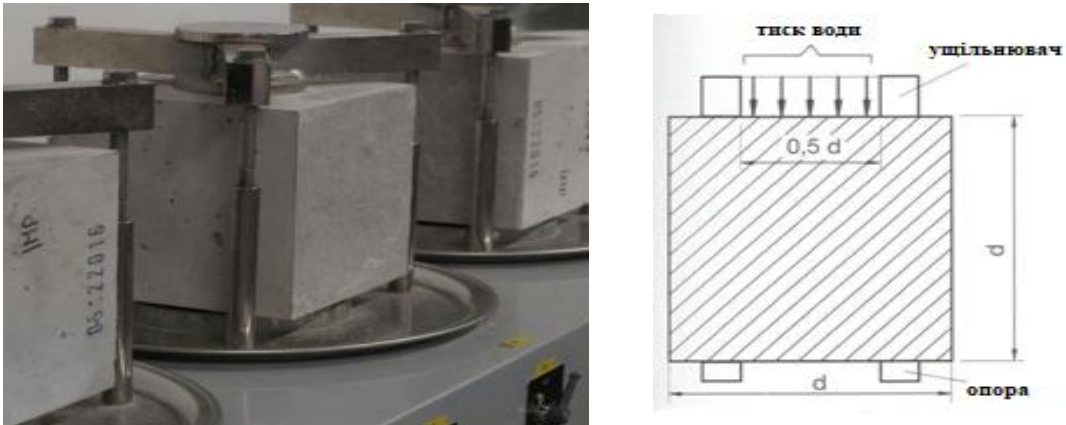


Рисунок 2.13 – Зразки-куби бетону під час випробування водонепроникності

Випробування глибини карбонізації проводили згідно з DIN EN 14630:2007. Для визначення глибини карбонізації захисного шару бетону використано 0,1% спиртовий розчин фенолфталеїну. Розчин наносили на свіжосколону поверхню бетону та проводили її оцінювання за кольором і глибиною проникнення.

2.3. Фізико-хімічні методи досліджень

Визначення дисперсності матеріалів проводили методом повітропроникності ($S_{\text{пит}}$) за Блейном, а також методом лазерної гранулометрії з використанням гранулометра Master Sizer 3000. При визначенні показника рН використано рН-метр типу рН-150МИ, який визначає рівень рН від 1 до 14.

Хімічний склад портландцементів, пуцоланових добавок, заповнювачів визначали з використанням рентгеноспектрометра ARL 9800 XP та рентгенофлуоресцентного аналізатора Elvax Light SDD Elvatech. Вивчення якісного і кількісного фазового складу заповнювачів рециклінгу бетону, модифікованого цементного каменю та цементуючої матриці еко-ефективних бетонів проведено з використанням рентгенівської дифрактометрії на дифрактометрі типу

PANalytical AERIS Macrolab. Технічні характеристики аналізатора та дифрактометра наведено в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Характеристики засобів вимірювальної техніки та обладнання

Найменування	Тип, марка, позначення	Клас точності, похибки
Рентгено-флуоресцентний аналізатор	Elvax Light SDD Elvatech	Діапазон від Na (11) до U (92), напруга анода рентгенівської трубки до 60 кВ, струм до 1000 мкА, SDD детектора площі 40 мм ² .
Дифрактометр	PANalytical AERIS Macrolab	Система, яка замінює одиночний детектор поруч паралельно з'єднаних детекторів для забезпечення 100-кратного збільшення ефективності порівняно з традиційними пропорційними лічильниками.

Термічний аналіз зразків проводили на дериватографі Q-1500 системи Паулік-Паулік-Ердей, з'єданого з персональним комп'ютером в інтервалі температур 20-1000°C під час вільного доступу повітря в піч. Зразки аналізували в динамічному режимі зі швидкістю нагрівання 10 0C/хв в атмосфері повітря. Маса зразка становила 500 мг.

Структуру зерен заповнювачів природних і рециклінгу бетону досліджували з використанням цифрового мікроскопу типу Sigeta Forvard 10-500x (рис. 2.14). Цифровий мікроскоп має наступні характеристики: збільшення від 10x до 500x, тип матриці CMOS-5 МПа, фокусна відстань від 10 мм до 300 мм, що якісно дозволяє встановити вигляд і особливості поверхні матеріалу, форму і розмір зерен, пори та ін.



Рисунок 2.14 – Цифровий мікроскоп Sigeta Forward 10-500x

Мікроструктуру цементуючої матриці еко-ефективних бетонів, модифікованого цементного каменю визначали з використанням растрового електронного мікроскопу з системою енергодисперсійного аналізу вітчизняного виробництва РЕМ 106И (роздільна здатність – 4 нм, діапазон регулювання збільшень - від 15 до 300 000 разів, діапазон вимірювання лінійних розмірів - 0,2 - 5 000 мкм). РЕМ-106И забезпечений мікроаналізатором хімічного складу, що діє в рентгенівському діапазоні та дозволяє одержувати повнішу інформацію про поверхневий шар об'єкта.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕЗОСТРУКТУРИ БЕТОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАПОВНЮВАЧІВ РЕЦИКЛІНГУ БЕТОНУ

3.1. Дослідження фізичних і механічних властивостей заповнювачів рециклінгу бетону

Використання бетону та залізобетону в будівництві, прискорення термінів реконструкції міст призведе до збільшення об'ємів вторинної сировини, зокрема відходів будівництва. Використання переробленого заповнювача з відходів будівництва та зносу як будівельного матеріалу є потенційним методом вирішення проблеми утилізації відходів, що може зменшити використання природного заповнювача.

Для розроблення еко-ефективних бетонів використано відходи важкого бетону класу міцності С20/25, які зберігались на заводі ТзОВ «Бетонікс» протягом 2-3 місяців (рис. 3.1, а). З метою одержання заповнювачів для бетону, відходи подрібнювали в щоківій дробарці в одну стадію шляхом роздавлення твердого матеріалу між двома плоскими поверхнями з одержанням зерен різної крупності (рис. 3.1, б).



а



б

Рисунок 3.1 – Відходи важкого бетону на ТзОВ «Бетонікс» (а), відходи бетону після подрібнення в щоківій дробарці (б)

Відбір проб відходів рециклінгу бетону та визначення їх зернового складу проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-71-98. Для визначення зернового складу відходів та повного аналізу фракцій застосовано стандартний набір сит з круглими отворами діаметрами 2,5; 5 (3); 7,5; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60, 70 (80) мм, а також набір сит для дрібного запоавнювача з круглими отворами діаметром 10; 5; 2,5 мм і сітками 1,25; 0,63; 0,315 мм (рис. 3.2).

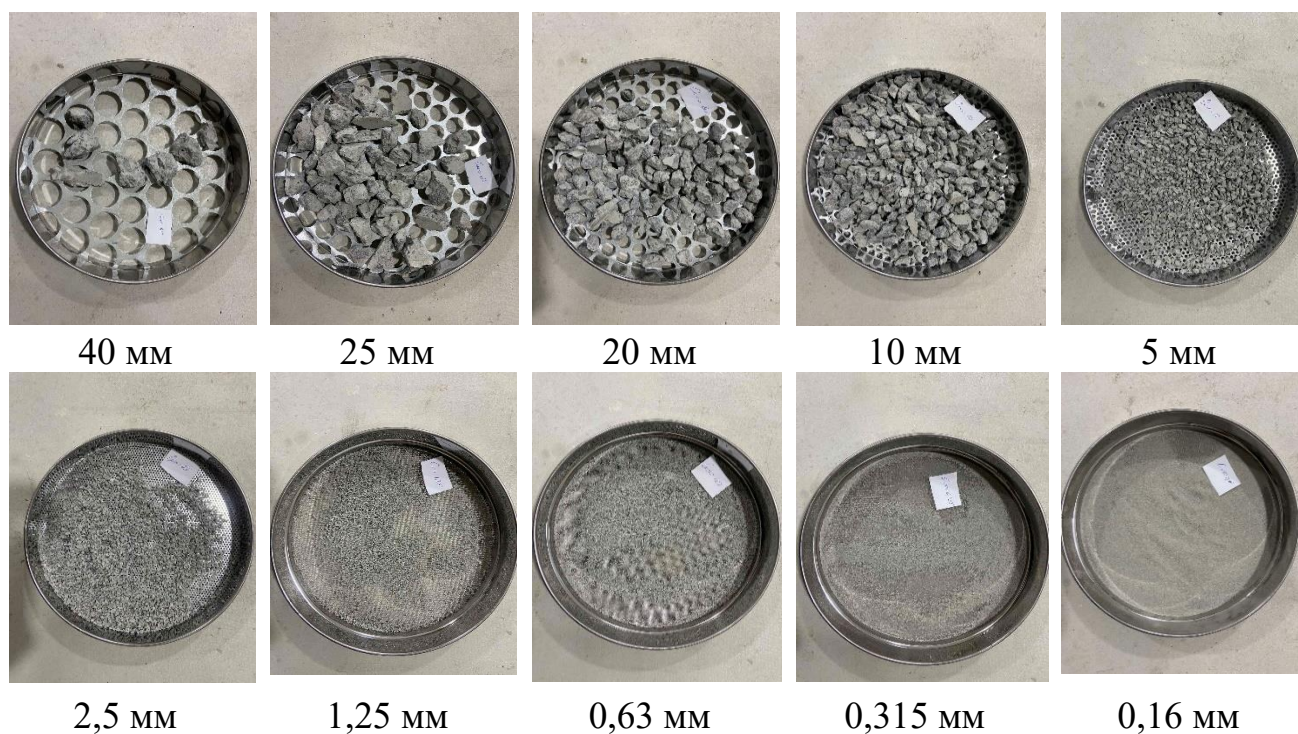


Рисунок 3.2 – Залишки на ситах 40-0,16 мм відходів рециклінгу бетону

Результатами досліджень після просіювання проби встановлено, що подрібнені відходи рециклінгу бетону характеризуються залишками на ситах від 0,16 до 40 мм. Як видно з рис. 3.3, відходи рециклінгу бетону характеризується високим вмістом фракції 10 мм, що становить 30,8 мас. %, для фракції 25 мм частковий залишок досягає 22,8 мас. %, фракції 20 мм - 21,3 %, фракції 5 мм - 10,3 мас. %. Незначний частковий залишок фіксується для фракції 40 мм, який становить 6,21 мас. %. В той же час, спостерігається низький вміст дрібних фракцій, на проміжку 2,5 - 0,16 мм, який в сумі досягає лише 8,1 %. В результаті проведеного розсіву відходів рециклінгу було встановлено, що вміст крупної фракції, а саме 10 - 40 мм досягає 81,11 мас. %, а вміст фракції менше 5 мм становить 18,4 мас. %.



Рисунок 3.3 – Часткові залишки подрібнених відходів бетону

Як видно з рис. 3.4, для відходів рециклінгу бетону характерні зерна різних розмірів. Форму зерен можна оцінити за співвідношенням їх розмірів. Для відходів рециклінгу бетону визначено коефіцієнт форми зерен K_f . Встановлено, що співвідношення між найбільшим (d_{max}) і меншим (d_{min}) розмірами зерен для відібраної проби може змінюватися від 8 до 5.



Рисунок 3.4 - Зерна відходів рециклінгу бетону

З метою застосування відходів рециклінгу бетону в якості заповнювачів для виготовлення еко-ефективного товарного бетону відсіяно крупну фракцію розміром 25-40 мм з одержанням заповнювача фракції 5-20 мм (ДСТУ Б В.2.7-71-98) та 4-16 мм (ДСТУ EN 933-7:2021). Встановлено, що після просіювання заповнювачів рециклінгу на ситах 0,16-20 мм (рис. 3.5, а) одержано часткові залишки, а саме, 16,2 мас. % (фракція 20 мм) 25,31 мас. % (фракція 15 мм). Відходи рециклінгу характеризуються рівномірним розподілом залишків на ситах: 5 мм - 10,13 мас. %, 7,5 мм - 12,46 мас. %, 10 мм - 12,52 мас. %, 12,5 мм -

12,92 мас. %. Для фракції 2,5 мм частковий залишок становить 5,8 мас. %, а фракції 1,25 мм – 1,03 мас.%; вміст дрібнодисперсної фракції проходу крізь сито менше 1,25 мм становить 3,24 мас. %. Після просіювання на ситах 0,063...16 мм, часткові залишки становлять: 25,3 мас. % на ситі 16 мм; 44,56 мас. % - 8 мм; 19,36 мас. % - 4 мм; 4,77 мас. % - 2 мм. Вміст дрібних фракцій менше 2 мм становить 6,01 мас.% (рис. 3.5, б).



а



б

Рисунок 3.5 – Діаграми часткових залишків заповнювачів рециклінгу бетону з використанням стандартних сит згідно з ДСТУ Б В.2.7-71-98 (а) та ДСТУ EN 933-7:2021 (б)

Проведено оцінку якості заповнювачів рециклінгу бетону за фізичними та механічними показниками. Параметром, який визначає ступінь площинності щебеню, є лещадність, що визначає вміст зерен пластинчатої та голкоподібної форми (рис. 3.6). Застосування щебеню кубовидної форми сприяє кращому ущільненню бетонної суміші. Дослідженнями встановлено, що для

заповнювача рециклінгу вміст зерен лещадної форми складає 6,5%, що відповідає групі крупного заповнювача за формою зерна кубовидний відповідно до ДСТУ Б В.2.7-74-98 та категорії лещадності SI₁₅ з вмістом лещадки ≤ 15 мас. % згідно DIN EN 933-4.



Рисунок 3.6 – Визначення зерен пластинчатої, лещадної та голчатої форми заповнювачів рециклінгу бетону

Для визначення фізичних характеристик заповнювачів рециклінгу бетону досліджено середню густину та водопоглинання зерен для фракції 5-20 мм. Для порівняння також використано гранітний щебінь фракції 5-20 мм. У результаті проведених досліджень (рис. 3.7, а) встановлено, що середня густина зерен гранітного щебеню становить 2630 кг/м³, а ЗРБ - 2400 кг/м³. Результати експерименту показують, що після занурення заповнювачів рециклінгу в воду спостерігається інтенсивне виділення бульбашок (рис. 3.7, б, в) свідчить про підвищену пористість ЗРБ. Водопоглинання гранітного щебеню (фр. 5-20 мм) становить 1,3 % (рис. 3.8), що характеризує його щільну структуру. В той же час, для ЗРБ (фр. 20 мм) водопоглинання збільшується в 3,46 рази і становить 4,5 %.

При цьому видно, що для загальної маси заповнювача рециклінгу бетону фракції 5-20 мм водопоглинання збільшується до 6,1 % (в 4,69 рази). Найбільшим водопоглинанням (W=7,8 %) характеризується фракція 0,16-5,0 мм. Загальна пористість для ЗРБ фракції 5-20 мм складає 9,3%.

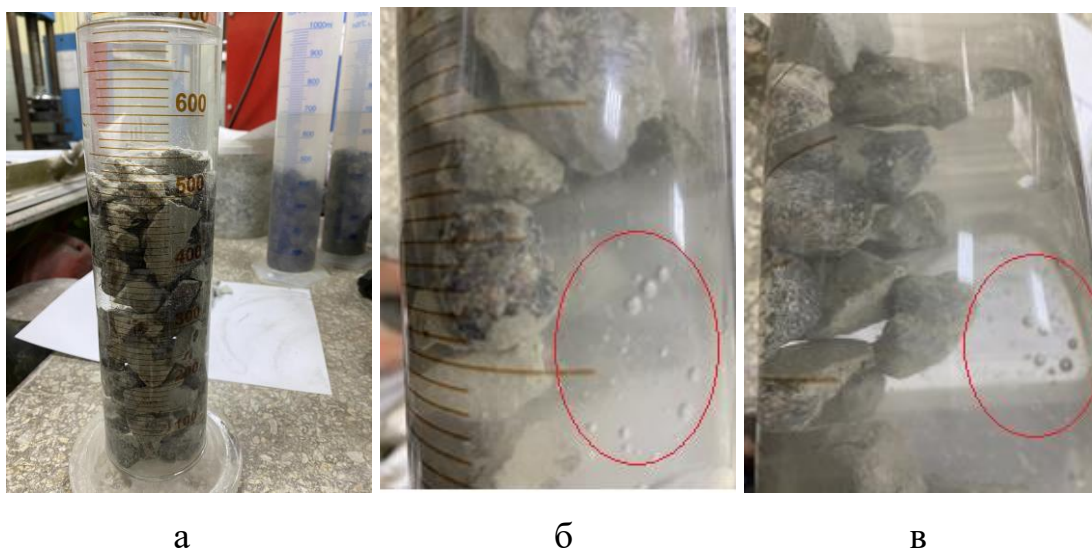


Рисунок 3.7 - Визначення середньої густини зерен заповнювача рециклінгу бетону (а), бульбашки повітря, що виділяються з зерен ЗРБ під час насичення водою (б, в)

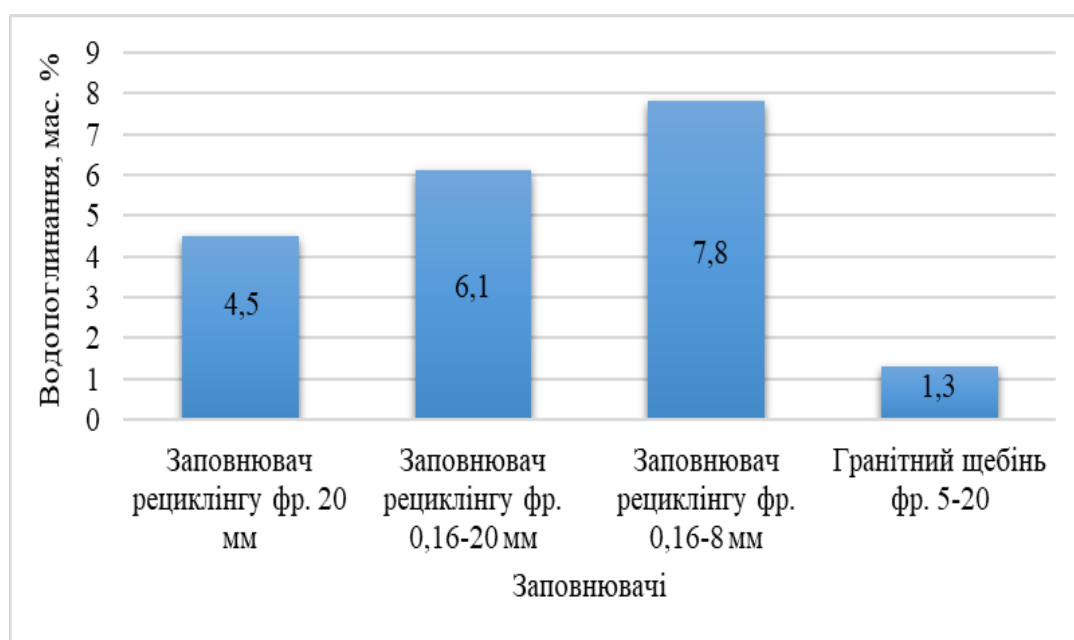


Рисунок 3.8 – Водопоглинання заповнювачів рециклінгу бетону і гранітного щебеню

Міцність бетонів залежить від марки за подрібнюваністю крупного заповнювача. Подрібнюваність заповнювача характеризується втратою маси після стискання проби в спеціальному циліндрі. Встановлено, що при визначенні показників якості суміші заповнювачів рециклінгу бетону фракції 5-

20 мм, середнє значення в сухому стані складає 15 %, що відповідає марці за подрібнюваністю 800 відповідно до ДСТУ Б В.2.7-75-98.

Порівняльна характеристика фізико-механічних властивостей крупних заповнювачів фракції 5-20 мм, а саме гранітного щебеню Рокитнянського родовища фр. 5-20 мм і заповнювача рециклінгу бетону наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Фізико-механічні властивості крупних заповнювачів

№ з/п	Найменування показників	Гранітний щебінь	Заповнювач рециклінгу бетону
1	Фракція, мм	5-20	5-20
2.	Повні залишки на ситах мас. %		
	$D_{\text{наймен.}}$	99,2	98,27
	$0,5 (D_{\text{найм.}} + D_{\text{найбільш}})$	70,7	64,43
	$D_{\text{найбільш}}$	8,2	56,33
	1,25 D	-	18,33
3	Вміст пиловидних, мулистих і глинистих часток, %	0,9	-
5	Наявність зерен пластинчатої, лещадної форми, %	11,6	6,5
6	Марка за подрібнюваністю	1200	800
6	Насипна густина, кг/м ³	1410	1135
7	Водопоглинання, %	1,3	6,1
8	Пористість, %	1,2	9,3

Для встановлення структури та особливостей заповнювачів проведено дослідження з використанням методів фізико-хімічного аналізу. Дослідженнями хімічного складу заповнювачів встановлено (табл. 3.2), що вміст SiO_2 у кварциті є найбільший і становить 97,92 %, у граніті кількість SiO_2 менше на 26,9 %, а у ЗРБ - на 48,5 %. В той же час, у складі ЗРБ спостерігається великий вміст CaO - 36,17 %, тоді як у кварциті та граніті - лише 0,18 і 2,35 % відповідно. Вміст Al_2O_3 у заповнювачах рециклінгу бетону досягає 4,89 %, тоді

як у складі граніту – 14,1 %; вміст K_2O у пробі граніту є найвищий і складає 4,32 %, у ЗРБ – лише 1,4 %.

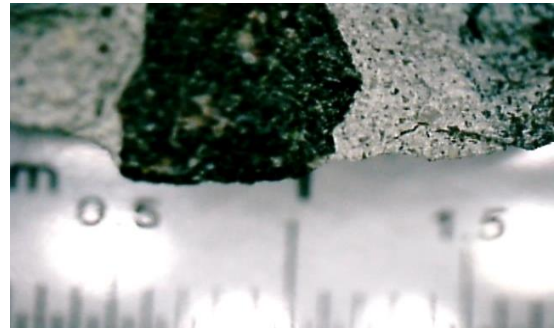
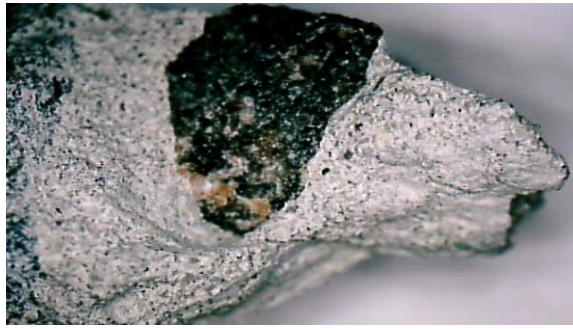
Таблиця 3.2

Хімічний склад заповнювачів різного генезису

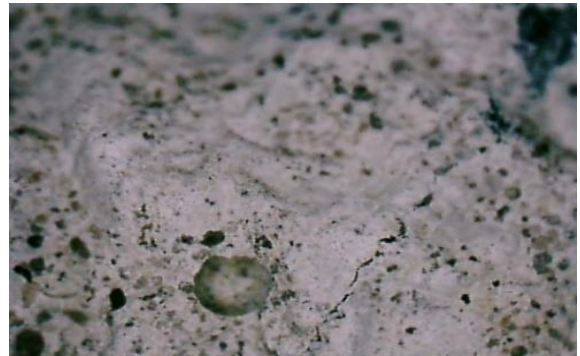
Оксиди	Вміст, %		
	Кварцит	Граніт	Відходи бетону
SiO_2	97,92	71,56	50,44
CaO	0,18	2,35	36,17
Al_2O_3	0,75	14,1	4,89
Fe_2O_3	0,31	2,35	3,20
MgO	0,20	0,54	1,35
K_2O	0,21	4,32	1,40
SO_3	0	0,08	0,62
Na_2O	0,10	3,15	0,49
TiO_2	0	0	0
Інші неорганічні компоненти	0,21	0	0
в.п.п.	0,12	0	0

Методом оптичної мікроскопії встановлено, що деякі зерна ЗРБ фракції 5 мм характеризуються темною частиною, що ймовірно є гранітним заповнювачем та сірою - налипаючим розчином, який обволікає зерна ЗРБ (рис. 3.9, а). Налипаюча частина розчину досягає розмірів від 0,3 до 0,5 мм. Як видно з рис. 3.9, а, б, сіра частина розчину характеризується наявністю тріщин від 0,1 до 0,3 мм, що послаблює контактну зону заповнювача.

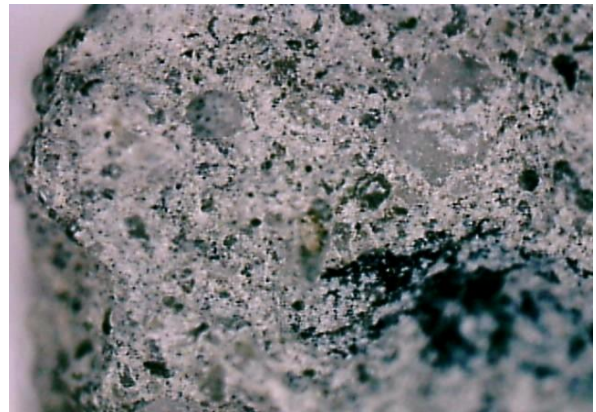
При дослідженні зерен фракції 2,5 мм (рис. 3.9, б) було виявлено великий вміст пор розміром від 0,1 до 0,3 мм, крім того фіксуються волосяні тріщини до 0,4 мм. При цьому поверхня розчину на зернах ЗРБ є пористою з частинами включень (0,5 мм) гранітного щебеню і кварцу. При дослідженні заповнювачів рециклінгу фракції 0,63 мм (рис. 3.9, г) спостерігаються частинки розчину, які характеризуються пористою поверхнею та наявністю повітряних пор ($d=0,1-0,3$ мм).



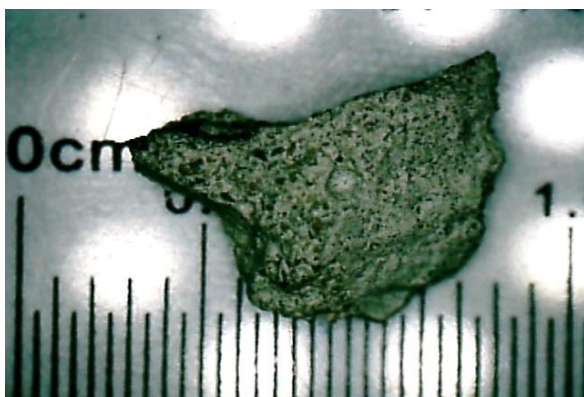
a



б



в



г

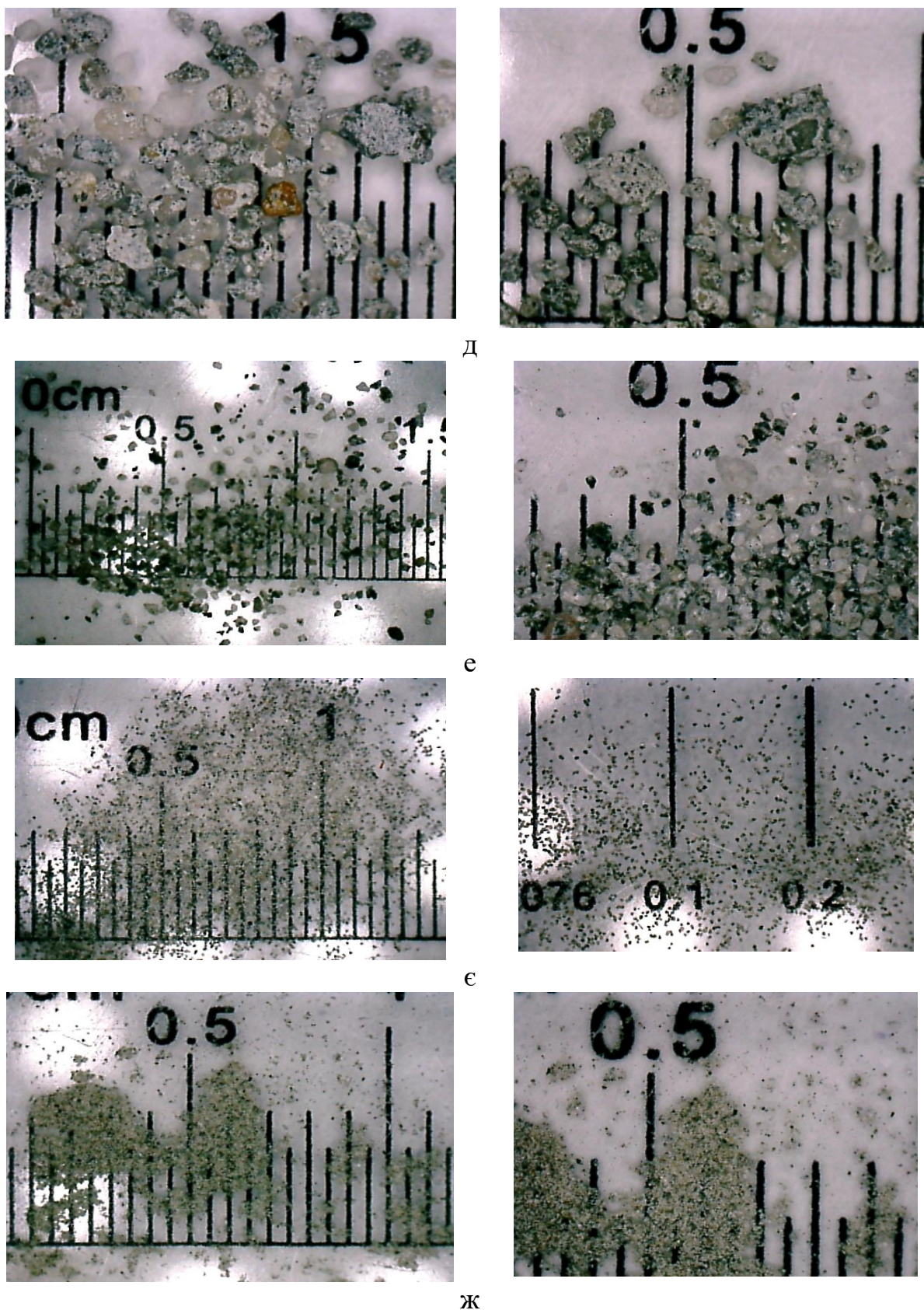


Рисунок 3.9 – Фотографії зерен заповнювачів рециклінгу бетону з використанням мікроскопу Sigeta Forvard для фракцій: а - 5 мм; б - 2,5 мм; в - 1,25 мм; г - 0,63 мм; д - 0,315 мм; е - 0,16 мм; є - прохід через сито 0,16 мм; ж - прохід через сито 0,08 мм

Розглянувши під мікроскопом фракцію 0,315 мм (рис. 3.9, д), встановлено наявність дрібних зерен сірого кольору розміром 0,25-0,3 мм з включенням прозорих сірих зерен розміром 0,2-0,25 мм, що свідчить про вміст кварцу (піску). Як видно з рис. 3.9, е, фракція 0,16 мм є дрібнодисперсна та характеризується включеннями дрібних частинок розчину і кварцових зерен білого кольору. При розгляді під мікроскопом фракції, яка пройшла крізь сито 0,16 мм, спостерігається вміст частинок розміром менше 0,1 мм сіро-жовтого кольору. Як видно з рис. 3.9, ж, для частинок заповнювачів рециклінгу бетону, які пройшли крізь сито 80 мкм, характерною є пилоподібна фракція - сірий порошок, зерна якого агломеруються, і які візуально можна віднести до частинок цементу.

Для визначення кількісного фазового складу зерен ЗРБ застосовано метод рентгенівської дифрактометрії, а для оксидного складу – метод флуоресцентного аналізу. Встановлено, що для зерен фр. 2,5-10 мм переважає вміст SiO_2 (табл. 3.3), який складає 55,41%, тоді як кількість CaO – 29,45%, Al_2O_3 - 7,5%.

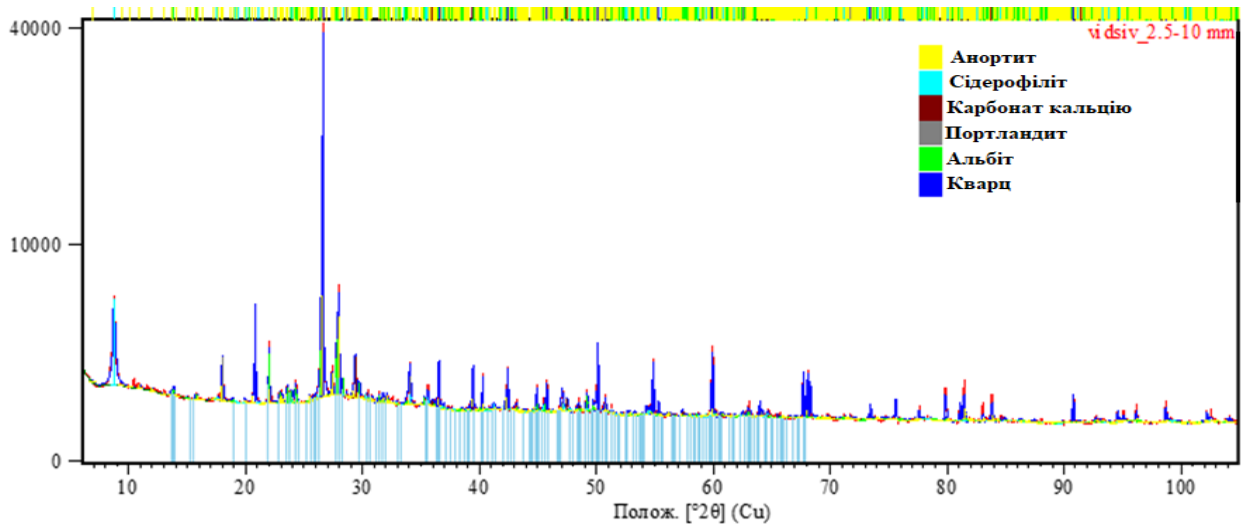
Таблиця 3.3

Хімічний склад фракцій заповнювачів рециклінгу бетону

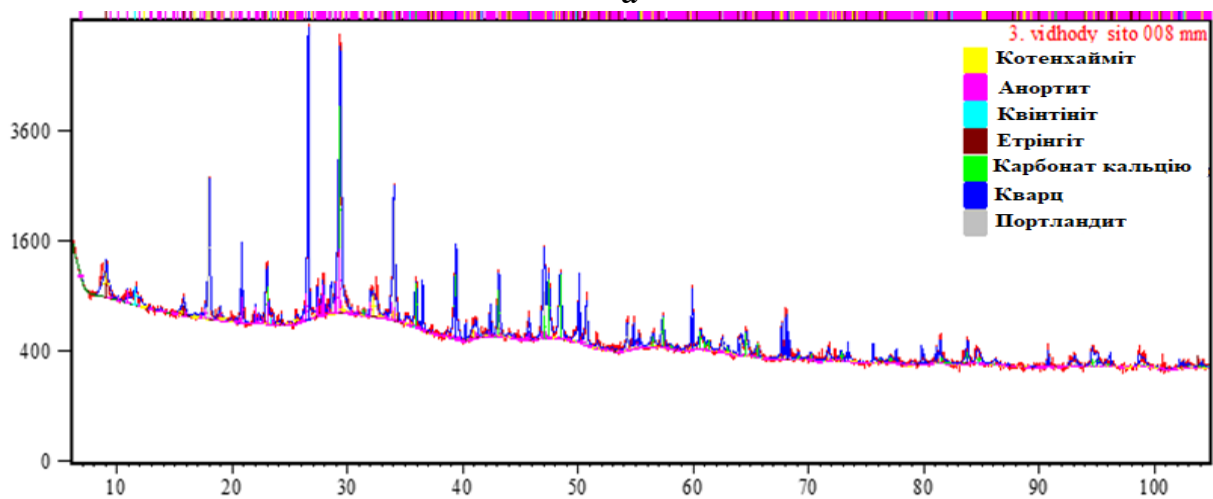
Оксиди	Вміст, %	
	Фр. 2,5-10 мм	Фр. <0,08 мм
CaO	29,45	56,53
SiO ₂	55,41	30,70
Al ₂ O ₃	7,59	4,51
Fe ₂ O ₃	3,63	4,51
MgO	0,68	0,09
K ₂ O	1,35	1,20
SO ₃	1,02	1,55

В той же час, для дрібнодисперсного порошку, який пройшов крізь сито з сіткою 0,08 мм, переважає кількість CaO – 56,53 %, а вміст SiO_2 складає 30,70 %. Вміст оксидів Al_2O_3 і Fe_2O_3 у фракції 2,5-10 мм складає 7,59 і 3,63 %, а для фракції менше 0,08 мм складає 4,51 % відповідно. Результати свідчать, що пилоподібну фракцію, яка пройшла крізь сито 0,08 мм, можна віднести до цементної частини.

Методом кількісного рентгенофазового аналізу за Рітвельдом (рис. 3.10, а) встановлено, що фр. 2,5-10 мм характеризується найбільшим вмістом SiO_2 - 35,9 %, а також фіксуються лінії кальцію гідроксиду ($d/n = 0,492; 0,310; 0,262; 0,192$ нм) - 2,8 % і кальцію карбонату ($d/n = 0,303; 0,248; 0,227; 0,206; 0,187$ нм) - 3,9 % та ін.



а



б

Рисунок 3.10 – Дифрактограми заповнювача рециклінгу бетону фракцій:

а - 2,5-10 мм, б – менше 0,08 мм

У той же час, для дисперсної фр. 80 мкм характерним є підвищений вміст CaCO_3 - 35,8 %, SiO_2 - 21,3 %, а також фіксуються $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 12,2 % і сліди етрінгіту ($d/n = 0,960; 0,557; 0,385; 0,255$ нм) – 0,8% (рис. 3.10, а, табл. 3.4). Отже, такий пил можна віднести до цементної частини відходів бетону.

Таблиця 3.4

Фазовий склад зерен заповнювачів рециклінгу бетону

Назва сполуки	Хімічна формула	Кількісний склад, %	
		Фр. <0,08 мм	Фр. 2,5-10 мм
Анортит	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	28,1	13,1
Квінтиніт	$\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{CO}_3) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1,8	-
Еtringіт	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	0,8	-
Кальцію карбонат	CaCO_3	35,8	3,9
Кварц	SiO_2	21,3	35,9
Портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	12,2	2,8
Сидерофіліт		-	10,8
Альбіт, Са-вмісний	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	-	33,6

Для фракцій ЗРБ досліджували втрати маси при дії температур 200, 400, 600, 800 і 1000 °С. Як видно з рис. 3.11, на кожному етапі під час збільшення температури з кроком 200 °С спостерігаються найбільші втрати маси для зразка фракції менше 80 мкм.

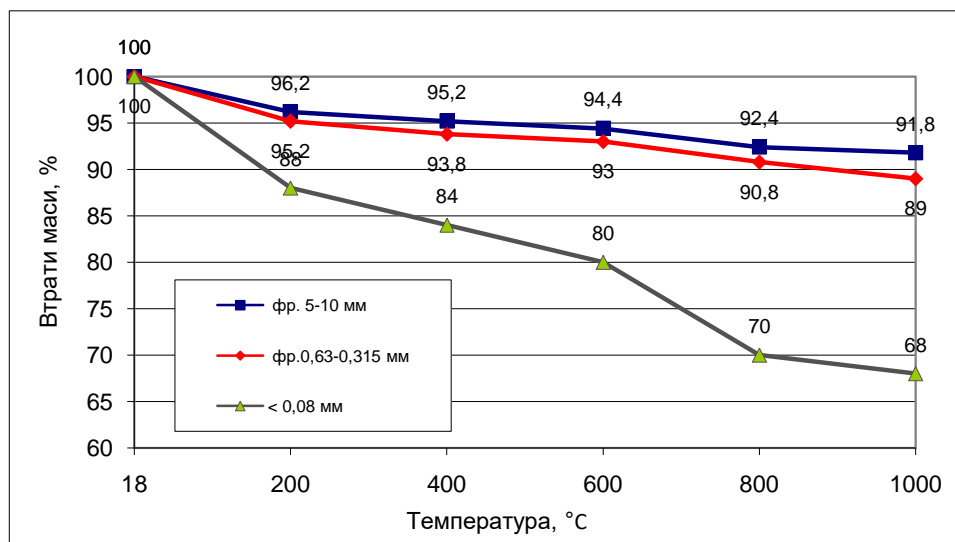


Рисунок 3.11 – Втрати маси різних фракцій ЗРБ

Так, при температурі 200 °С втрати маси склали 10 %, 400 °С – 16 %, 600 °С – 20 мас. %, 800 °С – 30 мас. %. Втрати при прожарюванні (T=1000 °С) склали 32 мас. %.

Отже, заповнювачі рециклінгу бетону характеризуються підвищеною пористістю, водопоглинанням, наявністю тріщин затверділого розчину на поверхні зерен, неоднорідною структурою, що значно знижує їхню якість. У зв'язку з цим, необхідно дослідити вплив дрібних заповнювачів як природного походження, так і заповнювачів рециклінгу бетону на фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів.

3.2. Вплив пісків природного та рециклінгового походження на властивості дрібнозернистих бетонів

Дрібний заповнювач, пісок, відіграє визначальну роль у формуванні мезоструктури бетонів. Для обґрунтування впливу пісків на технологічні та міцнісні властивості бетонів вибрано різні відношення між в'язучим і дрібним заповнювачем: Ц:П=1:1,65; Ц:П=1:1,94; Ц:П=1:2,36. На першому етапі досліджено вплив природних пісків з модулем крупності $M_k=1,3$ і $M_k=2,3$ на фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів на основі портландцементу з вапняком СЕМ П/А-LL 42,5 (розплив суміші РК=170-175 мм). Встановлено, що для складу суміші Ц:П=1:2,36 (пісок з $M_k=1,3$) В/Ц становить 0,57 (рис. 3.12). При використанні заповнювача з $M_k=2,3$, спостерігається зниження В/Ц на 28,1 %, що становить 0,41. При витраті матеріалів Ц:П=1:1,94 з $M_k=1,3$ В/Ц становить 0,5. а з використанням заповнювачів $M_k=2,3$ В/Ц знижується на 26%, що становить 0,37. Відповідно при відношенні матеріалів Ц:П=1:1,65 з $M_k=1,3$ В/Ц становить 0,46, тоді як при використанні матеріалу з $M_k=2,3$ знижується на 23,9% і відповідає В/Ц=0,35.

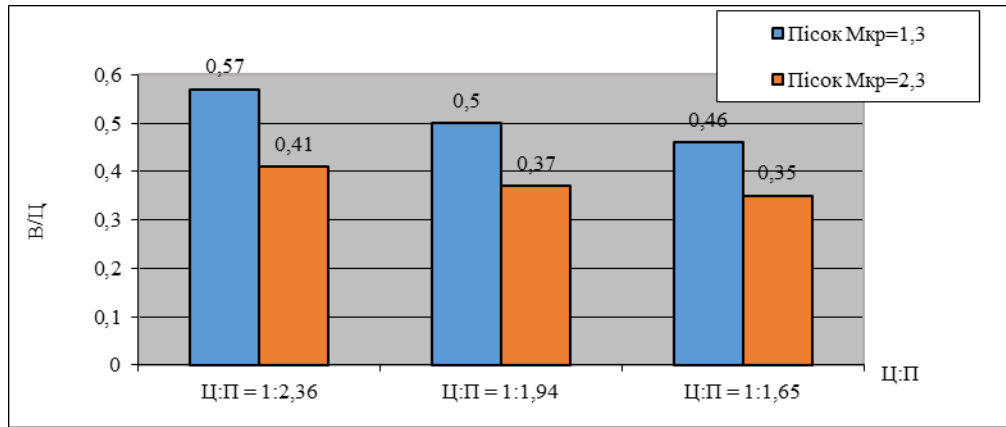
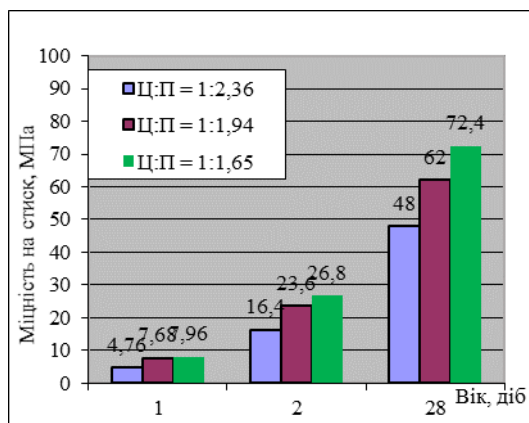
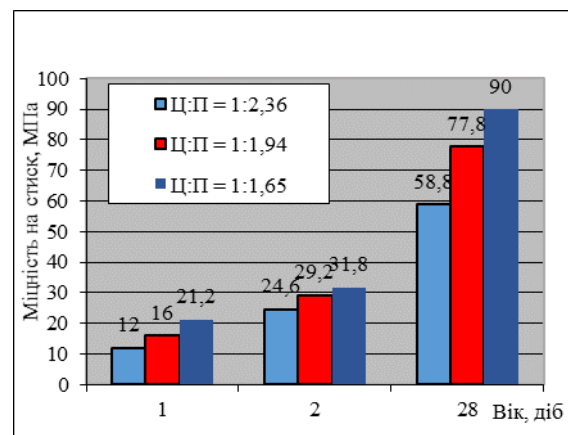


Рисунок 3.12 – Водоцементне відношення дрібнозернистих бетонів з різними пісками

Як видно з рис. 3.13, а для суміші з $M_k=1,3$ при відношенні матеріалів Ц:П=1:2,36 міцність на стиск через 1 добу становить 4,76 МПа, через 2 і 28 діб складає 16, 4 і 48 МПа відповідно. При використанні дрібного заповнювача з $M_k=2,3$ (рис. 3.13, б) спостерігається зростання міцності зразків через 1 добу, що становить 7,68 МПа, через 2 доби – 23,6 МПа і через 28 діб - 62 МПа. Відповідно спостерігається підвищення міцності в інших складах. Для складу Ц:П=1:1,94 на основі піску $M_k=1,3$ міцність зразків через 1; 2 і 28 діб становить 7,68; 23,6 і 62 МПа відповідно.



а



б

Рисунок 3.13 – Міцність при стиску дрібнозернистих бетонів на основі пісків з $M_k=1,3$ (а) і $M_k=2,3$ (б)

При застосуванні піску з $M_k=2,3$ міцність через 1; 2 і 28 діб збільшується в 2,1; 1,2 і 1,3 рази і складає 16 МПа, 29,2 МПа і 77,8 МПа. Відповідно для складу

Ц:П=1:1,65 з піском $M_k=1,3$ міцність через 1; 2 і 28 діб становить 7,96, 26,8 і 72,4 МПа, а на основі піску $M_k=2,3$ міцність через 1; 2 і 28 діб зростає в 2,7; 1,2 і 1,2 рази порівняно зі складом на основі піску з $M_k=1,3$.

Досліджено вплив крупності піску на деформації усадки дрібнозернистих бетонів. Як видно з рис. 3.14, а, на початку тверднення протягом 1-10 діб зразки характеризуються інтенсивними деформаціями усадки для усіх складів. Показано, що через 10 діб найбільші деформації усадки фіксуються для складу Ц:П=1:1,94 (пісок $M_k=1,3$) і складають 0,81 мм/м, а найменші – 0,43 мм/м, для складу Ц:П=1:2,36 (пісок $M_k=2,3$); через 56 діб тверднення власні деформації усадки для даних складів збільшуються та складають 1,18 і 0,65 мм/м відповідно. При цьому найбільші втрати маси спостерігаються для зразків складу Ц:П=1:2,36 на основі піску з $M_k=1,3$ і досягають 6,8 %, а найменші ($\Delta m/m=3,9\%$) на основі піску з $M_k=2,3$ (рис. 3.14, б).

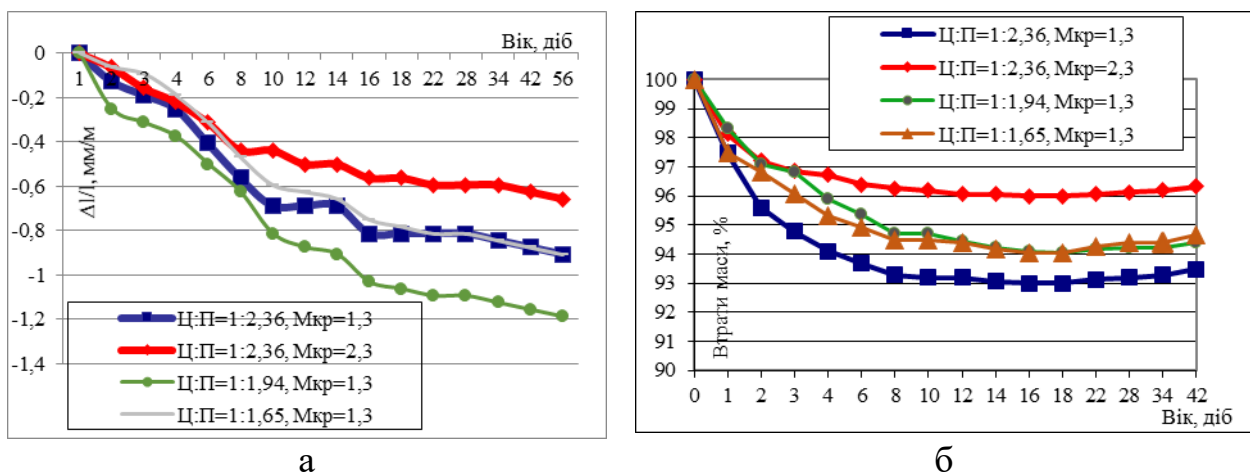


Рисунок 3.14 - Деформації усадки (а) та втрати маси (б) дрібнозернистих бетонів у повітряно-сухих умовах на основі пісків різної крупності

Досліджено вплив РСЕ на фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів на основі портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R. Дослідженнями встановлено, що склад дрібнозернистого бетону (Ц:П=1:2,36) для досягнення рухливості $R_k=175$ мм показник В/Ц складає 0,57 (рис. 3.15). При введенні 1,0 мас % РСЕ-1 В/Ц зменшилося на 29,8 % і складає В/Ц=0,40; при введенні 1,0 мас % РСЕ-2 водопотреба знизилася на 19,3 % до В/Ц=0,46. Спостерігається

суттєве зниження В/Ц на 32,6 % ($V/C=0,31$) при введенні 1,0 мас % РСЕ-1 до суміші Ц:П=1:1,65.

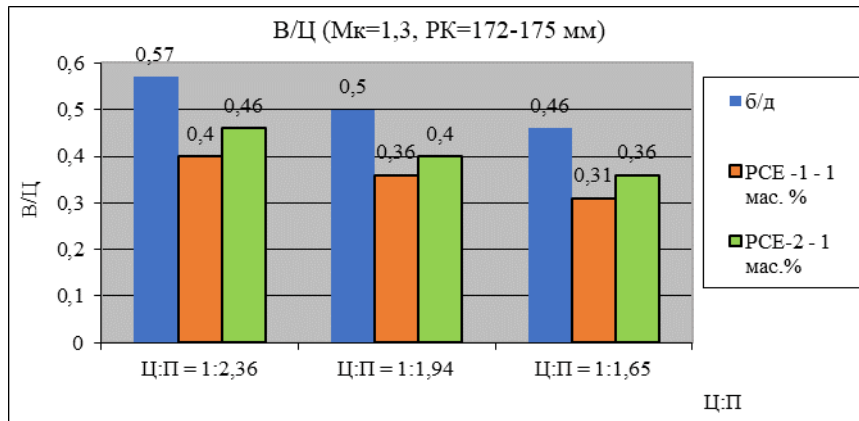
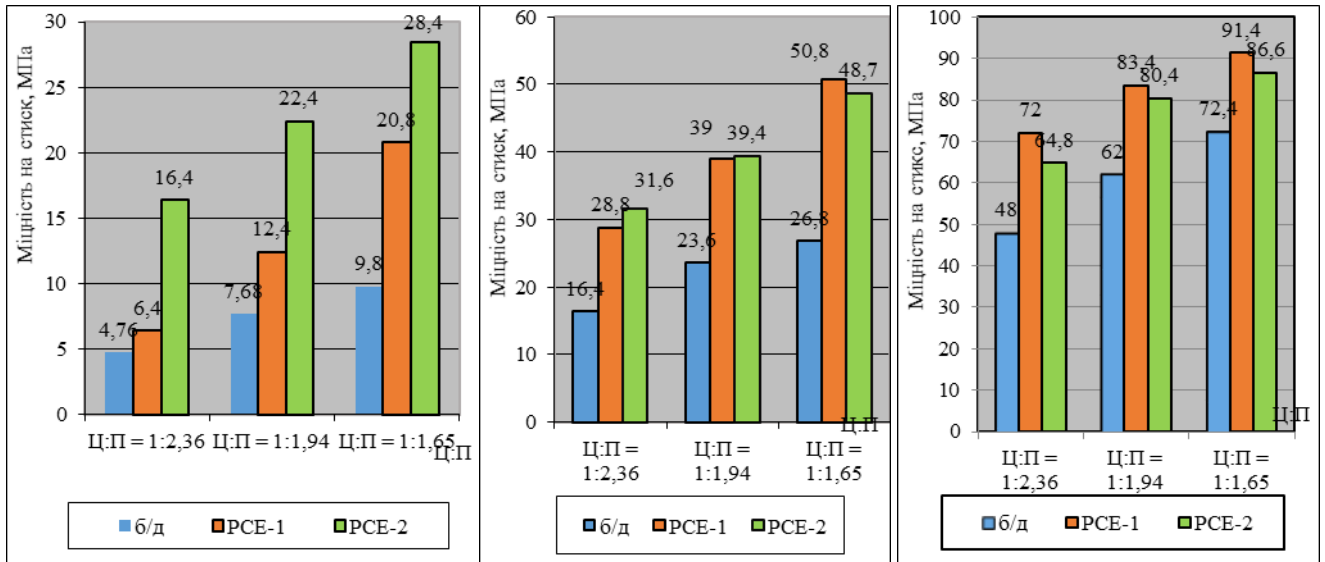


Рисунок 3.15 – В/Ц модифікованих дрібнозернистих бетонів на основі дуже дрібного піску ($M_k=1,3$)

Дослідженнями встановлено, що для дрібнозернистого бетону (Ц:П = 1:2,36) без добавок при $R_k=172$ мм міцність на стиск через 1 добу становить 4,76 МПа, через 2 доби – 16,4 МПа, через 28 діб – 48,0 МПа (рис. 3.16, а-в). При введенні 1,0 мас.% РСЕ-1 міцність через 1 добу збільшується в 1,3 рази і становить 6,4 МПа, через 2 та 28 діб збільшується в 1,8 і 1,5 рази і досягає 28,8 та 72,0 МПа відповідно. При введенні 1,0 мас.% РСЕ-2 міцність через 1; 2 і 28 діб досягає 16,4; 31,6 і 64,8 МПа відповідно. Для складу Ц:П = 1:1,94 міцність на стиск через 1 добу становить 7,68 МПа, 2 доби – 23,6 МПа, 28 діб – 62,0 МПа. При введенні 1,0 мас.% РСЕ-1 міцність через 1; 2 та 28 діб збільшується в 1,6; 1,7 і 1,3 рази і становить 12,4; 39,0 та 83,4 МПа відповідно. Так, через 1 добу міцність складає 22,4 МПа, що в 1,8 рази більше порівняно з складом з РСЕ-1. Для складів Ц:П=1:1,65 значення міцності на стиск є найвищими, що можна пояснити вищим вмістом цементу. Через 1 добу міцність зразків з 1,0 мас.% РСЕ-1 становить 20,8 МПа, через 2 та 28 діб – 50,8 та 91,4 МПа відповідно. При введенні 1,0 мас. % РСЕ-2 міцність через 1, 2 і 28 діб складає 28,4; 48,7 і 86,6 МПа відповідно. При введенні полікарбоксилатного суперпластифікатора РСЕ-2 спостерігається збільшення ранньої міцності через 1 добу для зразків усіх складів.



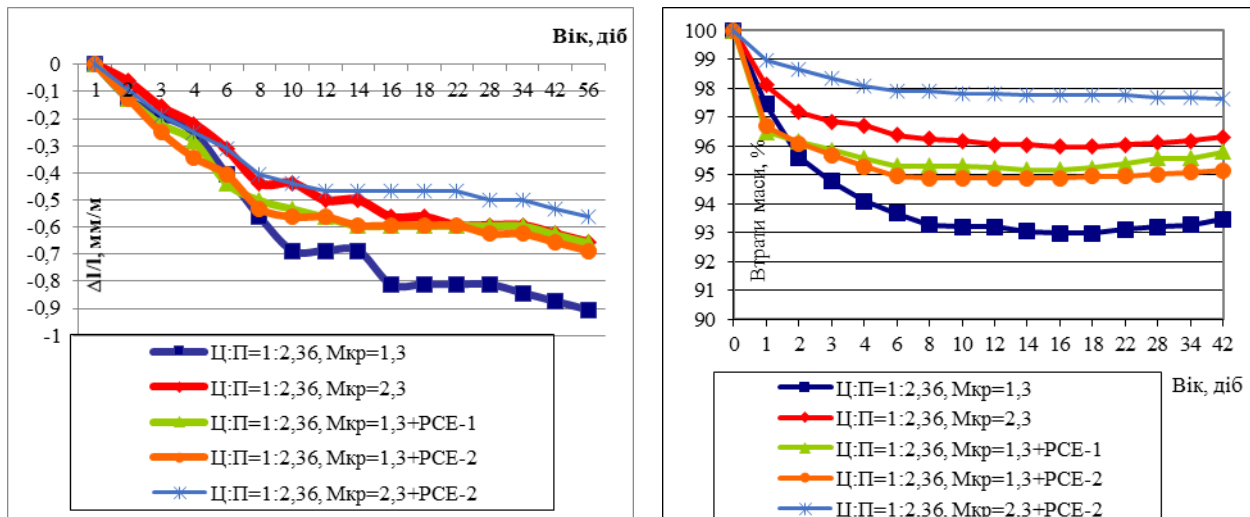
а

б

в

Рисунок 3.16 – Міцність при стиску модифікованих дрібнозернистих бетонів на основі піску з $M_k=1,3$ через: а - 1 добу; б - 2 доби; в - 28 діб

Досліджено вплив крупності піску на деформації усадки дрібнозернистих бетонів складу Ц:П=1:2,36. Як видно з рис. 3.17, а, на початку тверднення протягом 1-10 діб зразки характеризуються інтенсивними деформаціями усадки для усіх складів.



а

б

Рисунок 3.17 – Деформації усадки (а) втрати маси (б) у повітряно-сухих умовах

Через 10 діб найбільші деформації усадки фіксуються для складу Ц:П=1:2,36 (пісок $M_k=1,3$) і складають 0,8 мм/м, а найменші – 0,4 мм/м, для складу Ц:П=1:2,36 (пісок $M_k=2,3$) з додаванням PCE-2; через 56 діб тверднення

власні деформації усадки для даних складів збільшуються і складають 0,9 та 0,63 мм/м відповідно. При цьому найбільші втрати маси спостерігаються для зразків складу Ц:П=1:2,36 на основі піску з $M_k=1,3$ і досягають 6,6 %, а найменші ($\Delta m/m=2,3$ %) на основі піску з $M_k=2,3$ і РСЕ-2 (рис. 3.17, б).

Під час дослідження дрібнозернистих бетонів складу Ц:П=1:1,94 на основі піску з $M_k=1,3$ встановлено, що деформації усадки для зразків без добавок є найвищими і через 2, 28 і 56 діб складають відповідно 0,2; 1,1 і 1,2 мм/м. При введенні РСЕ-1 деформації усадки зразків зменшилися в 2 рази вже через 8 діб тверднення; при модифікуванні РСЕ-2 - в 1,5 рази. Для зразків складу Ц:П=1:1,65 без добавок втрати маси є менші та через 56 діб складають 0,9 мм/м, при введенні полікарбосилатного суперпластифікатора деформації зменшуються до 0,75 мм/м (рис. 3.18, б).

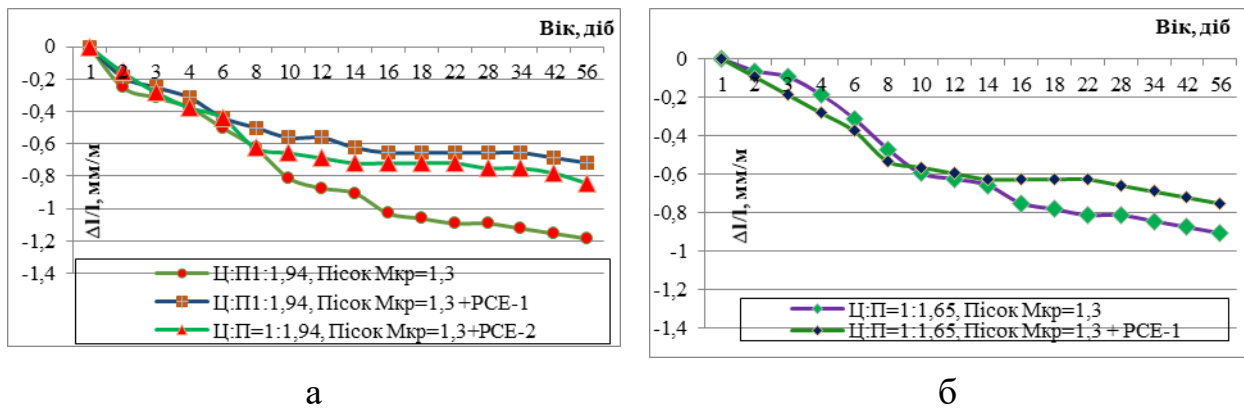


Рисунок 3.18 - Деформації усадки дрібнозернистих бетонів у повітряно-сухих умовах складів: а - Ц:П=1:1,94; б - Ц:П=1:1,65

Для забезпечення максимально щільної упаковки бетонів та покращення їх мезоструктури проведено оптимізацію зернового складу пісків різного генезису. При цьому використано піски наступних груп: крупний пісок рециклінгу (фракція 2-5 мм) з модулем крупності $M_k=2,75$ та дуже дрібний пісок з $M_k=1,3$. Побудовано криві розсіювання суміші ЗРБ та кварцового піску у різному співвідношенні для компонентів: 0:100 %, 25:75 %, 50:50 %, 75:25 %, 100:0%. Як видно з рис. 3.19, пісок з $M_k=1,3$ виходить за допустимі межі кривих і знаходиться в області дуже дрібних пісків. В той же час, ЗРБ фракції 2-5 мм знаходиться в області крупного заповнювача. Найбільш оптимальними

зерновими складами характеризуються суміші ЗРБ : пісок із співвідношенням 75:25 та 50:50.

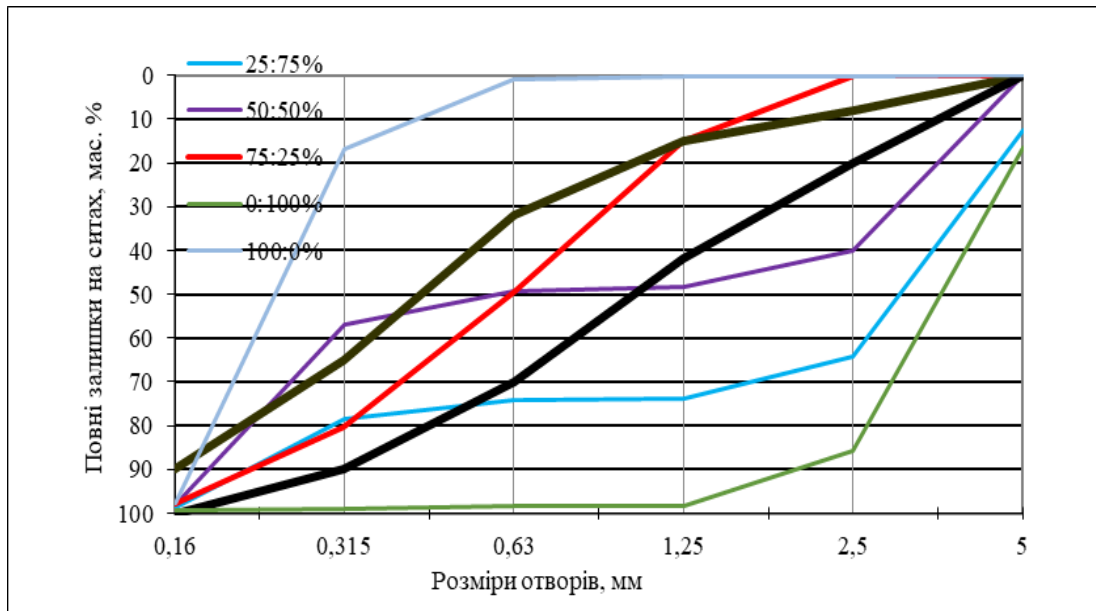
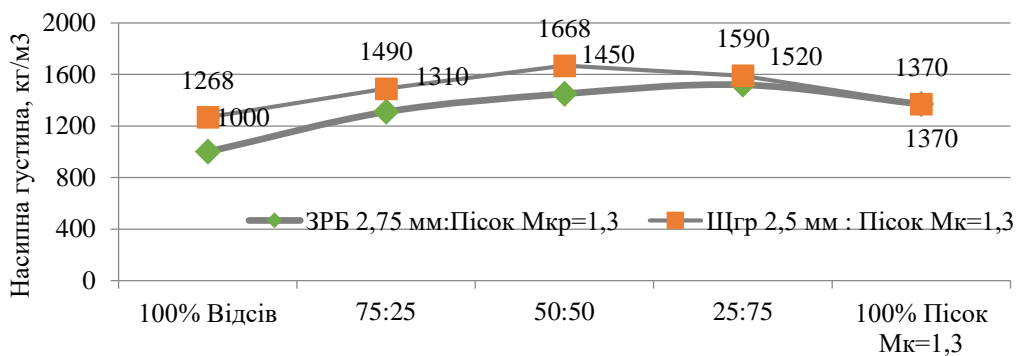
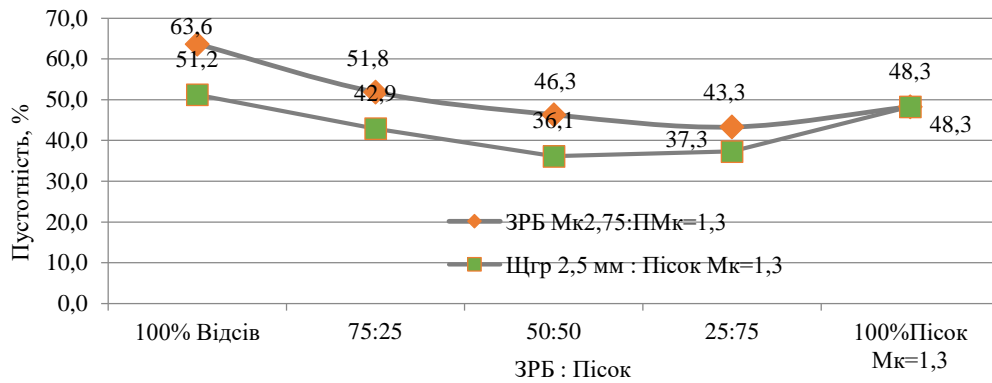


Рисунок 3.19 - Криві розсіювання суміші дрібних заповнювачів різних складів

Дослідженнями встановлено, що насипна густина суміші заповнювачів на основі ЗРБ_{Мк2,75} : Пісок_{Мк1,3} складає 1000 кг/м³, тоді як для складу на основі гранітного відсіву Щ_{Гр2-5} : П_{Мк1,3} збільшується до 1268 (рис. 3.20, а). Для суміші ЗРБ_{Мк2,75} : П_{Мк1,3} з відношенням складників 75 : 25, 50 : 50, 25 : 75 насипна густина складає 1310; 1450; 1520 кг/м³, для складів суміші на основі гранітного відсіву Щ_{Гр2-5} : Пісок Мк=1,3, такого ж складу, насипна густина зростає та становить 1490 кг/м³, 1668 кг/м³, 1590 кг/м³. При цьому найменшою пустотністю П=36,1 % і П= 43,3 % характеризуються суміші ЗРБ_{Мк2,5} мм: П_{Мк1,3} = 50 : 50 та Щ_{Гр2-5}:П_{Мк1,3} = 75:25 відповідно (рис. 3.20, б).

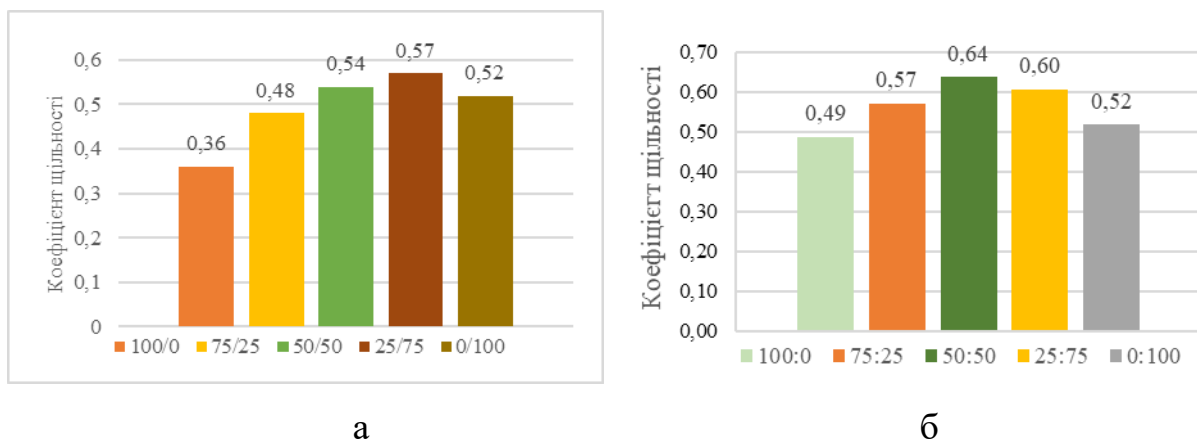




б

Рисунок 3.20 – Насипна густина (а) та пористість (б) суміші заповнювачів

Як видно з рис. 3.21, а, найнищою щільністю ($K_{щ}=0,36$) характеризується дуже дрібний пісок (Пісок : ЗРБ_{Мк2,75}=100 : 0 %). При заміні піску на ЗРБ з $M_k=2,75$ в кількості 25; 50 та 75% спостерігається збільшення коефіцієнта щільності суміші до 0,48; 0,54 та 0,57. При цьому найвищою щільністю ($K_{щ}=0,57$) характеризується суміш П : ЗРБ_{Мк2,75}=25 : 75 %. Для суміші на основі гранітного відсіву спостерігається подібна закономірність (рис. 3.21, б).



а

б

Рисунок 3.21 – Коефіцієнт щільності суміші заповнювачів різних складів:

а – П : ЗРБ_{Мк2,75}; б – П : Щ_{2,5}

З використання мікроскопу Sigeta LCD (збільшення 10x, 500x) досліджено структуру зерен природнього піску з $M_k=1,3$ (рис. 3.22). Досліджено кварцовий дуже дрібний пісок фракцій 2,5 – 0,08 мм (рис. 3.22, а-е).

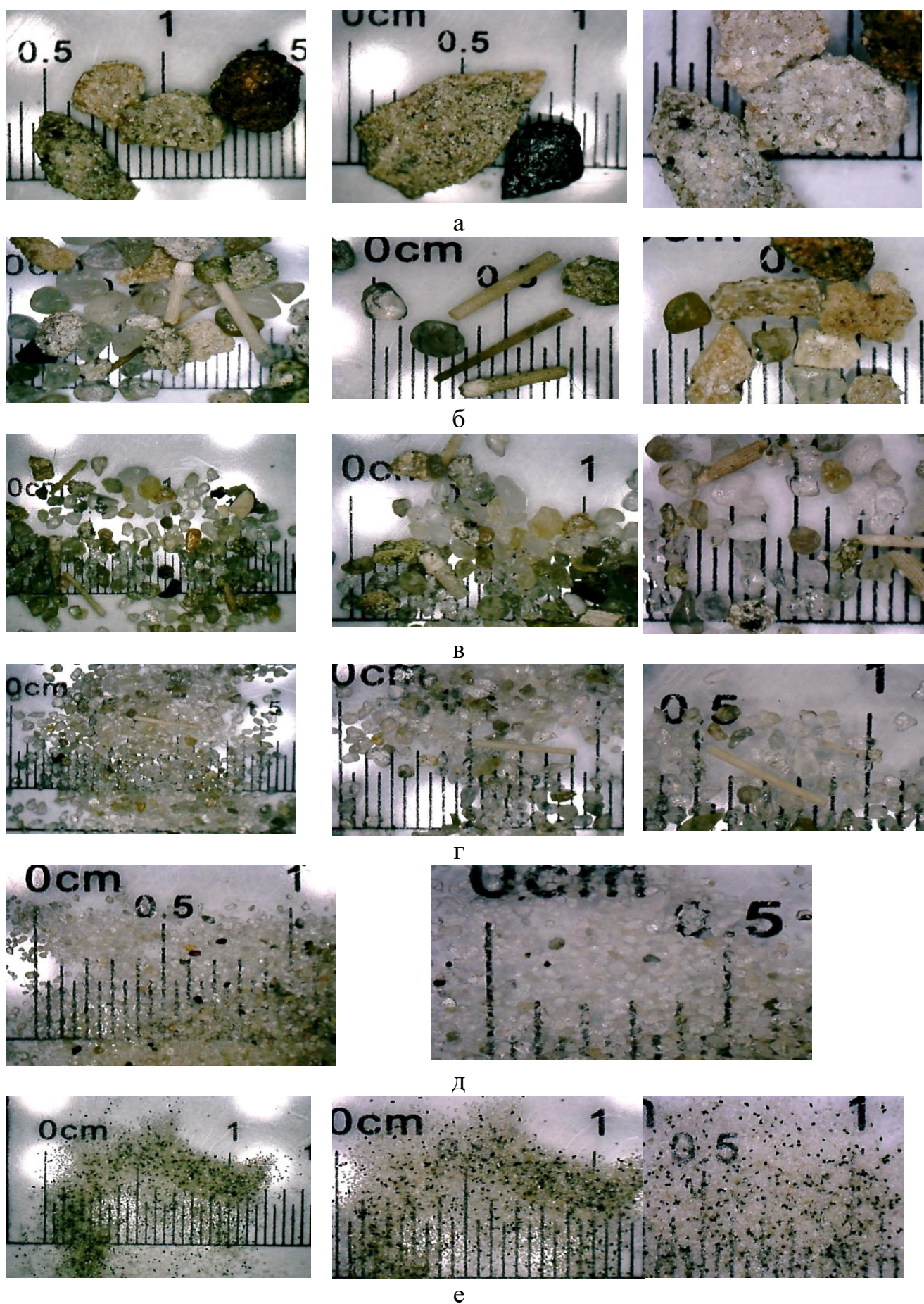
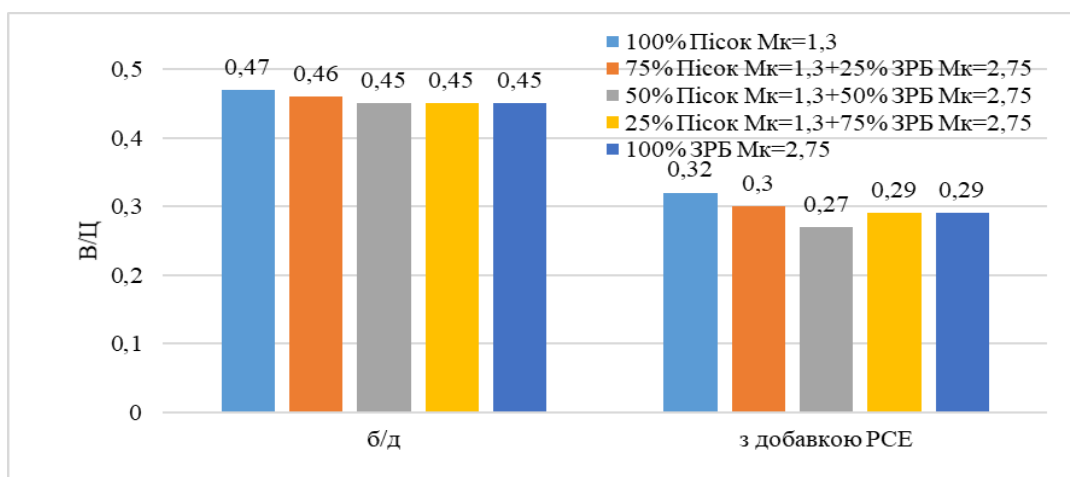


Рисунок 3.22 - Зерна кварцового піску ($M_k=1,3$) фракцій: а – 2,5 мм, б – 1,25 мм, в – 0,63 мм, г - 0,315 мм, д – 0,16 мм, е – 0,08 мм

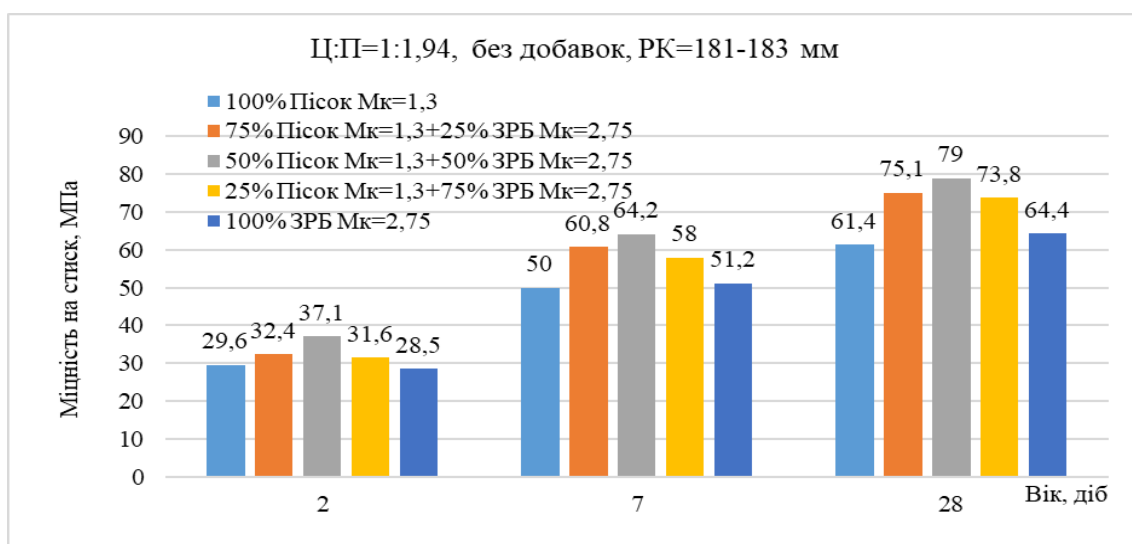
Як видно з мікрофотографій, даний пісок складається з осадової породи жовто-чорного кольору та прозорих зерен кварцу. Методом оптичної мікроскопії встановлено, що природний пісок фракцій 1,25 – 0,63 мм характеризується включеннями голкоподібних кварцових трубок (рис. 3.22, б, в), що може забезпечувати часткове армування мезоструктури бетону. Фракція 0,315-0,16 мм (рис. 3.22, г, д) характеризується круглими, прозорими зернами кварцу з включеннями голкоподібних трубок довжиною 0,4-0,5 мм. При дослідженні дрібнодисперсної фракції піску 0,08 мм (рис. 3.22, е) спостерігаються прозорі зерна кварцу та чорні зерна базальту.

З використанням оптимізованих складів суміші дрібних заповнювачів досліджено міцність модифікованих дрібнозернистих бетонів складу (Ц:П=1:1,94, РК=181-183 мм). Як видно з рис. 3.23, а, для дрібнозернистого бетону з дрібним заповнювачем $\Pi_{\text{Мк1,3}}$: ЗРБ $_{\text{Мк2,75}}$ у відношенні 100:0; 75:25; 50:50; 25:75 та 0:100, водопотреба досягається при В/Ц=0,47-0,45 для досягнення рухливості РК=181-183 мм. При цьому границя міцності на стиск через 2 доби складає 29,6; 32,4; 37,1; 31,6 та 28,5 МПа, а через 28 діб – 61,4; 75,1; 79,0; 73,8 та 74,4 МПа відповідно.

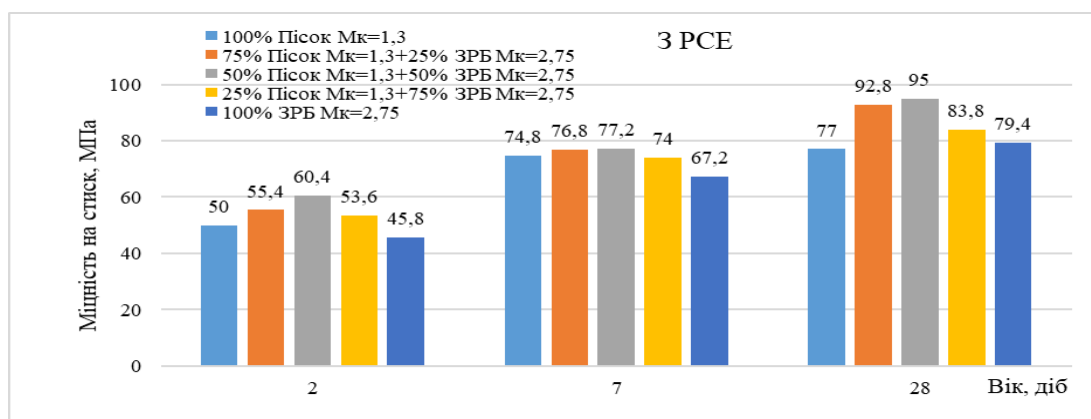
Результати свідчать (рис. 3.23, б), що найвищою міцністю через 2; 7 і 28 діб тверднення характеризується склад із сумішшю заповнювачів $\Pi_{\text{Мк1,3}}$: ЗРБ $_{\text{Мк2,75}}$ =50:50. При введенні 2,0 мас.% РСЕ для складів $\Pi_{\text{Мк1,3}}$: ЗРБ $_{\text{Мк2,75}}$ з відношенням компонентів 100:0; 75:25; 50:50; 25:75 та 0:100 забезпечується водоредукуючий ефект відповідно $\Delta\text{В/Ц}$ =32; 34; 40; 35,5; 35,6 % (рухливість змінювалася від 181 до 183 мм). При цьому міцність збільшується для всіх складів через 2 доби в 1,7-1,6 раз, через 7 діб – в 1,5-1,2 рази, через 28 діб – в 1,2-1,1 рази (рис. 3.23, б). В той же час, найвищою міцністю у всі терміни тверднення ($R_{\text{ст2}}=60,4$ МПа, $R_{\text{ст7}}=77,2$ МПа, $R_{\text{ст28}}=95,0$ МПа) характеризується склад $\Pi_{\text{Мк1,2}}$: ЗРБ $_{\text{Мк2,75}}$ =50:50.



а



б



в

Рисунок 3.23 – Водоцементне відношення (а), міцність на стиск без добавок (б) і з суперпластифікатором PCE (в) дрібнозернистих бетонів на основі

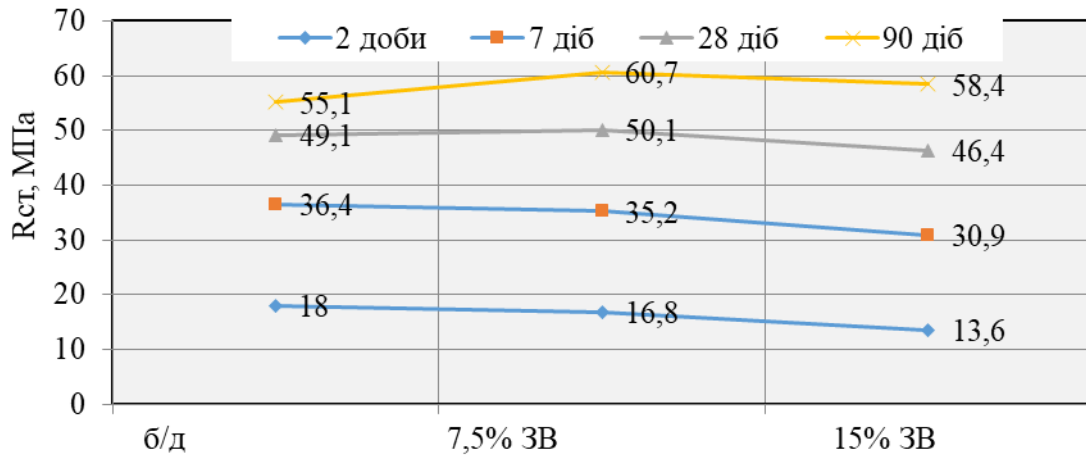
Таким чином, поєднання фізичного підходу, шляхом зменшення водовмісту за рахунок введення високоефективного РСЕ та оптимізування мезоструктури з підбиранням гранулометричного складу заповнювачів забезпечує одержання швидкотверднучих ($R_{Tc1}/R_{ct28}=59,7\dots 63,6\%$) та високоміцних ($R_{ct28}=92,9-95,0$ МПа) модифікованих дрібнозернистих бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону.

3.3. Дослідження впливу пуцоланових добавок і полікарбоксилатних суперпластифікаторів на реологічні та фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів

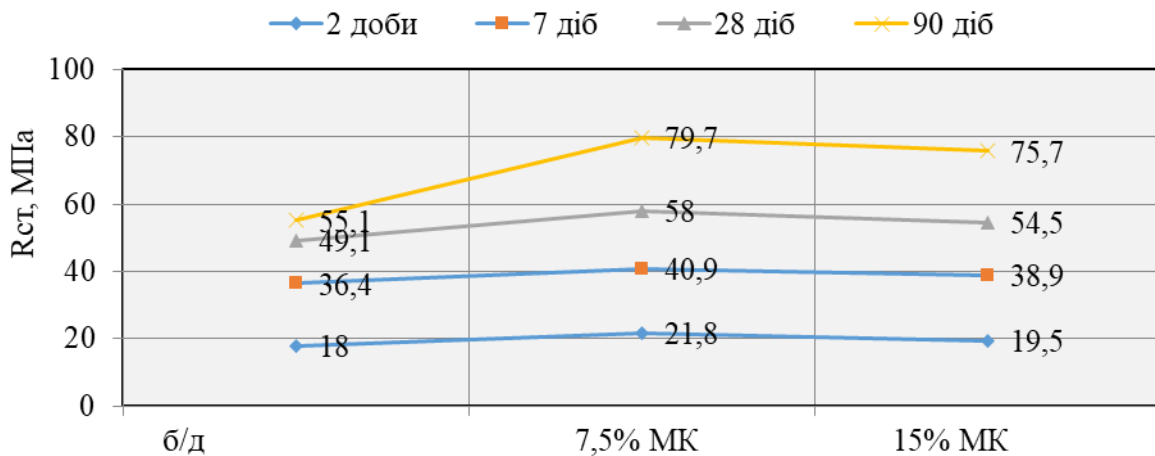
Сучасні дослідження високорухливих бетонів значною мірою пов'язані з необхідністю покращення їхніх експлуатаційних властивостей. Основними методами оптимізації цементних бетонів є впровадження тонкодисперсних мінеральних добавок, а також хімічних модифікаторів.

На даному етапі роботи досліджено вплив пуцоланових мінеральних добавок штучного походження, золи-винесення та мікрокремнезему, на міцність дрібнозернистих бетонів (Ц:П=1:2) на основі портландцементу з вапняком СЕМ II/A-LL 42,5 R. Встановлено, що для дрібнозернистого бетону висока рухливість суміші ($R_K=236$ мм) досягається при $V/C=0,60$: при цьому границя міцності на стиск через 2; 7; 28 і 90 діб становить 18 МПа, 36,4 МПа, 49,1 МПа і 55,1 МПа відповідно (рис. 3.24, а). При використанні 7,5 мас. % золи-винесення ($V/C=0,58$) границя міцності на стиск знижується і через 2; 7; 28 і 90 діб складає 16,8 МПа, 35,2 МПа, 50,1 МПа і 60,7 МПа відповідно. В той же час, при введенні 7,5 мас. % мікрокремнезему спостерігається підвищення міцності в 1,2-1,4 рази в усі терміни тверднення порівняно з цементом без добавок. Як видно з рис. 3.24, б, границя міцності на стиск через 2 доби складає 21,8 МПа, 7 діб – 40,9 МПа, 28 діб – 58,0 МПа і 90 діб – 79,7 МПа. Спостерігається сповільнення кінетики набирання міцності при введенні 15,0

мас. % мікрокремнезему, при цьому міцнісні значення є вищі порівняно зі складами без добавок і складають через 2 доби – 19,5 МПа, 7 діб – 38,9 МПа, 28 діб – 54,5 МПа і 90 діб - 75,7 МПа. Під час порівняння міцності зразків з добавкою золи-винесення (рис. 3.24, а) і мікрокремнезему (рис. 3.24, б), видно, що зразки з добавкою МК характеризуються вищою міцністю в усі терміни тверднення.



а



б

Рисунок 3.24 - Міцність на стиск дрібнозернистого бетону з добавками золи-винесення (а) та мікрокремнезему (б)

Поєднання золи-винесення та мікрокремнезему дозволяє усунути деякі недоліки пуцолан – пришвидшити пуцоланову реакцію при гідратації цементу,

ущільнити структуру на мезо- і мікрорівнях цементуючої матриці бетонів. Для підвищення дисперсності та активності пуцоланових добавок проведено механо-активацію золи-винесення та мікрокремнезему в вібротліні з одержанням активної пуцоланової добавки (АПД). Як видно з табл. 3.5, портландцемент СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R характеризується високою дисперсністю. Дослідженнями з використанням методу лазерної гранулометрії встановлено, що портландцемент характеризується фракціями частинок діаметром Ø5, Ø10, Ø20 та Ø60 мкм, які становлять 20,46, 35,23 та 86,34 % відповідно, розмір зерен D10, D50 та D90 відповідає 1,6, 13,3 та 48,8 мкм; питома поверхня за Блейном складає $S_{\text{пит}}=4200$ см²/г. Для активованої пуцоланової добавки «зола-винесення - мікрокремнезем» питома поверхня досягає $S_{\text{пит}}=5800$ см²/г, діаметр дрібнодисперсних частинок менше 5 мкм складає 22,62%, середній діаметр за об'ємом D[4;3] складає 18,2 мкм, середній діаметр за питомою поверхнею D[3;2] відповідає 3,1 мкм.

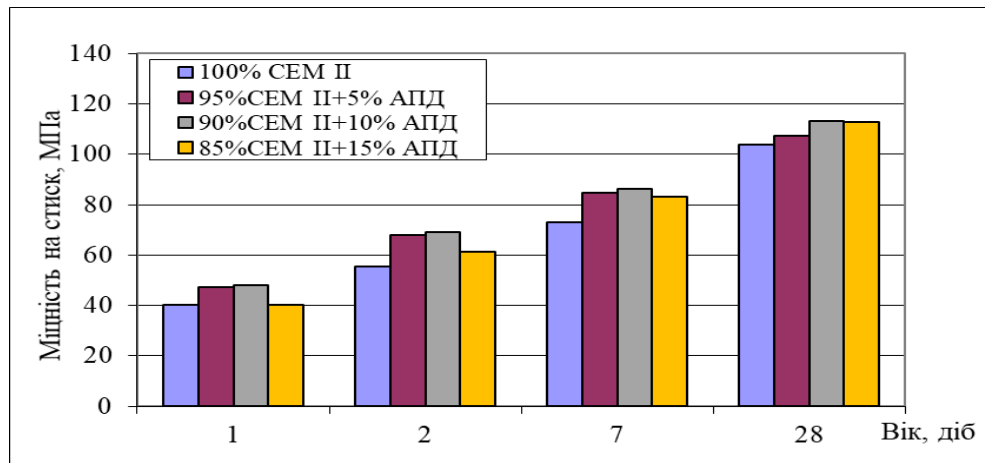
Таблиця 3.5

Гранулометричний склад портландцементу СЕМ ІІ/А-LL і активної пуцоланової добавки

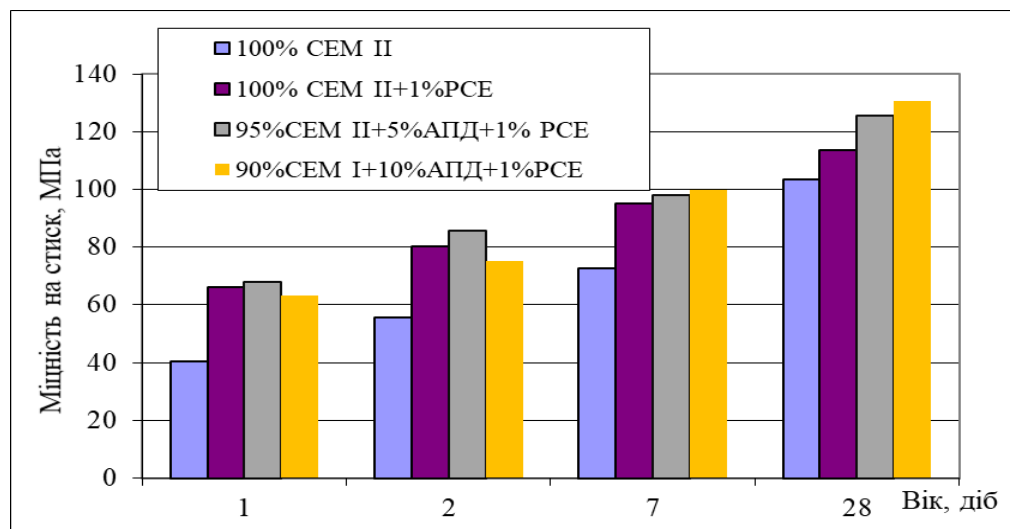
Матеріал	$S_{\text{пит}}$, см ² /г	Ø<5 мкм, %	Ø<10 мкм, %	Ø<20 мкм, %	Ø<60 мкм, %	D[3;2] мкм	D[4;3] мкм	D _v (10) мкм	D _v (50) мкм	D _v (90) мкм
СЕМ ІІ/А-LL	4200	20,46	35,23	53,24	86,34	3,35	20,0	1,6	13,3	48,8
АПД (ЗВ + МК)	5800	22,62	38,01	59,89	90,56	3,10	18,2	1,3	12,7	43,2

Досліджено вплив активної пуцоланової добавки «зола-винесення - мікрокремнезем» на фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів на основі поліфракційного кварцового піску (П:Ц = 1:1,65) при рухливості РК=162-165 мм. Експериментальними дослідженнями встановлено, що для досягнення рухливості РК=165, мм для складу без добавок, В/Ц складало 0,34; міцність через 1; 2; 7 та 28 діб складає відповідно 40,4; 55,6; 72,8 та 103,6 МПа

(рис. 3.25, а). Під час введення АПД в кількості 5,0 мас. % та 10,0 мас. % ($V/C = 0,34-0,35$) спостерігається приріст ранньої міцності через 1 добу - на 15-16 %, через 2 доби – на 18-19%, через 28 діб досягається міцність 107,2 та 113,0 МПа. Введення 15 мас.% АПД призводить до незначного зниження міцності бетонів у всі терміни тверднення - міцність через 1 добу становить 40,0 МПа, 2 доби – 61,2 МПа, 7 діб – 83,2 МПа і 28 діб - 112,6 МПа.



а



б

Рисунок 3.25 – Міцність на стиск дрібнозернистих бетонів (а) без суперпластифікатора (б) з полікарбоксилатним суперпластифікатором

При модифікуванні мезоструктури бетонів полікарбоксилатними суперпластифікаторами фізико-механічні властивості покращуються. Встановлено, що при введенні 1,0 мас.% PCE до складу без добавок, для

досягнення заданої рухливості, забезпечується водоредукуючий ефект $\Delta B/C=26,5\%$ і приріст міцності в усі терміни тверднення. При введенні АПД «зола-винесення - мікрокремнезем» кінетика набирання міцності дещо змінюється, порівняно із зразками без РСЕ. Як видно з рис. 3.25, при введенні 5,0 мас. % АПД і 1,0 мас.% РСЕ при водоредукуючому ефекті $\Delta B/C=30,3\%$ міцність зразків зростає і становить через 1 добу – 68,0 МПа, 2 доби – 85,6 МПа, 7 діб і 28 діб – 98,0 МПа і 125,4 МПа відповідно. В той же час, при введенні 10,0 мас. % АПД і 1,0 мас.% РСЕ спостерігається незначне сповільнення кінетики набирання ранньої міцності для зразків, при цьому через 7 і 28 діб міцність збільшується і досягає 100,0 МПа і 130,8 МПа.

При цьому забезпечується приріст міцності ΔR_{ct1} , ΔR_{ct7} і ΔR_{ct28} для модифікованих дрібнозернистих бетонів (табл. 3.6). Найвищий технічний ефект ($\Delta R_{ct1} = 68,3\%$) через 1 добу спостерігається для модифікованих цементних сумішей, які містять 5,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ, а через 28 діб найвищий приріст міцності ($\Delta R_{ct28} = 26,9\%$) фіксується при введенні 10,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ, що свідчить про високу ефективність органо-мінеральної пуцоланової добавки «зола-винесення – мікрокремнезем» + РСЕ.

Таблиця 3.6

Технічний ефект використання РСЕ в модифікованих
дрібнозернистих бетонах

Вміст добавки	$\Delta R_{ct1}, \%$	$\Delta R_{ct2}, \%$	$\Delta R_{ct28}, \%$
1,0 мас. % РСЕ	63,4	44,6	9,7
5,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ	68,3	53,9	21,7
10,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ	56,4	35,2	26,9

Для подальших досліджень в складі дрібнозернистого бетону замінено кварцовий пісок на дрібний поліфракційний заповнювач рециклінгу бетону фракції 0,315 - 2,5 мм. Як видно з табл. 3.7, при $B/C=0,36$ міцність дрібнозернистого бетону на основі ЗРБ через 1; 2; 7 і 28 добу становить 36,8 МПа, 51,3 МПа, 68,5 МПа і 90,4 МПа.

Таблиця 3.7

Міцність дрібнозернистих бетонів на основі заповнювача рециклінгу бетону

Вміст добавок	В/Ц	Границя міцності на згин/стиск, МПа, у віці, діб			
		1	2	7	28
-	0,36	6,1/36,8	7,2/51,3	8,5 /68,5	9,0 /90,4
5,0 мас. % АПД	0,36	6,8 /41,5	7,9 /58,4	9,1 /75,3	9,3 / 101,4
10,0 мас. % АПД	0,37	6,2 /39,0	7,5 /60,9	8,4 /72,1	8,9 /98,9
15,0 мас. % АПД	0,37	5,6 /32,1	9,9 /53,1	7,8 /70,1	8,5 /96,2
PCE					
1,0 мас. % PCE	0,27	7,8 /62,5	8,4/77,6	9,1 /91,4	12,0/110,3
5,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % PCE	0,25	8,9 /64,1	9,4 /82,7	11,5 /96,1	12,3/ 125,7
10,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % PCE	0,25	7,6 /60,2	9,2/74,2	11,0 / 95,2	11,5/123,1

При введенні 5,0 мас. % АПД для досягнення $R_K=162-165$ мм при В/Ц становить 0,36, міцність збільшується у всі терміни тверднення на 9-12 % і через 1 і 28 діб досягає 45,62 і 109,4 МПа. Збільшення вмісту високодисперсної пуцоланової добавки до 10-15 мас. % призводить до незначного збільшення водопотреби В/Ц=0,37 і зниження міцності в усі терміни тверднення. При введенні 1,0 мас. % PCE для досягнення $R_K=165$ мм забезпечується водоредукуючий ефект $\Delta V/C=25$ % та збільшення міцності через 1 добу до 62,5 МПа, 2 доби – 77,6 МПа, 7 діб – 91,4 МПа і 28 діб - 110,3 МПа. Введення 5,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % PCE забезпечує найбільший приріст міцності як на стиск (в 1,7-1,4 рази), так, і на згин (в 1,4-1,3 рази) в усі терміни тверднення. Так, міцність на стиск через 1 добу складає 64,1 МПа, 2 доби – 82,7 МПа, 7 діб – 96,1 МПа і 28 діб - 125,7 МПа. При введенні 10,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % PCE спостерігається сповільнення кінетики набирання міцності. При цьому забезпечується найвищий приріст міцності через 1 добу $-\Delta R_{ct1} = 74,2$ % і 28 діб

- $\Delta R_{ct28} = 39,1\%$ для модифікованих дрібнозернистих бетонів, які містять 5,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ (табл. 3.8).

Таблиця 3.8

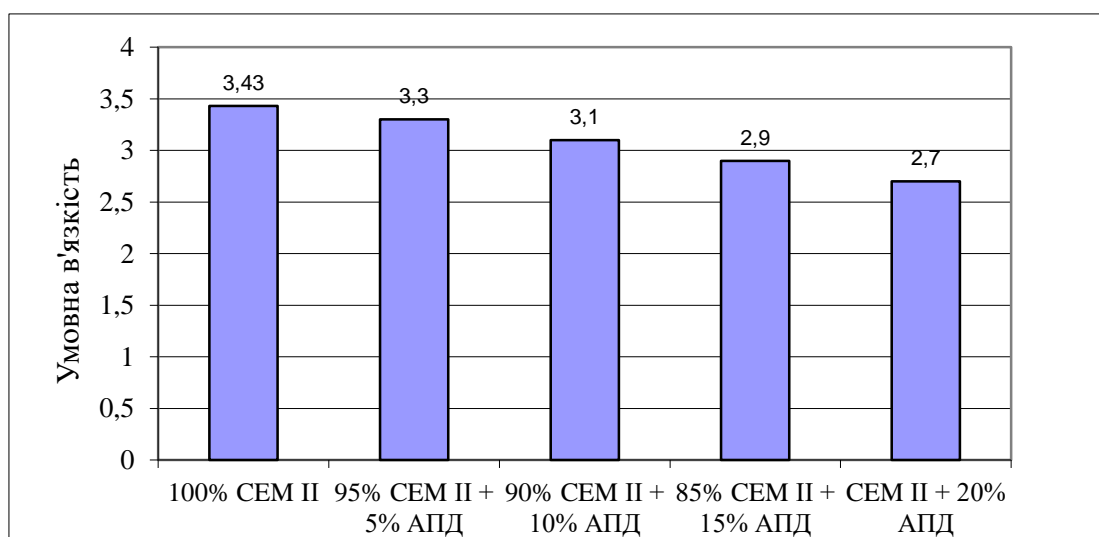
Технічний ефект використання РСЕ в модифікованих дрібнозернистих бетонах на основі заповнювача рециклінгу бетону

Вміст добавки	$\Delta R_{ct1}, \%$	$\Delta R_{ct2}, \%$	$\Delta R_{ct28}, \%$
1,0 мас. % РСЕ	69,8	51,3	22,1
5,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ	74,2	61,2	39,1
10,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ	63,6	44,7	36,2

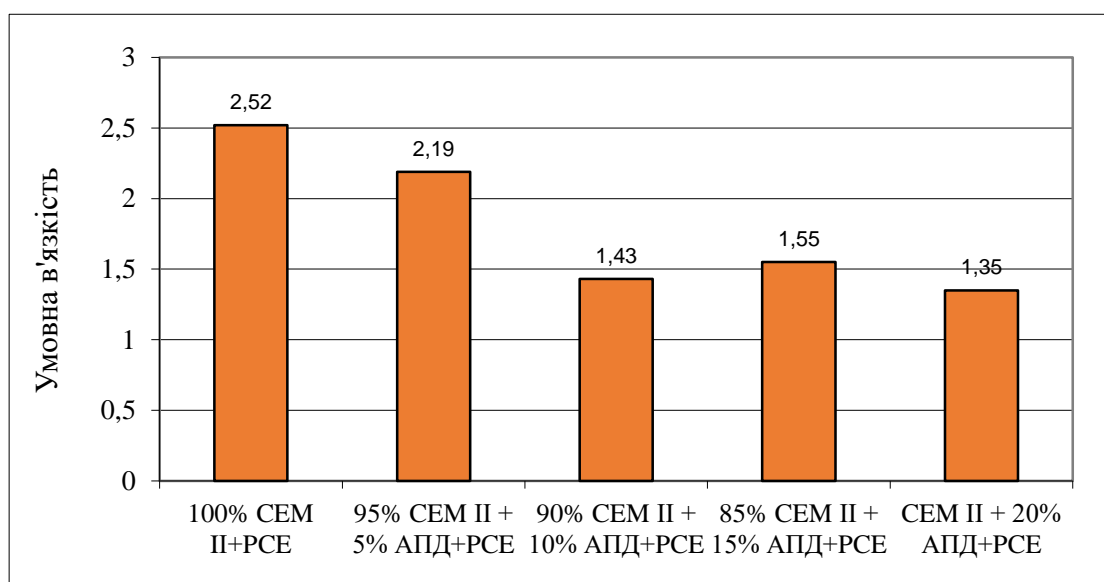
Досліджено реологічні властивості модифікованих цементуючих систем (В/Ц=0,5). Як видно з рис. 3.26, а, для портландцементу з вапняком, умовна в'язкість складає 3,43 (час витікання суспензії - 36 с), розплив за Суттардом досягає 190 мм (рис. 3.27, а). Введення 5-10 мас. % АПД до СЕМ II/A-LL не має значного впливу на умовна в'язкість суспензії.

В той же час, збільшення кількості АПД до 20,0 мас.% призводить до зменшення умовної в'язкості на 21,3%. Встановлено, що введення 1,0 мас.% РСЕ дозволяє забезпечити високу пластичність цементуючої системи, розплив за Суттардом досягає 260 мм, при цьому умовна в'язкість зменшується в 1,3 рази і становить 2,52 порівняно з цементом без добавок (рис. 3.26, б). При введенні 1,0 мас.% РСЕ та 10 мас.% АПД до цементу відбувається різке зниження умовної в'язкості від 2,52 до 1,43 та збільшення пластичності від 260 до 300 мм (рис. 3.27).

Поєднання АПД «зола-винесення - мікрокремнезем» та РСЕ забезпечує зниження умовної в'язкості в 1,5-2,0 рази з одержанням суперпластифікованої цементуючої системи - розплив за Суттардом досягає 310 мм (рис. 3.28, г).



а



б

Рисунок 3.26 - Умовна в'язкість цементуючих систем з АПД: а – без PCE,

б – з PCE

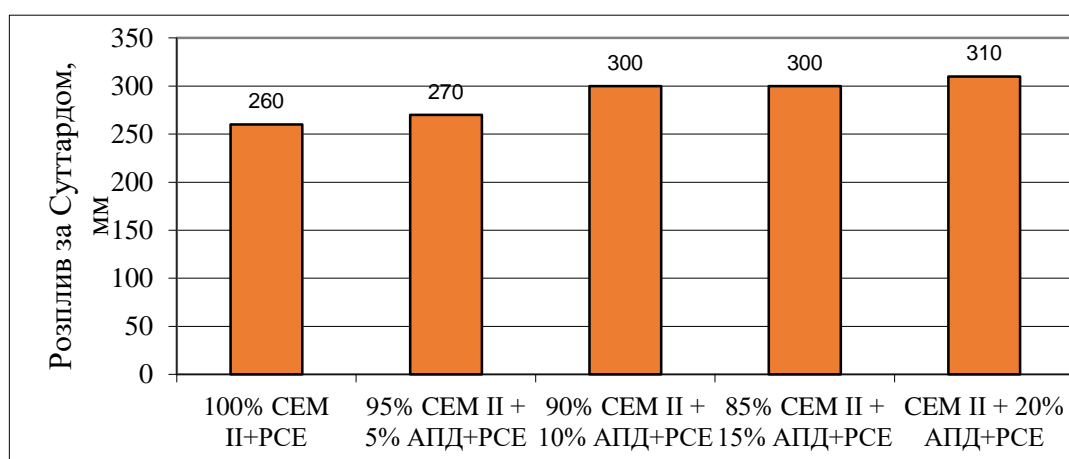


Рисунок 3.27 - Розплив за Суттардом цементуючих систем АПД + PCE



а



б



в



г

Рисунок 3.28 - Розплив за Суттардом цементуючих систем ($B/C=0,5$): а – без модифікатора; б, в, г – з полікарбоксилатним суперпластифікатором

В'язкість цементної системи знижується більшою мірою, а щеплені бічні ланцюги, створюючи енергетичний бар'єр у дифузному шарі, перешкоджають агрегації частинок, сприяючи при цьому збереженню її властивостей у часі. Пластичність суспензії модифікованих цементуючих систем представлено на рис. 3.28 (б-г). Міжчасткові взаємодії різнодисперсних частинок ПЦ+МК+ЗВ дозволяють зменшити об'єм вільної води в системі, а також значно змінюють реотехнологічні властивості: підвищують в'язкість, пластичність, а також зв'язність (нерозшаровуваність) та тиксотропність сумішей. Крім того, «фізичний фактор» впливає на формування структури на пізній стадії тверднення, так як високодисперсна пуцоланова добавка (МК+ЗВ), заповнює

пори в структурі цементного каменю та сприяє підвищенню його стабілізації, однорідності та щільності.

Таким чином, застосування портландцементу з вапняком, активних пуцоланових добавок (зола-винесення, мікрокремнезем) та їх поєднання з полікарбоксилатними суперпластифікаторами забезпечує модифікування мезоструктури дрібнозернистих бетонів на основі ЗРБ та створює можливість досягнення високої пластичності та міцності.

3.4. Фазовий склад та мікроструктура цементного каменю, модифікованого активною пуцолановою добавкою та полікарбоксилатним суперпластифікатором

Тверднення портландцементів відбувається в результаті сумісного впливу процесів гідратації клінкерної складової та реакцій хімічної взаємодії гідратних новоутворень з активними мінеральними компонентами цементуючої системи. Як видно з табл. 3.9, для портландцементу СЕМ П/А-LL нормальна густина тіста (тісто 1:0) досягається при водопотребі 29,5%, початок тужавіння складає 190 хв, кінець – 260 хв; при цьому міцність через 1; 7 та 28 діб тверднення складає відповідно 38,3; 84,1 та 118,8 МПа. При введенні 5,0 мас.% високоактивної АПД нормальна густина досягається при водопотребі 29,5%, міцність збільшується в усі терміни тверднення. При введенні 1,0 мас.% РСЕ до цементу для забезпечення нормальної густоти, водопотреба зменшується до 20,7%, спостерігається збільшення міцності, через 1 добу - в 1,64 рази (63,0 МПа), через 7 та 28 діб - в 1,3-1,2 рази і становить 109,7 МПа та 140,7 МПа відповідно.

За допомогою комплексу методів фізико-хімічного аналізу вивчено особливості процесів гідратації цементного каменю, модифікованого АПД «зола-винесення – мікрокремнезем» та РСЕ.

Таблиця 3.9

Вплив активної пуцоланової добавки та РСЕ на терміни тужавіння та міцність модифікованого цементного каменю (тісто 1:0)

Вміст цементу та добавок, мас. %			В/В, %	Терміни тужавіння, хв		Міцність на стиск, МПа		
				поч.	кін.	вік, діб		
СЕМ II	АПД	РСЕ				1	7	28
100	-	-	29,5	190	260	38,3	84,1	118,8
100	-	1,0	29,5	310	400	34,6	77,7	114,0
100	-	1,0	20,0	170	250	59,2	94,2	123,1
95,0	5,0	-	29,0	180	250	40,6	88,5	119,5
95,0	5,0	1,0	29,0	160	260	23,3	97,1	108,6
95,0	5,0	1,0	20,7	120	220	63,0	109,7	140,7

Хімічний склад модифікованого цементного каменю, одержаного методом кількісного елементного аналізу за атомними спектрами флуоресценції наведено в табл. 3.10. Видно, що вміст СаО змінюється залежно від вмісту клінкерної складової в цементі та складає для СЕМ II/A-LL - 68,37 %, а для цементуючих систем з вмістом 80 мас. % СЕМ II/A-LL+ 20 мас. % АПД та даного складу з РСЕ зменшується до 59,19 та 58,95 % відповідно. При введенні АПД «зола - винесення - мікрокремнезем». Кількість SiO₂ збільшується від 20,08 % до 24,69 і 24,78 % та Al₂O₃ від 3,01 до 5,53 %, що забезпечується підвищеним вмістом даних оксидів у пуцоланових добавках.

Методом рентгенофазового аналізу досліджено зразки цементного каменю та визначено їх фазовий склад. Результати у вигляді дифрактограми показані на рис. 3.29, а, б. Згідно з даними рентгенофазового аналізу на дифрактограмах цементного каменю через 20 год гідратації та 28 діб тверднення фіксуються лінії кальциту (d/n=0,303; 0,249 нм), кальцію гідроксиду (d/n=0,490; 0,263 нм), еtringіту (d/n=0,973; 0,561 нм) та ін.

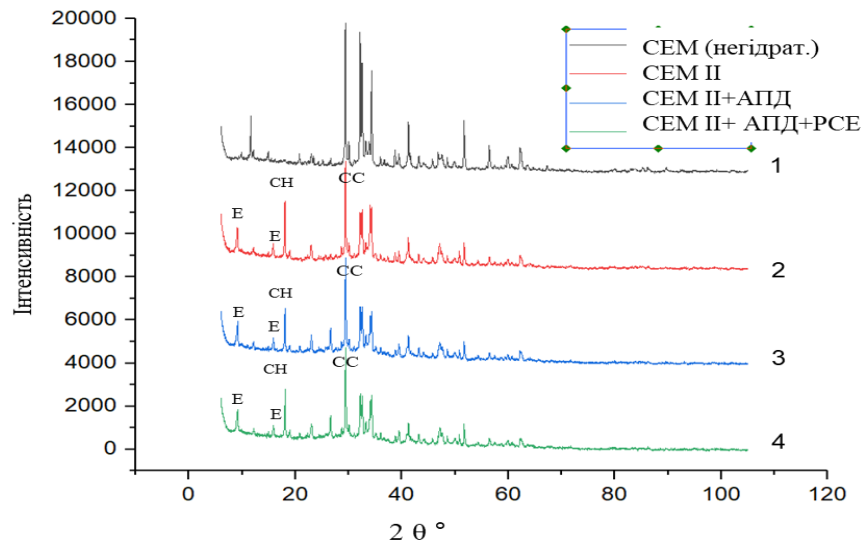
Таблиця 3.10

Хімічний склад цементного каменю на основі

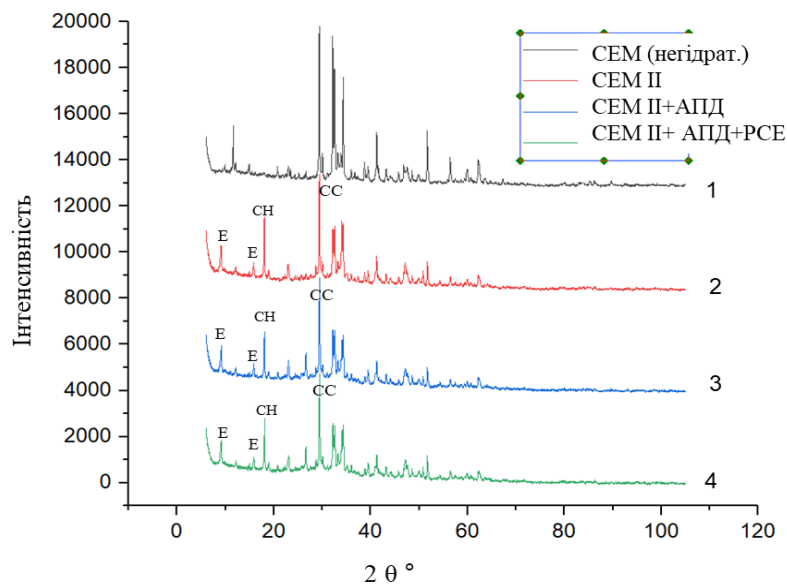
Оксиди	Вміст, %		
	СЕМ II/A-LL	80,0 мас. % СЕМ II/A-LL + 20,0 мас. % АПД	80,0 мас. % СЕМ II/A-LL + 20,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ
CaO	68,37	59,19	58,95
SiO ₂	20,08	24,69	24,78
Al ₂ O ₃	3,01	5,51	5,53
Fe ₂ O ₃	4,12	5,80	5,73
MgO	0,39	0,35	0,46
K ₂ O	0,96	1,25	1,21
SO ₃	2,23	2,01	2,00

Слід відзначити, що введення 20,0 мас.% активної мінеральної добавки пуцоланічної дії до портландцементу забезпечує зменшення інтенсивності рефлексів кальцію гідроксиду, через 20 год – в 1,3 рази, через 28 діб – в 1,5 рази порівняно з цементом без добавок, тобто це вказує на те, що тонка фракція високодисперсної АПД «зола-винесення - мікрокремнезем» забезпечує прискорення процесів пуцоланізації.

Висока міцність і низька осадка модифікованого цементного каменю забезпечуються за рахунок розширення дії еtringіту, а також формування низькоосновних гідросилікатів кальцію (тоберморитоподібних). Згідно з даними кількісного рентгенофазового аналізу (табл. 3.11) за Рітвельдом, для портландцементу СЕМ II/A-LL, гідратованого 20 год, вміст еtringіту складає 12,3 мас. %, портландиту - 16,2 мас. %, аморфної фази – 43,4%. При введенні 20,0 мас.% АПД збільшується кількість еtringіту до 14,7 %, і характерно, що кількість портландиту зменшується до 11,2 %.



а



б

1 - негідратований СЕМ II/A-LL; 2 - гідратований СЕМ II/A-LL; 3 – 80,0 мас. % СЕМ II + 20,0 мас. % АПД; 4 – 80,0 мас. % СЕМ II + 20,0 мас. % АПД+ 1,0 мас. % PCE

Рисунок 3.29 – Дифрактограми негідратованого та гідратованого цементів: а – через 20 год гідратації, б – через 28 діб тверднення

При введенні АПД внаслідок розсуву зерен портландцементного клінкеру збільшується їхня реакційна поверхня та зростає швидкість утворення $\text{Ca}(\text{OH})_2$, за рахунок цього підвищена концентрація $\text{Ca}(\text{OH})_2$, яка виступає активатором АПД, призводить до неповного гідролізу їх склоподібної складової. Взаємодія активного Al_2O_3 з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ сприяє утворенню еtringіту. Кристали еtringіту, що утворюються на ранній стадії, під час гідратації цементу, забезпечують

кристалічний скелет, який виступає армуючою основою цементного каменю, при тому сприяючи швидкому набору міцності цементу.

Таблиця 3.11

Фазовий склад цементного каменю

Назва сполуки	Хімічна формула	Фазовий склад за Рітвельдом, мас.%		
		СЕМ II/A-LL	80,0 мас. % СЕМ II + 20,0 мас. % АПД	80,0 мас. % СЕМ II + 20,0 мас. % АПД+ 1,0 мас. % PCE
через 1 добу				
Аморфна фаза (закристалізованість)	-	43,4	43,0	49,7
Еtringіт	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	12,3	14,7	14,9
Портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	16,2	11,2	10,2
Кальцію карбонат	CaCO_3	14,8	15,6	15,1
Інші фази	-	13,3	15,5	10,1
через 28 діб				
Аморфна фаза (закристалізованість)	-	45,1	49,6	52,7
Еtringіт	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	11,3	13,1	12,4
Портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	13,6	8,2	8,7
Кальцію карбонат	CaCO_3	14,2	13,5	12,5
Інші фази	-	15,8	15,6	13,7

Введення полікарбоксилатного суперпластифікатора призводить до збільшення кількості аморфної фази, при цьому вміст еtringіту та портландиту не змінюється. Для портландцементного каменю на основі СЕМ II/A-LL, який тверднув 28 діб, вміст $\text{Ca}(\text{OH})_2$ складає 13,6 %, для каменю з 20,0 мас. % АПД його кількість зменшується в 1,65 рази, для модифікованого каменю з 20,0 мас. % АПД+PCE – в 1,56 рази, а кількість аморфної фази збільшується від 45,1 до 49,6 та 52,7 %. Як видно з табл. 3.12, ступінь гідратації для цементного каменю на основі 80,0 мас. % СЕМ II/A-LL 42,5 R + 20,0 мас. % АПД складає через 20

год та 28 діб складає відповідно 28 та 78 %. Введення полікарбосилатного суперпластифікатора призводить до незначного сповільнення процесів раннього структуроутворення, при цьому через 28 діб ступінь гідrataції зростає.

Таблиця 3.12

Ступінь гідrataції модифікованого цементного каменю (тісто 1:0)

Вік, діб	Ступінь гідrataції, %	
	80,0 мас. % СЕМ II/A-LL 42,5 R + 20,0 мас. % АПД	80,0 мас. % СЕМ II/A-LL 42,5 R + 20,0 мас. % АПД+ 1,0 мас. % РСЕ
20 год	28	26
28 діб	78	82

Результати термічного аналізу зразків цементного каменю, гідратованого 20 год, наведені у вигляді таблиці 3.13 і термограм (рис. 3.30 а, б). В температурному інтервалі 20 – 165 °С зразки втрачають фізично адсорбовану вологу; в цій же області температур протікає частковий термічний розклад еtringіту. Цей процес супроводжується значною втратою маси зразків (15,06 % - СЕМ II/A-LL; 15,18 % - 80,0 мас. % СЕМ II/A-LL + 20,0 мас. % АПД+ 1,0 мас. % РСЕ), появою стрімкого екстремуму на кривих DTG та глибокого ендотермічного ефекту на кривих DTA.

В температурному інтервалі 165 – 438 °С продовжується поетапний термічний розклад еtringіту та відбувається ступінчата дегідrataція гідроалюмінатів і гідросилікатів. Такому процесу відповідає поступова втрата маси (Δm) зразків (4,41% - СЕМ II/A-LL та 3,92 % - 80,0 мас. % СЕМ II/A-LL + 20,0 мас. % АПД+ 1 мас. % РСЕ) та відхилення каналів DTA в область ендотермічних ефектів.

Слід зазначити, що СЕМ II/A-LL відзначається більшим вмістом гідратованих фаз, про що свідчить більш інтенсивна втрата маси даного зразка. В області температур 438- 541 °С для СЕМ II/A-LL, 438 – 533 °С для цементної

системи – 80,0 мас. % СЕМ II/A-LL + 20,0 мас. % АПД+ 1,0 мас. % РСЕ, відбувається дегідратація портландиту. Цей процес супроводжується швидкою втратою маси зразків (2,76% - зразок СЕМ II/A-LL; 1,69 % - 80,0 мас. % СЕМ II/A-LL + 20,0 мас. % АПД+ 1,0 мас. % РСЕ), чітким екстремумом на кривих DTG та ендотермічним ефектом на кривих DTA. Слід відмітити, що СЕМ II/A-LL відзначається більшим вмістом $\text{Ca}(\text{OH})_2$, розклад якого супроводжується більш інтенсивною втратою маси цього зразка.

Таблиця 3.13

Результати комплексного термічного аналізу цементного каменю,
гідратованого 20 год

Зразок	Темп. інтервал, °C	Втрата маси, %
СЕМ II/A-LL	20 - 165	15,06
	165 - 438	4,41
	438 - 541	2,76
	541 - 670	1,18
	670 - 900	3,07
80,0 мас. % СЕМ II/A-LL + 20,0 мас. % АПД+ 1,0 мас. % РСЕ	20 - 165	15,18
	165 - 438	3,92
	438 - 533	1,69
	533 - 680	1,06
	680 - 900	4,01

В температурних інтервалах 541 – 670°C для СЕМ II/A-LL та 533 - 680 °C для зразка СЕМ+АПД+РСЕ завершується дегідратація гідросилікатів, якій відповідає поступова втрата маси зразків (1,18% - для СЕМ II/A-LL та 1,06% для цементуючої системи - 80 мас. % СЕМ II/A-LL + 20 мас. % АПД+ 1 мас. % РСЕ) та відхилення каналів DTA в область ендотермічних ефектів. За температур, вищих 670 °C протікає термічна дисоціація карбонатів, присутніх у зразках. Цей процес супроводжується значною втратою маси зразків (3,07% - СЕМ II/A-LL, 4,01 % - 80 мас. % СЕМ II/A-LL + 20 мас. % АПД+ 1,0 мас. % РСЕ), чітким екстремумом на кривих DTG та ендотермічним ефектом на кривих DTA. Як свідчать дані термогравіметричного аналізу (рис. 3.30, а, б), для каменю на основі 80 мас. % СЕМ II/A-LL + 20 мас. % АПД+ 1,0 мас. % РСЕ

через 20 год тверднення вміст $\text{Ca}(\text{OH})_2$ складає 9,2 %, що є менше в 1,6 рази порівняно з каменем на основі СЕМ ІІ/А-LL.

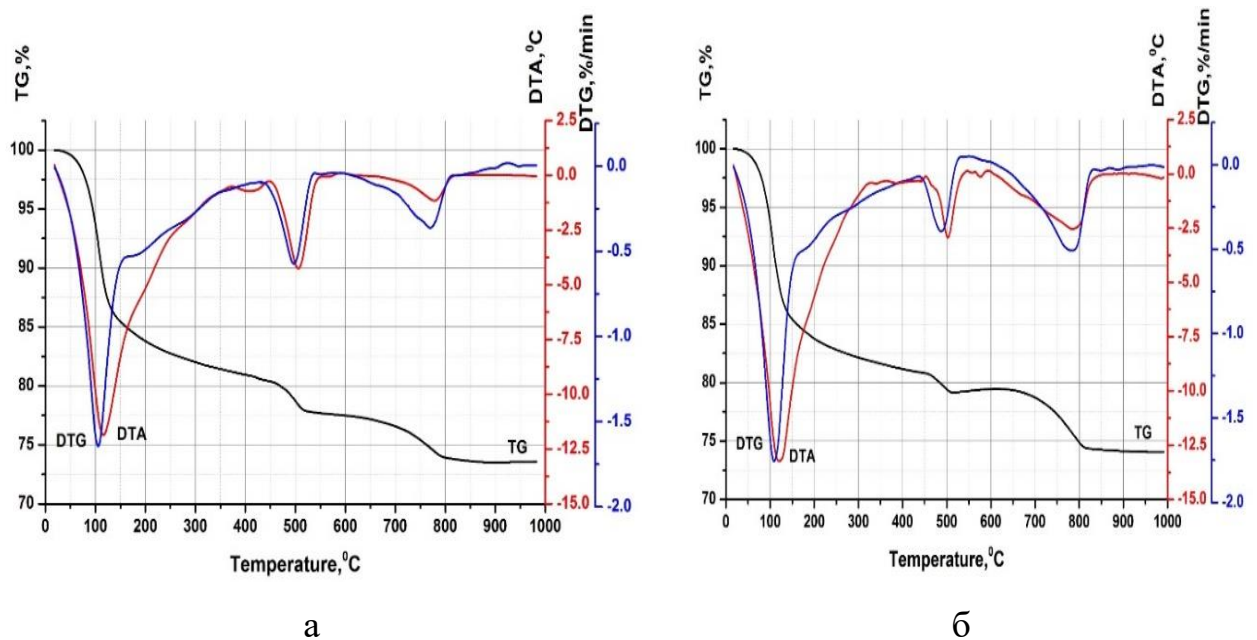


Рисунок 3.30 – Термограми цементного каменю на основі СЕМ ІІ/А-LL (а) та цементуючої системи СЕМ ІІ/А-LL + АПД (б), гідратованих 20 год

Мікрофотографії зразків цементного каменю ($V/V=0,4$) на основі портландцементу СЕМ ІІ/А-LL + АПД та СЕМ ІІ/А-LL + АПД + РСЕ через 20 год гідратації наведені на рис. 3.31. Методом растрової електронної мікроскопії показано, що зразок на основі 80 мас. % СЕМ ІІ/А-LL + 20 мас. % АПД характеризується дрібнокристалічною структурою, яка проявляється у вигляді гідросилікатів кальцію та пластиноподібних кристалів портландиту (рис. 3.31, а, б). При введенні 1,0 мас. % РСЕ виявляється рихлоподібна структура за рахунок підвищеної кількості води.

Впливаючи на процеси формування структури, особливо на початковій, коагуляційній стадії, РСЕ змінюють реологічні властивості цементуючої системи, сприяють скороченню її водопотреби, що надалі відображається на властивостях кристалізаційної структури.

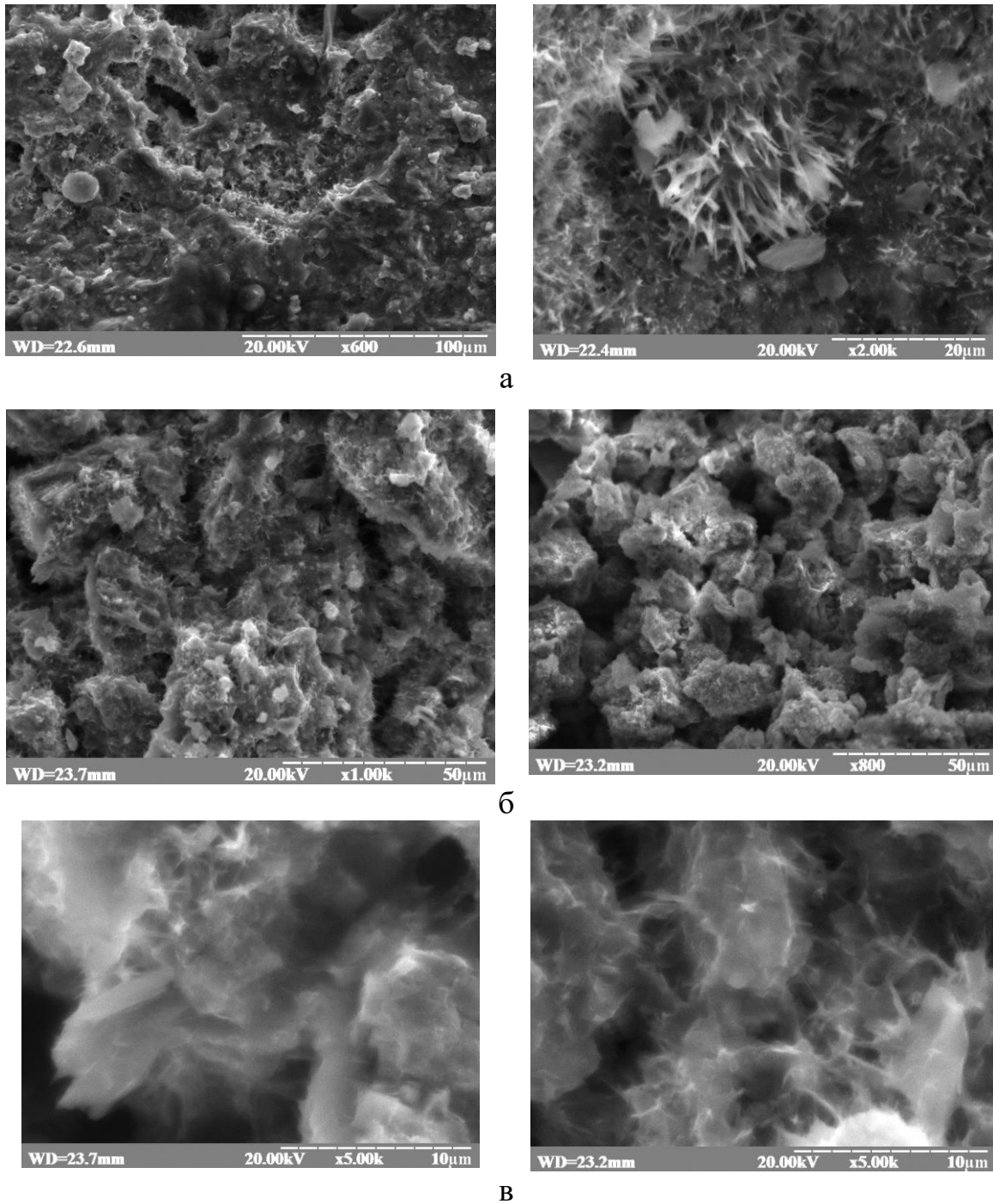


Рисунок 3.31 – Мікроструктура модифікованого цементного каменю через 20 год гідратації: а - СЕМ II + АПД; б, в - СЕМ II+ АПД + РСЕ

Зауважимо, що будова молекул водорозчинних карбоцепних суперпластифікаторів передбачає таке хімічне модифікування карбоксилвмісних полімерів, яке дозволяє ввести в ці макромолекули довгі бічні олігоалкіленоксидні ланцюги через утворення відповідних складноефірних або амідних груп. Така «гребнеподібна» будова полімерів

(акрилатів та метилметакрилатів) забезпечує практично необмежені можливості управління колоїдно-хімічною поведінкою суперпластифікуючих полікарбоксилатних добавок та їх впливом на процеси гідратації мінералів клінкеру та структуроутворення в цементних пастах шляхом зміни довжини основного та бічних ланцюгів, електричних зарядів, щільності бічних ланцюгів, вільних функціональних груп, молекулярної маси. Введення PCE сприяє утворенню додаткової кількості C-S-H-гелю, що відображається на збільшенні об'єму внутрішніх гідратних новоутворень - на поверхні зерен спостерігається наростання значної кількості дрібнодисперсних кристалів гідросилікатів кальцію.

Таким чином, комплексне поєднання високодисперсної активної пуцоланової добавки «зола-винесення - мікрокремнезем» та полікарбоксилатних суперпластифікаторів на основі акрилових полімерів дозволяє регулювати реологічні властивості цементів та оптимізувати структуру цементного каменю на мікрорівні, щоб забезпечити високу щільність та міцність контактної зони для досягнення покращених будівельно-технічних властивостей еко-ефективних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону

Висновки до розділу

1. Дослідженнями встановлено, що подрібнені відходи рециклінгу бетону характеризуються рівномірним розподілом зерен фракції 5-20 мм (ДСТУ Б В.2.7-71-98) та 4-16 мм (ДСТУ EN 933-7:2021), а також вмістом дрібної фракції менше 5 мм. Вміст зерен лещадної форми складає 6,5 %, що відповідає групі крупного заповнювача за формою зерна кубовидний (ДСТУ Б В.2.7-74-98) та категорії лещадності SI_{15} з вмістом лещадних зерен ≤ 15 мас. %. (DIN EN 933-4). Дослідженнями фізичних характеристик заповнювачів встановлено, що середня густина гранітного щебеню (фр. 5-20 мм) становить 2630 кг/м^3 , а ЗРБ - 2403 кг/м^3 ; водопоглинання гранітного щебеню складає 1,3 %, для ЗРБ (фр. 5-20 мм) - збільшується в 4,7 раз і досягає 6,1 %, для зерен

дрібної фр. 0,16-5,0 мм – зростає до 7,8 %; загальна пористість фр. 5-20 мм складає 9,3 %. ЗРБ характеризується маркою за подрібнюваністю 800 відповідно до ДСТУ Б В.2.7-75-98.

2. Методом оптичної мікроскопії показано, що на зернах ЗРБ налипають залишки цементно-піщаного розчину з наявними тріщинами різних розмірів, що послаблює контактну зону ЗРБ. Встановлено, що ЗРБ характеризуються пилоподібною фракцією (прохід через сито 80 мкм), зерна якого агломеруються візуально їх можна віднести до частинок цементу. Методом флуоресцентного аналізу встановлено, що для зерен фр. 2,5-10 мм переважає вміст SiO_2 (55,41 %), тоді як кількість CaO складає 29,45 %; для дрібнодисперсного порошку (частинки < 80 мкм) кількість CaO збільшується в 1,9 рази і досягає 56,53 %, а вміст SiO_2 складає 30,70 %, в.п.п. складають 32 мас. %. Методом кількісного рентгенофазового аналізу за Рітвельдом встановлено, що пилоподібна фракція характеризується наявністю підвищеного вмісту CaCO_3 - 35,8 %, SiO_2 - 21,3 %, а також фіксуються гідратні фази $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 12,2 % і сліди еtringіту – 0,8 %, які підтверджують вміст цементу в складі ЗРБ.

3. Дослідженнями впливу природних пісків різних груп на технологічні та міцнісні властивості дрібнозернистих бетонів встановлено, що найнижчою водопотребою ($V/C=0,35$) та найвищою міцністю ($R_{c28}=90$ МПа) при $RK=170-175$ мм характеризуються суміші з найвищою витратою цементу ($C/P=1:1,65$) при застосуванні крупного піску з $M_k=2,3$. В той же час, для дрібнозернистого бетону ($C/P=1:1,95$) на основі піску з $M_k=1,3$ міцність через 2 і 28 діб зменшується та складає 23,6 і 62,0 МПа.

4. Оптимізовано зерновий склад дрібних заповнювачів - природнього піску та після рециклінгу бетону. Дослідженнями встановлено, що найбільшою насипною густиною 1450 кг/м^3 і найнижчою пустотністю 36,1% характеризується склад суміші з піску природнього і рециклінгу бетону в співвідношенні $P_{M_k1,3}:ЗБ_{M_k2,75}=50:50$ %. Показано, що для дрібнозернистого бетону на основі оптимізованого зернового складу заповнювачів ($C/P=1:1,94$, $RK=181-183$ мм) при $V/C=0,45$ міцність через 2 і 28 діб складає 37,1 і 79,0 МПа.

Встановлено, що введення полікарбонатного суперпластифікатора за рахунок водоредукуючого ефекту ($\Delta V/C=40\%$) забезпечує підвищення міцності через 2 і 28 діб до $R_{ct2}=60,4$ МПа і $R_{ct28}=95,0$ МПа.

5. Для модифікування структури дрібнозернистих бетонів на основі ЗРБ на мезо- та мікрорівнях застосовано високодисперсну активну пуцоланову добавку (АПД) «зола-винесення - мікрокремнезем» ($S_{пит} = 5800$ см²/г) в комплексі з РСЕ. Встановлено, що при введенні 5,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ за рахунок водоредукуючого ефекту $\Delta V/C=30,6\%$ забезпечується найбільший приріст міцності ($R_{ct1}=64,1$ МПа, $R_{ct2}=82,7$ МПа, $R_{ct7}=96,1$ МПа і 28 діб $R_{ct2}=125,7$ МПа) модифікованих бетонів в усі терміни тверднення. Показано, що комплексне введення АПД «зола-винесення - мікрокремнезем» + РСЕ забезпечує зниження умовної в'язкості в 1,5-2 рази з одержанням суперпластифікованої цементуючої системи ($R_{сутгарда} = 310$ мм).

6. З використанням комплексу методів фізико-хімічного аналізу вивчено особливості процесів гідратації цементного каменю, модифікованого АПД «зола-винесення – мікрокремнезем» та РСЕ. Згідно з даними рентгенофазового аналізу за Рітвельдом встановлено, що для портландцементу СЕМ II/A-LL, гідратованого 20 год, вміст еtringіту складає 12,3 мас. %, портландиту 16,2 мас. %, аморфної фази 43,4 %. Для цементного каменю на основі 80 мас. % СЕМ II/A-LL 42,5 R + 20 мас. % АПД через 20 год тверднення кількість еtringіту збільшується до 14,7 %, при цьому вміст портландиту зменшується до 11,2 %; ступінь гідратації через 20 год та 28 діб складає відповідно 28 та 78 %. Зменшення вмісту портландиту підтверджується даними термогравіметричного аналізу. Показано, що введення РСЕ призводить до збільшення кількості аморфної фази, при цьому вміст еtringіту та портландиту не змінюється; ступінь гідратації через 28 діб зростає до 82 %. Методом растрової електронної мікроскопії встановлено, що модифікування цементного каменю АПД + РСЕ сприяє утворенню додаткової кількості С-S-H-гелю, що відображається на збільшенні об'єму внутрішніх гідратних новоутворень у вигляді дрібнодисперсних кристалів гіросилікатів кальцію.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ЗАПОВНЮВАЧІВ РЕЦИКЛІНГУ БЕТОНУ

4.1. Проєктування складу модифікованих еко-ефективних бетонів

Бетон є одним з найважливіших матеріалів, що використовуються в будівництві, і становить 30-50% загальної вартості будь-якої споруди, що будується [121]. Якість використовуваного бетону безпосередньо впливає на міцність і довговічність конструкції. На даний час, для проєктування складу бетону найбільше застосовуються розрахунково-експериментальні методи, які враховують такі етапи: орієнтований розрахунок основних параметрів складу суміші з використанням ряду емпіричних залежностей, математичних моделей, одержаних у результаті накопичення та обробки даних експериментальних досліджень, а також перевірка і уточнення одержаних результатів. Для проєктування складу бетону необхідними є такі показники: (проектна) міцність бетону при стиску (клас); марка за рухомістю бетонної суміші; марки за показниками морозостійкості, водонепроникності та ін.; умови і терміни тверднення бетону; найбільша крупність заповнювачів (у відповідності з розмірами перетину конструкції та густотою армування) [9, 10].

На даний час розрахунок орієнтовного складу бетону виконують з використанням таких основних емпіричних залежностей: міцності бетону від активності цементу та величини водоцементного відношення; консистенції бетонної суміші від витрати води; міцності бетону і легкоукладальності бетонної суміші від якості заповнювачів (у вигляді коефіцієнтів) [9]. Вказані фактори входять в емпіричну формулу Болемея:

$$R_b = AR_c \left(\frac{W}{B} - C \right) \quad (4.1)$$

де A – коефіцієнт якості заповнювачів; R_u – активність цементу, кг/см², B – витрата води на 1 м³ бетонної суміші, C – емпіричний коефіцієнт.

Згідно даної формули міцність бетону, активність цементу, Ц/В подані як технологічні фактори, а фізико-механічні властивості заповнювачів, які суттєво впливають на міцність бетону, представлені у вигляді коефіцієнту (A), значення якого залежить від якості заповнювачів і може змінюватися від 0,55 до 0,65. Разом з тим, якість заповнювачів бетону залежить від їхніх фізико-механічних властивостей (міцність породи заповнювача при стиску, гранулометричний склад, форма і характер поверхні зерен тощо). Крім того, дуже важливою характеристикою заповнювачів є міцність зчеплення (адгезія) з цементним каменем. Коефіцієнт якості заповнювачів може змінюватися: при пониженій якості $A=0,55$; рядовій якості $A=0,60$; високій якості ($A=0,65$).

Консистенція бетонної суміші залежить від витрати води, яку можна експериментально перевірити та уточнити з використанням формули:

$$W = w_k \times K + w_c \times C \quad (4.2)$$

де W – вміст води в 1 м³ бетону, л; w_k - загальний водневий показник, л/кг; K – вміст заповнювача в 1 м³ бетону, кг; C – кількість цементу в 1 м³ бетону, кг; w_c – водний індекс цементу становить 0,23 л/кг.

Випробування вихідних матеріалів проводять згідно з ДСТУ Б В.2.7-215:2009 та за стандартними методиками. Так, для цементу визначають активність, істинну та насипну густини, нормальну густоту тіста; для заповнювачів – насипну густину, середню густину зерен, пустотність, зерновий склад, вологість та ін. При використанні фракціонованого щебню (гравію) визначається оптимальне співвідношення між фракціями для забезпечення найменшої пустотності суміші.

Для встановлення якості заповнювачів запроектовано склади бетону з використанням портландцементу з вапняком (активність 55 МПа), щебеню гранітного (фр. 5-20 мм), заповнювача рециклінгу бетону (фр. 5-20 мм), піску кварцового ($M_k=1,3$). Результати досліджень свідчать (табл. 4.1), що для

звичайного бетону ($\rho = 350 \text{ кг/м}^3$) з використанням гранітного щебеню осадка конуса становила $OK=17 \text{ см}$ при $V/C=0,62$ і досягала проектна міцність $36,1 \text{ МПа}$, що відповідає класу міцності $C20/25$. Розрахований коефіцієнт якості заповнювача склав $A=0,60$, що дозволяє його класифікувати як рядовий. Встановлено, що для бетону на основі ЗРБ V/C збільшується до $0,7$ ($OK=19 \text{ см}$), а міцність зменшується на 18% і становить $30,5 \text{ МПа}$. При цьому розрахований коефіцієнт якості заповнювача рециклінгу бетону знижується до $A=0,55$, що визначає його понижену якість.

Таблиця 4.1

Фізико-механічні властивості бетонів та коефіцієнт якості заповнювачів
($\rho = 350 \text{ кг/м}^3$)

Вид заповнювача	V/C	OK, см	Міцність на стиск через 28 діб, МПа	Коефіцієнт якості заповнювача, A	Клас бетону
Щ фр. 5-20	0,62	17	36,1	0,60	C20/25
ЗРБ фр. 5-20	0,70	19	30,5	0,55	B22,5

Для проектування бетонів застосовують основні компоненти – це цемент, пісок і щебінь. При цьому необхідно приділити значну увагу зерновому складу заповнювачів. Відповідно до настанови ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 висувуються вимоги до найбільшої крупності зерен заповнювачів та лещадності. При цьому показано, що для максимальної крупності зерен 20 мм співвідношення між фракціями при розмірі фракцій $5-10 \text{ мм}$ та $10-20 \text{ мм}$ повинно складати відповідно 35% та 65% (табл. 7.1, ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013). Це можна досягнути усередненням зернового складу введенням фракції $5-10 \text{ мм}$. В той же час, проблемою товарних бетонів є застосування дуже дрібних пісків з $M_k=1,1-1,3$, які згідно з нормами не можна використовувати для товарних бетонів. Для

таких пісків переважна частина зерен зосереджується на ситах 0,315 мм та 0,16 мм. Це призводить до значної водопотреби бетонів, перевитрати цементу та ін.

Під час дослідження зернового складу запропонованої суміші заповнювачів (пісок : щебінь = 1:1,76), зокрема часткових залишків, видно, що в області сит з отворами 0,25 - 4 мм створюється незаповнений простір, в той же час, зерна піску розподіляються на ситах з розміром отворів 0,125 мм, 0,25 мм, а щебеню – 8 та 16 мм, що свідчить про нерівномірний розподіл зернового складу заповнювачів (рис. 4.1).

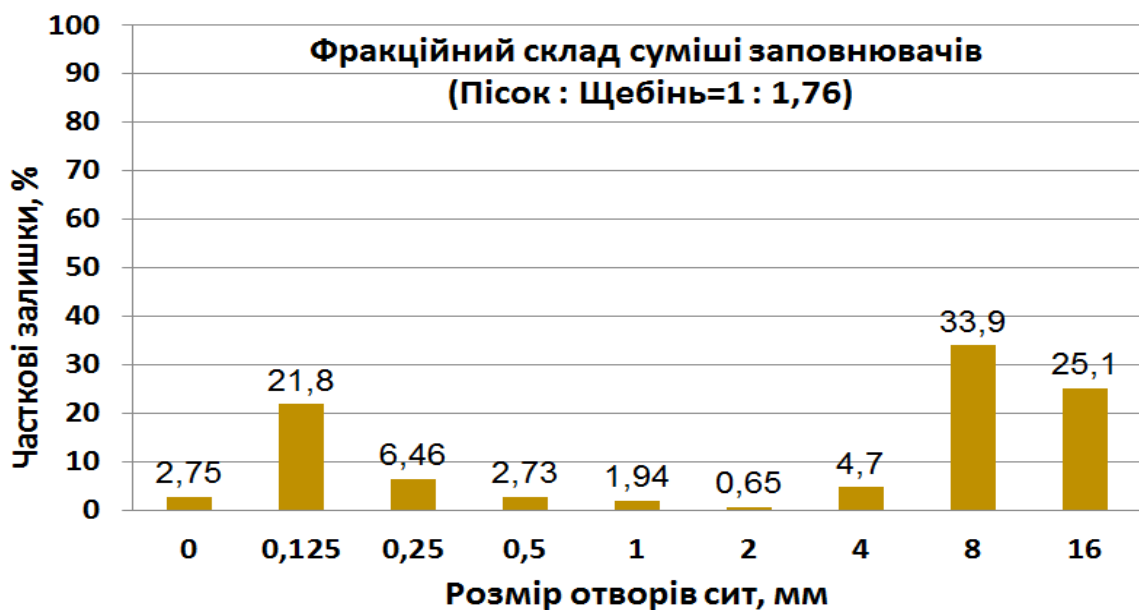


Рисунок 4.1 - Фракційний склад суміші заповнювачів (П:Щ=1:1,76)

На основі даних результатів запроєктовано традиційні бетони з використанням портландцементу з вапняком СЕМ II/A-LL 42,5 R класу міцності на стиск С20/25. Проведено порівняльну оцінку фізико-механічних властивостей бетонів на основі гранітного щебеню та заповнювачів рециклінгу бетону. Для забезпечення марки за осіданням конуса Р4 водоцементне відношення для бетону на основі гранітного щебеню та заповнювачів рециклінгу бетону змінювалося в межах В/Ц=0,62 ... 0,70. Склади бетонів наведено в табл. 4.2. Встановлено, що для досягнення марки за рухливістю Р4 при збільшенні витрати ЗРБ спостерігається збільшення В/Ц, відповідно для

контрольного зразка В/Ц становить 0,62, при заміні 25% щебеню на ЗРБ - 0,63; 50% - 0,64; 75% - 0,66; при застосуванні 100% ЗРБ В/Ц збільшується до 0,70.

Таблиця 4.2

Склади бетонів на основі СЕМ II/A-LL 42,5 R (Ц=350 кг/м³)

№ з/п	Заповнювач, Щгр : ЗРБ, %	Витрата піску, кг	Витрата щебню, фр. 5-20, кг	Витрата ЗРБ, кг	В/Ц	ОК, см
1	100 : 0	690	1180	-	0,62	17
2	25 : 75	690	885	295	0,63	17
3	50 : 50	690	590	590	0,64	18
4	25 : 75	690	295	885	0,66	18
5	0 : 100	690	-	1180	0,70	19

При цьому спостерігається зниження міцності (табл. 4.3), що становить для контрольного зразка через 1; 2; 7 і 28 діб відповідно 7,0 МПа; 13,6 МПа; 24,1 МПа і 36,1 МПа. Для бетонів на основі суміші заповнювачів Щгр : ЗРБ = 25 : 75 міцність становить 7,1 МПа; 13,4 МПа; 24,0 МПа; 35,9 МПа.

Таблиця 4.3

Порівняльна характеристика міцності бетонів на основі ЗРБ

Заповнювач, Щгр : ЗРБ, %	В/Ц	Об'єм повітря, %	Міцність на стиск, МПа, у віці, діб				Клас бетону
			1	2	7	28	
100 : 0	0,62	2,8	7,0	13,6	24,1	36,1	C20/25
25 : 75	0,63	2,9	7,1	13,4	24,0	35,9	C20/25
50 : 50	0,64	3,1	6,9	13,1	23,8	34,2	C20/25
25 : 75	0,66	3,0	6,2	12,6	22,2	31,8	B22,5
0 : 100	0,70	3,4	5,8	11,9	21,3	30,5	B22,5

Під час заміщення в суміші на 50 % ЗРБ міцність незначно зменшується та через 1, 2, 7 і 28 діб становить 6,9 МПа; 13,1 МПа; 23,8 МПа; 34,2 МПа

відповідно; при заміні на 75% ЗРБ міцність зменшується на 12-13%, а при повному заміщенні гранітного щебеню знижується до 5,8 МПа, 11,9 МПа, 21,3 МПа і 30,5 МПа відповідно. Міцність на стиск звичайних бетонів на основі суміші заповнювачів природного та після рециклінгу представлено рис. 4.2. Зменшення міцності спостерігається при заміні 25% ЗРБ на 4,3%, при 50% ЗРБ на 8,8 %, при 75% ЗРБ міцність знижується на 15,2 %, при 100 % ЗРБ міцність знижується на 18,7%.

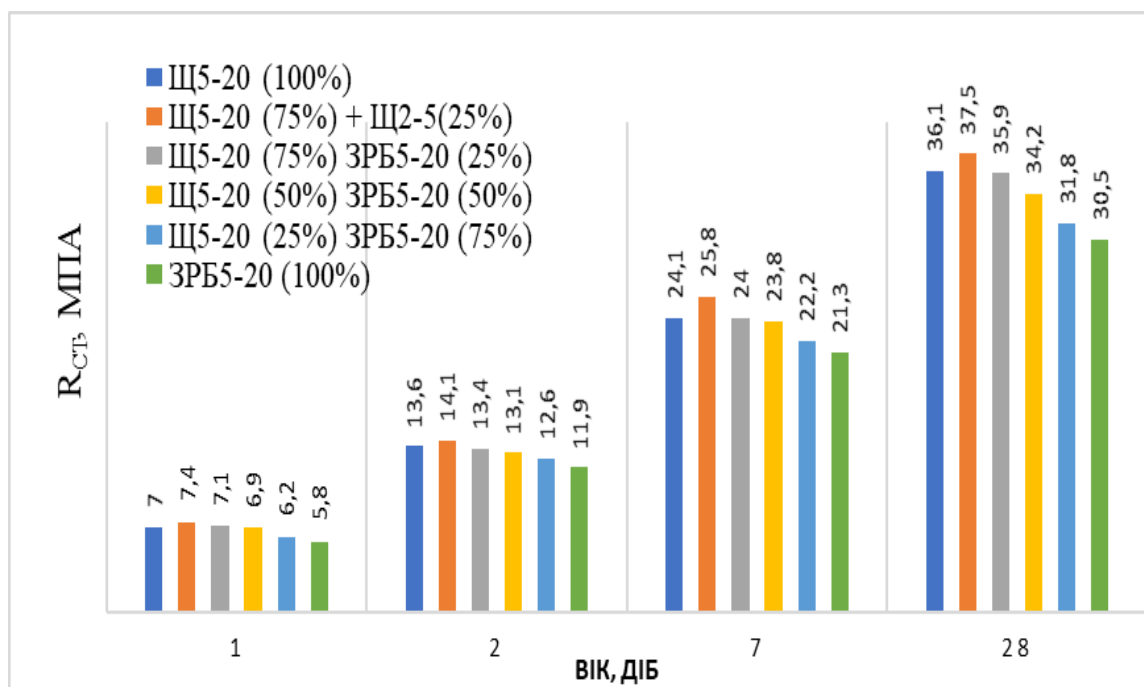


Рисунок 4.2 - Міцність на стиск звичайних бетонів на основі суміші заповнювачів природнього та ЗРБ

Методом растрової електронної мікроскопії встановлено, що зразок бетону на основі заповнювачів (Щгр : ЗРБ = 25 : 75) характеризується включеннями зерен дрібних фракцій ЗРБ розміром 50-100 мкм. З рис. 4.3, а, видно, що зерна ЗРБ не щільно з'єднуються з цементуючою матрицею бетону, про що свідчать щілини та тріщини на контактні поверхні. В той же час, склади бетонів характеризуються високою водопотребою, що призводить до утворення капілярних пор і порожнин у структурі бетону на основі ЗРБ, а також послаблення контактів, і, як наслідок, зниження міцності та довговічності. Так, на мікрофотографії (рис. 4.2, б, рівень мікроструктури) спостерігається

капілярна пора ($d=14$ мкм, $L=18-22$ мкм), це показує, що цементні зерна контактують недостатньо щільно, що призводить до зростання капілярної пористості.

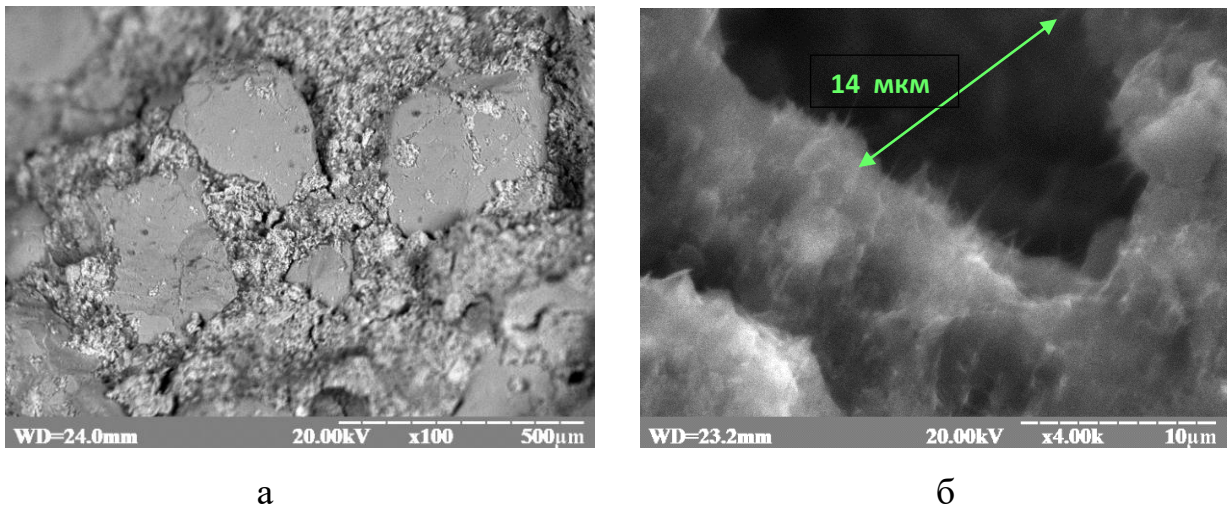


Рисунок 4.3 – Мікрофотографії структури бетону (Щ гр. : ЗРБ = 25 : 75, В/Ц=0,66) на мезо- (а) та мікрорівнях (б)

Таким чином, результати досліджень свідчать про необхідність забезпечення щільності цементуючої матриці бетону на мікро- та мезорівнях, що досягається принципами фізичного підходу із застосуванням високоефективних суперпластифікаторів, а також проведення оптимізації гранулометричного складу заповнювачів для підвищення експлуатаційних властивостей еко-ефективних бетонів на основі ЗРБ.

4.2. Оптимізація складів швидкотверднучих модифікованих бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону

На сучасному етапі розвитку технології будівництва проблеми підвищення якості, довговічності, економічності бетону та залізобетону успішно вирішуються шляхом введення хімічних добавок [38, 80]. Класичні пластифікатори вже давно успішно застосовуються в товарних бетонних

сумішах, як технічно, так і економічно. На даний час найефективнішими модифікаторами є полікарбоксилатні суперпластифікатори (PCE). Зазначимо, що існує не один вид PCE, а сімейство PCE, які можуть характеризуватися досить різною дією [120]. Зокрема, слід відзначити їх схильність до несумісності з цементом, яка пов'язана з їх молекулярною структурою. Полікарбоксилати можуть містити групи з поліоксиалкіленом, особливо поліетиленові або поліпропіленгліколеві групи, а також мономер карбонової кислоти та/або ангідриду карбонової кислоти (напр. акрилова кислота, метакрилова кислота, малеїнова кислота, ітонова кислота та їх ангідриди). Крім того, мономер на основі вінілу або акрилату можуть внести свій внесок у хімічну структуру PCE.

Важливим завданням в технології товарного бетону є забезпечення його технологічності – збереження рухливості бетонної суміші в часі. Встановлено, що PCE, отримані з акрилової та малеїнової кислоти, мають довший хребет і бічні ланцюги, а також карбоксилатні групи ($R-COO-$), що підвищують гідрофільність, але здатні сповільнювати процес гідратації. Модифікатори значно зменшують кількість води замішування з одержанням литої суміші товарного бетону. Це дозволяє проводити транспортування бетонних сумішей на тривалі відстані із забезпеченням при цьому необхідного класу міцності бетону.

Для дослідження використано полікарбоксилатні суперпластифікатори: звичайний поліефірного типу (PCE 1), на основі акрилового полімеру (PCE 2), на основі модифікованого акрилового полімеру (PCE 3, PCE 4). Для проектування складу бетону застосовано портландцемент СЕМ II/A-LL 42,5 R та дуже дрібні та дрібні піски, гранітний щебінь двох фракцій: 2–8 мм та 8–16 мм. Зерновий склад заповнювачів визначали з використанням набору сит згідно з EN 933-1:2012-03 методом сухого просіювання. Підбір складу суміші заповнювачів проводився згідно з PN-B-06250:1988.

Для одержання товарних бетонів визначальним для щільності упаковки зерен є оптимізація гранулометричного складу компонентів. Результати

досліджень поліфракційного зернового складу заповнювачів (пісок фракції 0,125–2,0 мм, щебінь фракцій 2–4; 4–8; 8–16 мм), дозволяють більш повно оцінити вклад окремих фракцій для проектування кривої необхідного гранулометричного складу товарної бетонної суміші. Встановлено, що для щебеню фракції 2–4 мм максимальний розмір заповнювача на ситах 4,0 і 2,0 мм складає відповідно 64,5 і 28,1 мас.%. При просіюванні щебеню фракції 4–16 мм найбільший вміст зерен складає 34,2 і 59,7 мас.% на ситах 16,0 та 8,0 мм. Підібраний гранулометричний склад суміші забезпечує рівномірний розподіл фракцій заповнювачів. Це позитивно впливає на консистенцію бетонної суміші при якомога меншій кількості води та цементу (розчинова складова), а також забезпечує мінімальний вміст повітря.

Дослідження впливу полікарбоксилатних суперпластифікаторів на технологічні властивості та міцність товарних бетонів проводили на оптимізованому складі суміші компонентів з витратою матеріалів на 1 м³: Ц=350 кг, П=420 кг, Щ фр. 2-4=530 кг, Щ фр. 4-16=860 кг (марка за осадкою конуса – S4). Полікарбоксилатні суперпластифікатори на різній полімерній основі вводили в кількості 1,0 мас.%. Встановлено, що для бетонної суміші без добавок осадка конуса складає 185 мм при В/Ц=0,54 (рис. 4.4).

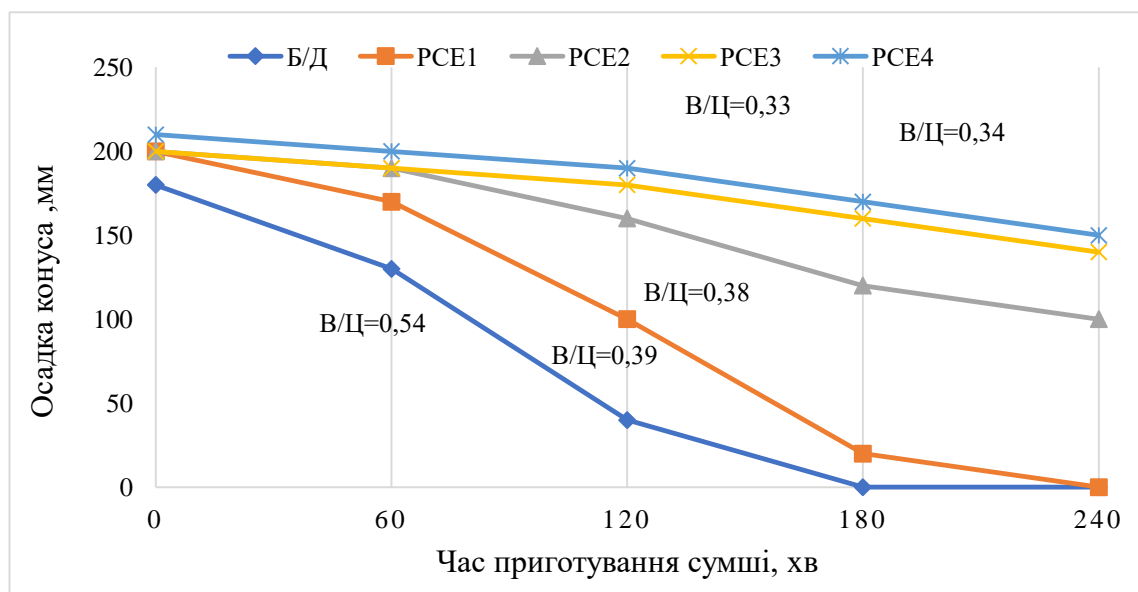


Рисунок 4.4 - Втрата рухливості бетонної суміші в часі з PCE на різних полімерній основі

При цьому втрата рухливості спостерігається вже через 60-120 хв. При введенні 1,0 мас.% PCE-1 рухливість суміші (ОК=200 мм) досягається при В/Ц=0,39 із збережуваністю консистенції в часі протягом 60-100 хв. Для бетонної суміші, модифікованої суперпластифікатором PCE-2 при ОК=200 мм (В/Ц=0,38), рухливість втрачається після 120 хв. В той же час, при введенні полікарбоксилатних суперпластифікаторів другого покоління PCE-3 та PCE-4 осадка конуса ОК=200-210 мм досягається при водоцементному відношенні 0,33-0,34. При цьому рухливість зберігається протягом 240 хв при марці за осіданням конуса S4.

Встановлено, що полікарбоксилатний суперпластифікатор на основі простого полімеру PCE є більш ефективний як водоредукуюча добавка (ΔВ/Ц=28%) із забезпеченням високих показників як ранньої ($f_{cm1}=26,2$ МПа), так і проектної ($f_{cm28}=67,6$ МПа) міцностей бетону (рис. 4.5). Для даного складу бетону (Ц=350 кг/м³) досягається клас міцності на стиск С40/50.

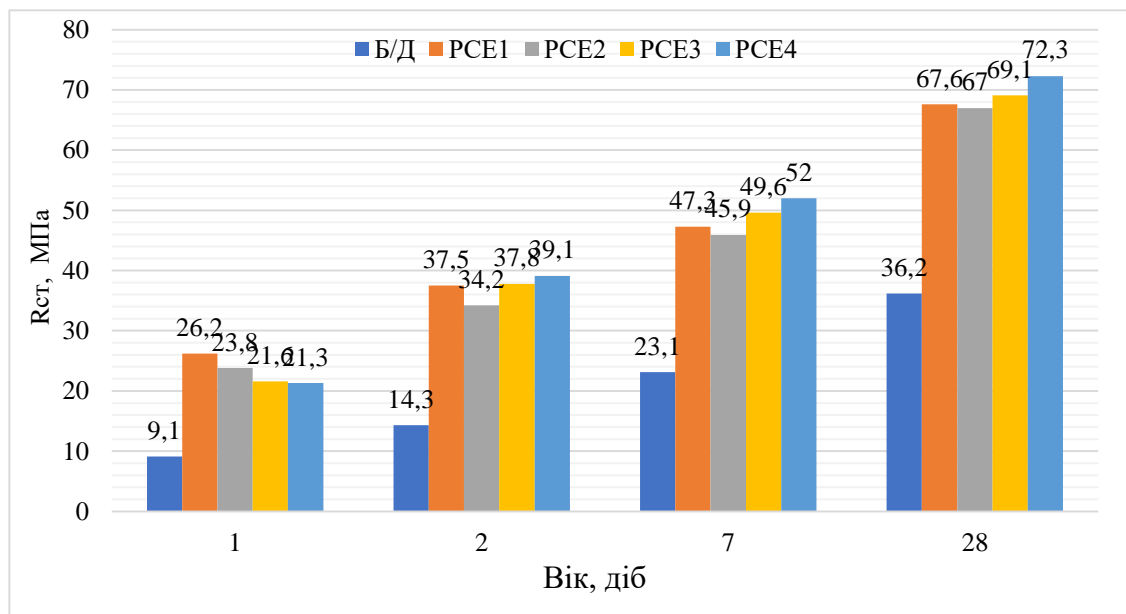
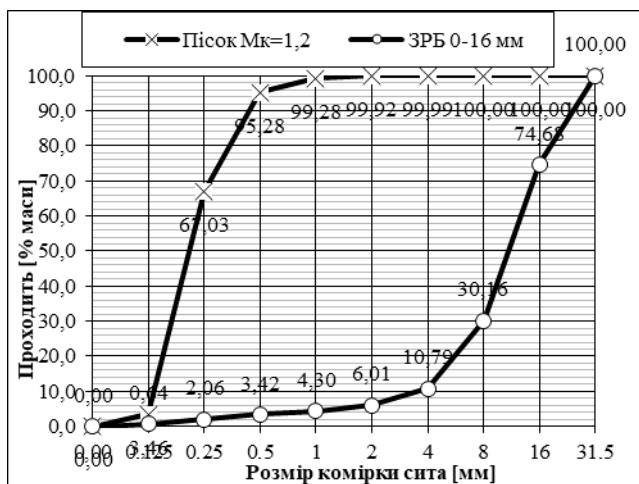
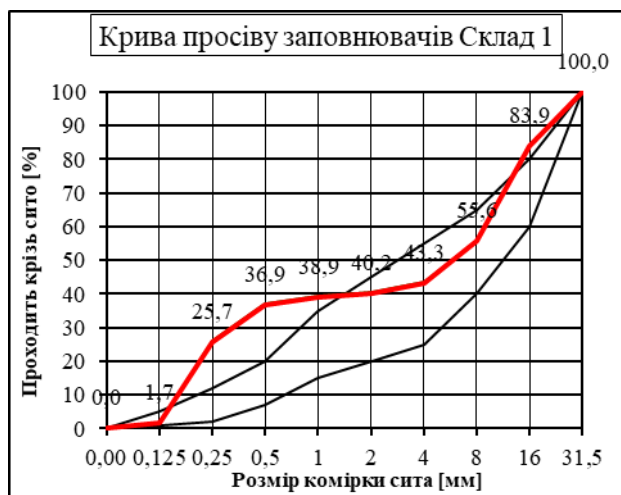


Рисунок 4.5 - Міцність бетонів на стиск на основі СЕМ II/A-LL 42.5 R з PCE

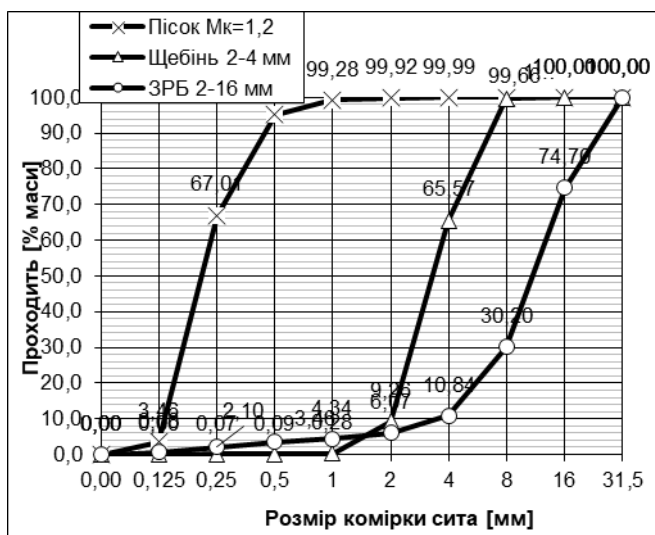
В подальших дослідженнях в якості крупних заповнювачів використано гранітний щебінь та заповнювач рециклінгу бетону. Визначення зернового складу суміші заповнювачів проведено згідно з ДСТУ EN 933-1:2021 (рис. 4.6).



а



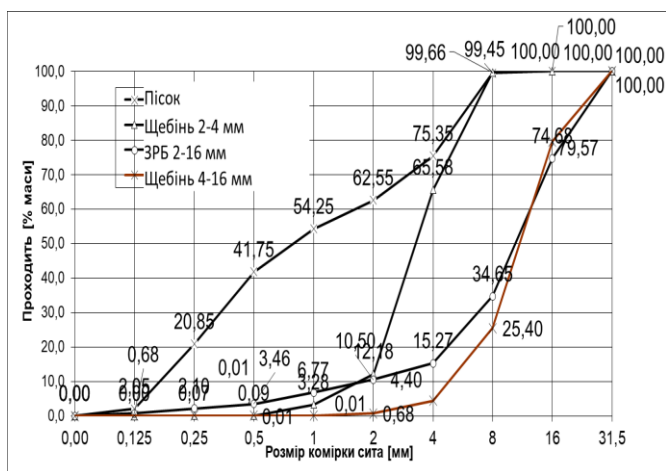
б



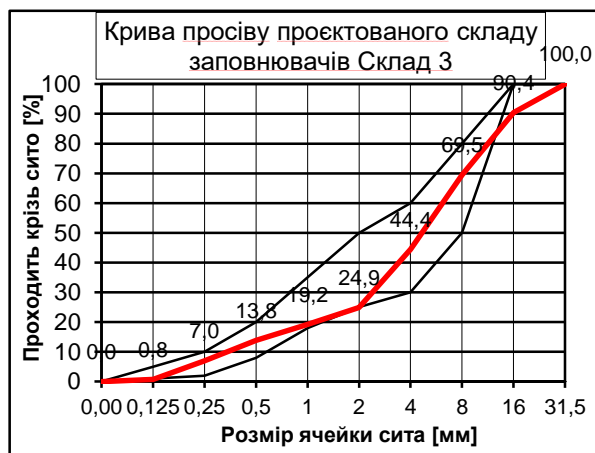
в



г



д



е

Рисунок 4.6 – Зерновий склад заповнювачів (а, в, д) та криві просіювання суміші заповнювачів (б, г, е)

Зерновий склад заповнювачів для складу 1 (пісок з $M_k=1,2$ та ЗРБ фр. 2-16 мм), для складу 2 (пісок з $M_k=1,2$, ЗРБ фр. 2-16 мм та Щгр фр.2-4 мм) та для складу 3 (пісок з $M_k=1,2$, ЗРБ фр. 2-16 мм, Щгр фр.2-4 мм та Щгр фр.4-16 мм) наведені на рис. 4.6, а, в, д. З метою одержання рівномірного зернового складу суміші заповнювачів проведено підбір компонентів згідно з PN-B-06250:1988. Криві просіву проєктованих складів заповнювачів представлені на рис. 4.6, б, г, е). Як видно з рис. 4.8, б, крива просіву заповнювачів складу №1 ($P_{M_k1,2} : ZРБ_{2-16} = 36,8 : 63,2$) не входить у потрібні межі за рахунок підвищеного вмісту дрібної фракції 0,125 – 1 мм. Для покращення властивостей було введено фракцію щебеневого відсіву. Як видно з рис. 4.8, г, крива суміші заповнювачів складу №2 ($P_{M_k1,2} : ZРБ_{2-16} : Щ_{2-4} \text{ мм} = 31,7 : 51,36 : 16,94 \%$) дещо стабілізується, при цьому видно, що є недостатньо крупної фракції. Показано, що введення оптимізованого складу піску з $M_k=2,7$ та гранітного щебеню фр. 4-16 мм дозволяє одержати склад №3, який найбільш наближений до оптимального зернового складу суміші заповнювачів (рис. 4.8, е).

При проєктуванні складу еко-ефективного бетону на основі заповнювачів рециклінгу бетону, виконано експериментально-статистичне моделювання з вирішенням багатопараметричних задач оптимізації з позиції адекватності властивостей критеріям функціональності. При цьому використаний метод ортогонально-центрального композиційного планування (ОЦКП). Експериментальні дослідження виконували у відповідності з планом двофакторного тривірневого експерименту (табл. 4.4), фактори, якого змінювали з наступним кроком - ЗРБ ($X_1=0; 50; 100$ мас. %) та полікарбосилатний суперпластифікатор РСЕ-4 ($X_2=0; 1,5; 3,0$ мас. %).

При плануванні експерименту були вибрані наступні контрольні параметри: Y_1 (в/ц) – водоцементне відношення; Y_2 (f_{cm1}), Y_3 (f_{cm2}), Y_4 (f_{cm28}) – границя міцності на стиск через 1; 2 та 28 діб тверднення відповідно, МПа.

Таблиця 4.4

Характеристика планування експерименту

Рівень	Фактори впливу	
	ЗРБ, мас.% (X ₁)	РСЕ, мас.% (X ₂)
Нижній рівень «-1»	0	0
Основний рівень «0»	50	1,5
Верхній рівень «+1»	100	3,0
Інтервал варіювання	50	1,5

Проектування еко-ефективних бетонів виконували на основі СЕМ II/A-LL 42,5 R ($\rho = 350 \text{ кг/м}^3$) та з використанням запроєктованих складів суміші заповнювачів (рис. 4.5) з врахуванням зміни кількості в складі суміші заповнювачів рециклінгу бетону (фракція 2-16 мм).

Таблиця 4.5

Матриця планування та результати повного двофакторного експерименту

№ з/п	Нормалізовані фактори		Натуральні фактори, мас.%		В/Ц	Границя міцності на стиск, МПа, у віці, діб			Клас міцності на стиск
	X ₁	X ₂	ЗРБ	РСЕ		1	2	28	
					Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₃	
1.	-1	+1	100	0	0,70	5,8	21,3	30,5	C16/20
2.	-1	-1	0	0	0,62	7,4	14,1	37,5	C20/25
3.	-1	0	50	0	0,64	6,9	13,1	34,2	C20/25
4.	0	+1	100	1,5	0,50	14,1	25,0	51,6	C30/35
5.	0	-1	0	1,5	0,41	22,6	33,1	71,6	C40/50
6.	0	0	50	1,5	0,46	18,3	29,8	59,3	C35/45
7.	+1	+1	100	3	0,38	22,0	30,6	82,9	C50/60
8.	+1	-1	0	3	0,32	26,6	34,8	92,4	C55/67
9.	+1	0	50	3	0,34	23,9	32,2	89,3	C55/67

При зміні рецептурних рівнів вибраних факторів забезпечували сталу марку за рухливістю бетонних сумішей – Р4 (ОК=16-20 см) при цьому водовміст бетонної суміші змінювали (контрольний параметр Y1). Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту представлені в табл. 4.5.

Для пошуку значень змінних факторів X_1 (витрата ЗРБ) і X_2 (кількість РСЕ), 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 планів та відповідних їм експериментальних даних за методом найменших квадратів отримано рівняння регресії (4.3–4.6), що адекватно описують залежність водовмісту (В/Ц) та міцності (f_{cm1} , f_{cm2} , f_{cm28}) бетонів, як критеріїв оптимізації системи.

$$Y_{1(B/C)} = 0,45 - 0,15 X_1 + 0,03 X_2 + 0,04 X_1^2 \quad (4.3)$$

$$Y_{2(f_{cm1})} = 18,30 + 8,73 X_1 - 2,45 X_2 - 2,90 X_1^2 + 0,05 X_2^2 - 0,75 X_1 X_2 \quad (4.4)$$

$$Y_{3(f_{cm2})} = 23,89 + 9,24 X_1 + 2,43 X_2 - 4,74 X_1^2 + 0,11 X_2^2 - 0,62 X_1 X_2 \quad (4.5)$$

$$Y_{4(f_{cm28})} = 29,48 + 9,75 X_1 - 2,41 X_2 - 6,58 X_1^2 - 0,18 X_2^2 - 0,50 X_1 X_2 \quad (4.6)$$

Аналіз значень коефіцієнтів рівняння регресії водоцементного відношення свідчить про позитивний вплив на нього змінного фактора X_2 . Використання заповнювачів рециклінгу бетону призводить до зростання водопотреби, що пов'язане з пористою структурою ЗРБ. Збільшення вмісту полікарбоксилатного суперпластифікатора РСЕ-4 позитивно впливає на міцність при стиску через 1, 2 та 28 діб тверднення, про що свідчать додатні значення коефіцієнта b_1 . Як видно з рівнянь регресії, сумісний вплив факторів на міцність є негативним, про що свідчать від'ємні значення коефіцієнтів b_{12} . Збільшення вмісту полікарбоксилатного суперпластифікатора РСЕ-4 позитивно

впливає на міцність при стиску через 1, 2 та 28 днів тверднення, про що свідчать додатні значення коефіцієнта b_1 . Як видно з рівнянь регресії, сумісний вплив факторів на міцність є негативним, про що свідчать від'ємні значення коефіцієнтів b_{12} .

За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні діаграми, що адекватно описують залежність водопотреби, міцності при стиску через 1, 2 та 28 днів тверднення еко-ефективного бетону від змінних параметрів (рис. 4.7, а-г).

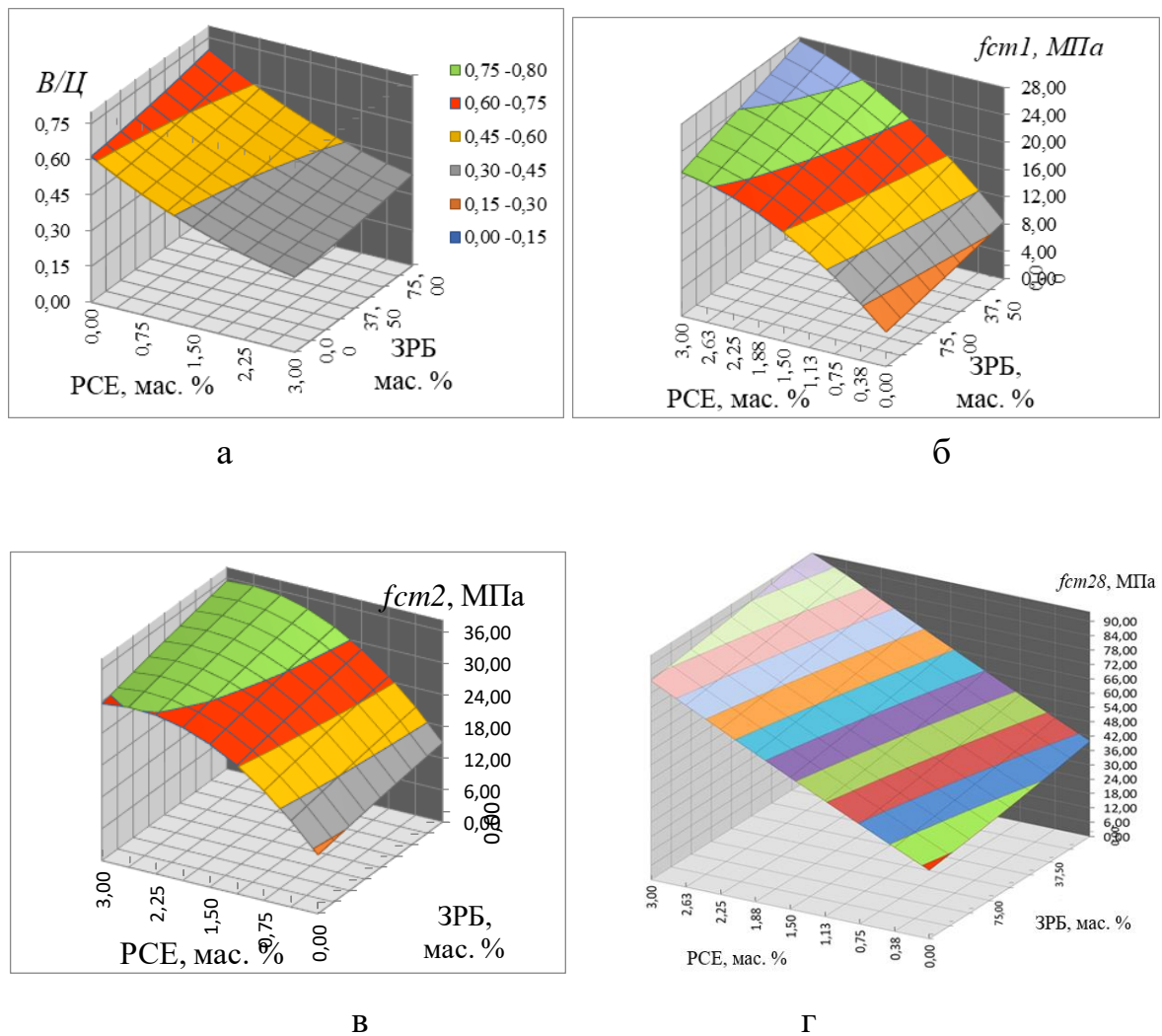


Рисунок 4.7 - Ізопараметричні діаграми водоцементного відношення (а), міцності на стиск через 1 добу (б), 2 доби (в) та 28 днів (г)

Використання оптимізованого зернового складу заповнювачів та 1,5-3,0 мас.% полікарбонатного суперпластифікатора на основі модифікованих акрилових полімерів забезпечує отримання еко-ефективних бетонів класу за

міцністю С35/45 та С55/67 при витраті портландцементу з вапняком 350 кг/м³. Введення 3,0 мас.% РСЕ забезпечує одержання високоміцних еко-ефективних бетонів класу міцності С50/60 та С55/67. Згідно з ДСТУ Б EN 206-1, за оцінкою питомої міцності модифіковані бетони характеризується середнім ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,37-0,48$) та швидким ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,50$) наростанням.

4.3. Дослідження мезо- та мікроструктури еко-ефективних бетонів на основі поліфракційних заповнювачів рециклінгу

Макроструктура бетону представлена характерною структурною неоднорідністю «розчинова частина - заповнювач» [22]. З метою встановлення особливостей формування структури на мезо- та мікрорівнях проведено дослідження структурних частин модифікованого бетону, який запроєктовано з використанням портландцементу з вапняком ($\rho_c=350$ кг/м³), суміші заповнювачів з відношенням компонентів: 50% Щ фр.5-20 + 50% ЗРБ фр. 2-5 та 1,0 мас.% РСЕ. Для модифікованого бетону осідання конуса складало 19 см при водопотребі В/Ц=0,45, границя міцності на стиск через 7 та 28 діб становила відповідно 30,2 та 50,8 МПа.

Для визначення фізико-механічних властивостей розчинової складової бетону, свіжу бетонну суміш (марка за рухливістю Р4) було розділено на ситі з отвором 5 мм з одержанням двох частин: фракції щебеню та цементно-піщаного розчину (рис. 4.8). З метою визначення міцності складників, розчинову частину, яка пройшла через сито з отвором 5 мм, було заформовано з використанням форм 40x40x160 мм і випробувано через 2 і 28 діб тверднення. Дослідженнями встановлено, що для цементно-піщаної розчинової суміші рухливість складала РК=230 мм, міцність на згин через 2 і 28 діб становила 3,6 і 8,4 МПа, міцність на стиск - 24,5 і 74,8 МПа (табл. 4.6).



Рисунок 4.8 – Бетонна суміш на основі поліфракційних заповнювачів, розділена через сито отвором 5 мм: а – бетонна суміш до розділення; б – залишок крупного заповнювача після розділення; в – цементно-піщаний розчин, що пройшов крізь сито з отвором 5 мм

Таблиця 4.6

Фізико-механічні властивості цементно-піщаної розчинової частини, відділеної від бетонної суміші

Склад суміші заповнювачів	В/Ц	РК, мм	Границя міцності на згин, МПа, у віці, діб		Границя міцності на стиск, МПа, у віці, діб	
			2	28	2	28
50%Щ фр. 5-20 + 50% ЗРБ фр. 5-20 + 1,0 мас. % РСЕ	0,45	230	3,6	8,4	24,5	74,8
25%Щ фр. 5-20 + 75% ЗРБ фр. 5-20 + 1,0 мас. % РСЕ	0,47	220	2,4	7,1	19,7	65,9

Результатами досліджень встановлено, що міцність структурних частин модифікованого бетону змінюється наступним чином: для гранітного щебеню – 120 МПа, для цементного каменю (залежить від В/Ц) – 90 МПа, цементно-піщаної суміші (розчинова частина) – 74 МПа, а для бетону – 50 МПа (рис. 4.9). Дані свідчать, що міцність бетону є менша в 1,8 рази від цементного каменю та в 1,5 рази від його розчинової частини.

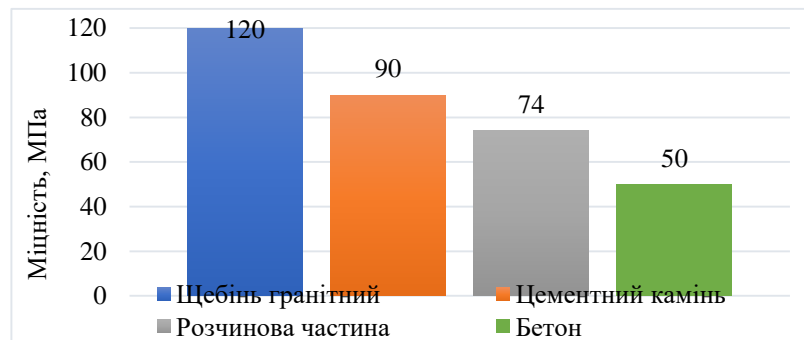


Рисунок 4.9 – Міцність компонентів і структурних частин бетону

Оптимальній структурі на макро- і мезорівні відповідає максимальна щільність упакування зерен, а на мікрорівні - міцна будова перехідного шару (контактної зони), що є найслабшим місцем в бетоні. Згідно [114], в контактному шарі товщиною 2-3 мкм (рис. 4.10) на межі «заповнювач – розчин» наявні кристалічні фази портландиту - 21% та еtringіту - 15%, які є слабкою ланкою бетону та призводять до зниження його міцності, крім того в даному шарі знаходиться значна кількість капілярних пор.

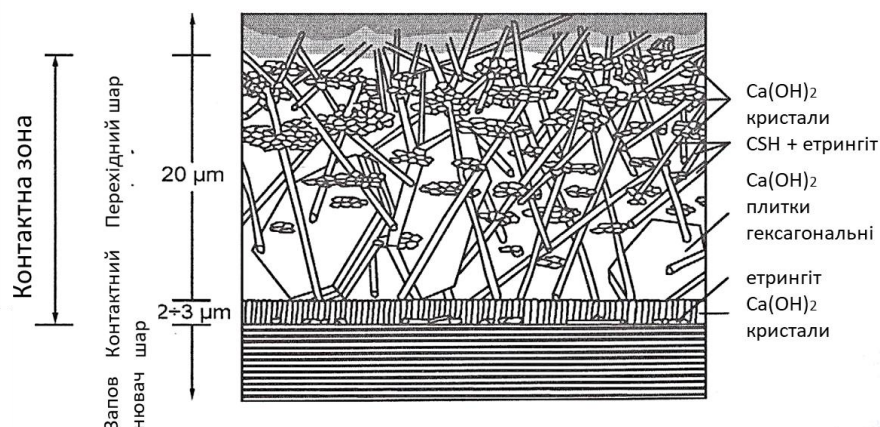


Рисунок 4.10 – Модель перехідної контактної зони «заповнювач – цементний розчин» [114]

Зауважимо, що міцність контактної зони в значній мірі залежить від міцності породи з якої виготовлений заповнювач, вмісту кристалічної фази, якості поверхні зерен та ін. [22]. З рис. 4.11 видно, що контактна зона в бетоні на основі природного заповнювача характеризується щільністю і міцністю, в той же час, з'єднання на межі зерен «старого цементу» і «нової» цементуючої матриці характеризується слабкою адгезією (голуба зона), що призводить до підвищення пористості та зниження міцності бетону.

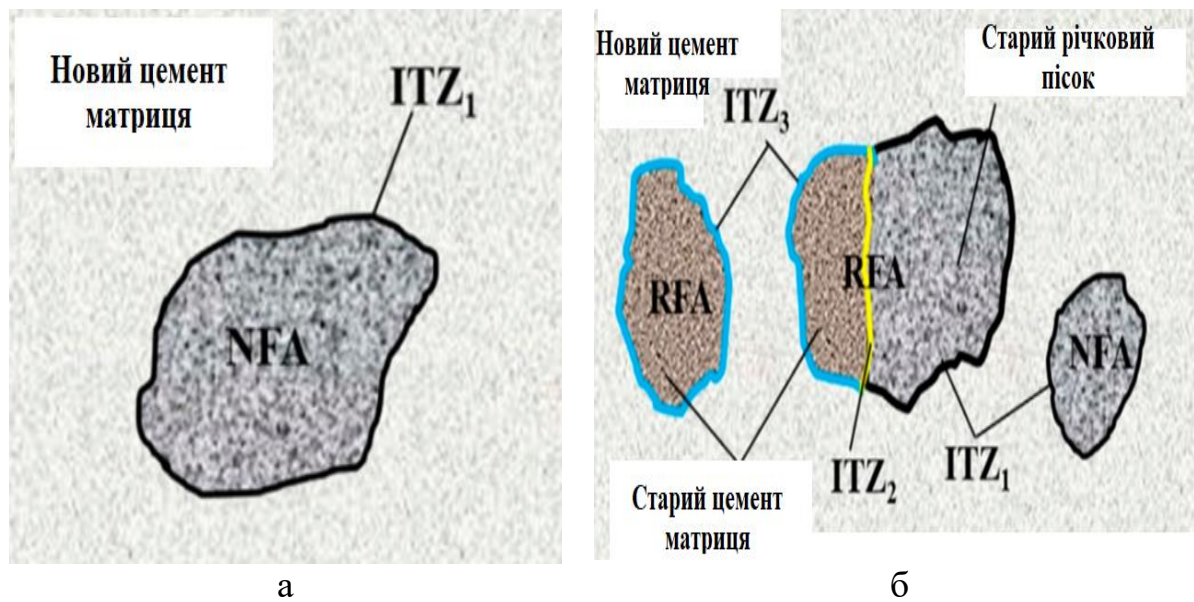


Рисунок 4.11 – Контактна зона бетону на основі: а – природного заповнювача; б – заповнювача рециклінгу бетону

Підвищення зчеплення елементів структури бетону може досягатися за рахунок ущільнення цементного каменю шляхом застосування активної пуцоланової добавки «зола-виносення - мікрокремнезем» в комплексі з суперпластифікаторами полікарбоксилатного типу. Як видно з даних кількісного рентгенофазового аналізу (рис. 4.12), на дифрактограмі фіксуються фази кварцу – 44,3%, кальцію карбонату – 11,1%, а також гідратні фази еtringіту - 7,4 %, портландиту - 7,6 % та гідрокарбоалюмінату – 1,1%.

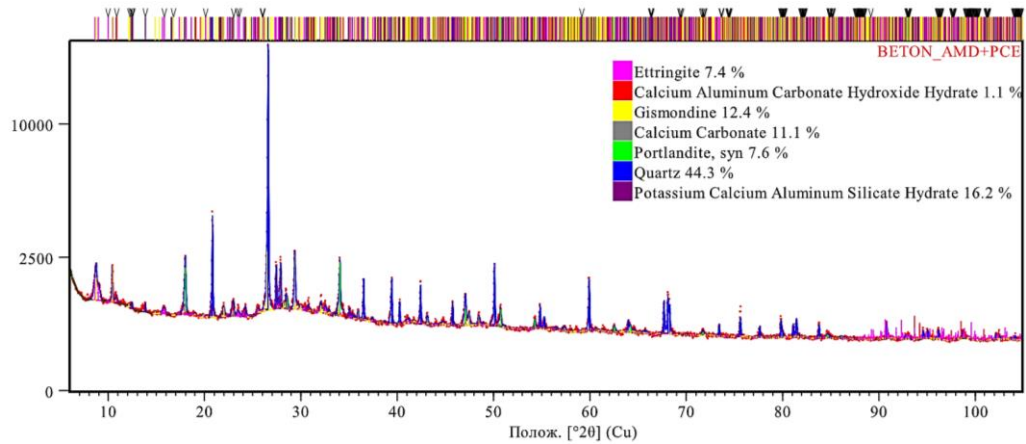


Рисунок 4.12 – Дифрактограма цементуючої матриці бетону, модифікованого АПД+РСЕ

Слід зазначити, що мікрокремнезем заповнює міжчастковий простір золи-винесення, створюючи щільну ультрамікроструктуру цементуючої матриці та зміцнюючи контактну зону на межі заповнювач рециклінгу бетону – «нова» цементуюча матриця, що сприяє стабілізації бетонної суміш. Структура еко-ефективного бетону, модифікованого АПД+РСЕ, показана на рис. 4.13.

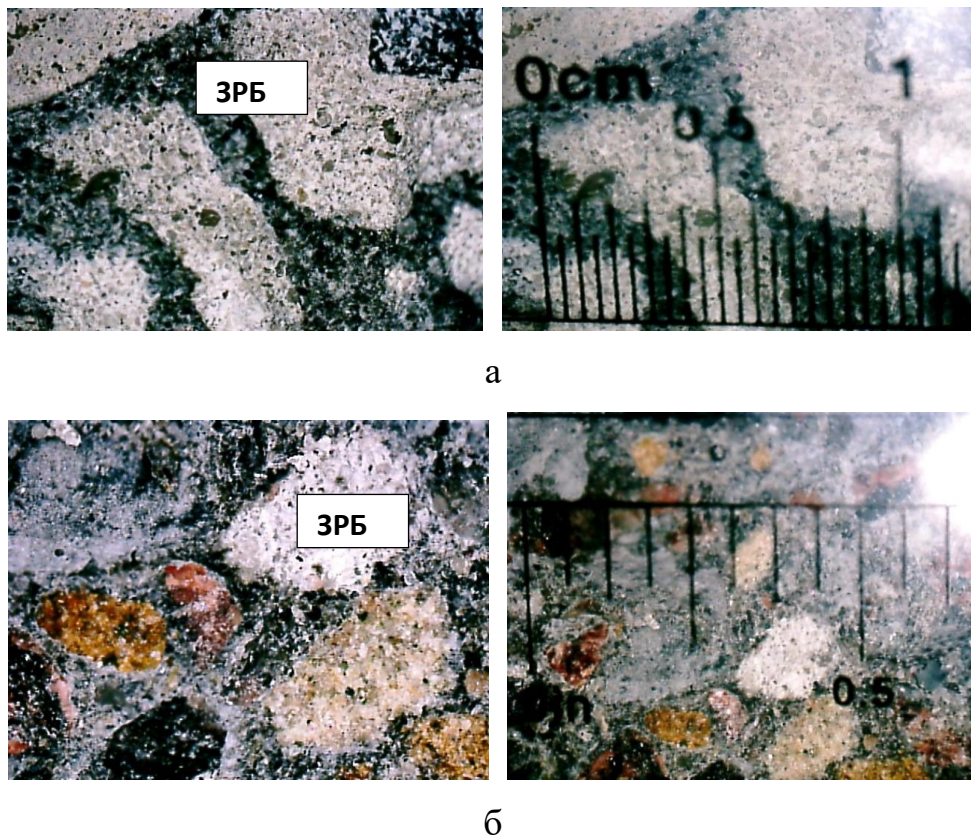


Рисунок 4.13 – Фотографії структури модифікованого бетону, модифікованого АПД+РСЕ

Результати свідчать, що введення високодисперсної АПД забезпечує рівномірний перебіг гідратаційних процесів і пуцоланової реакції на усіх структурних рівнях цементуючої матриці, що дозволяє значно підвищити якість структури та експлуатаційні властивості бетону.

4.4. Будівельно-технічні властивості модифікованих бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону

Найбільш повні сучасні можливості технології будівельних матеріалів отримали при створенні та виробництві високоякісних і високотехнологічних бетонів. Можливість широкого використання товарного бетону в технології будівництва в значній мірі визначається технологічними властивостями бетонної суміші та будівельно-технічними властивостями бетону. Розроблено еко-ефективні модифіковані бетони на основі заповнювачів рециклінгу бетону (табл. 4.7) та досліджено їхні будівельно-технічні властивості.

Таблиця 4.7

Склади модифікованих бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону

Витрата матеріалів на 1 м ³ бетонної суміші		
Матеріали	Склад №1	Склад №2
Портландцемент, кг	350	350
Пісок (Мк=1,3), кг	600	600
Щебінь (2-4 мм), кг	300	320
Щебінь (4-16 мм), кг	450	-
ЗРБ (2-16 мм), кг	450	900
АПД (ЗВ+МК), кг	100	100
Вода, л	140	160
РСЕ-4, %	1,5	1,5

Рухомість і збереженість властивостей у часі. Дослідженнями встановлено, що для модифікованих бетонних сумішей для складу 1 (Щ_{гр4-16} : ЗБР₂₋₁₆=50 : 50) і складу 2 (Щ_{гр4-16} : ЗБР₂₋₁₆=0 : 100) осадка конуса досягає 190 і

200 мм при $V/C=0,40$ і $V/C=0,45$ відповідно, що відповідає марці за легкоукладальністю Р4 (рис. 4.14, а).

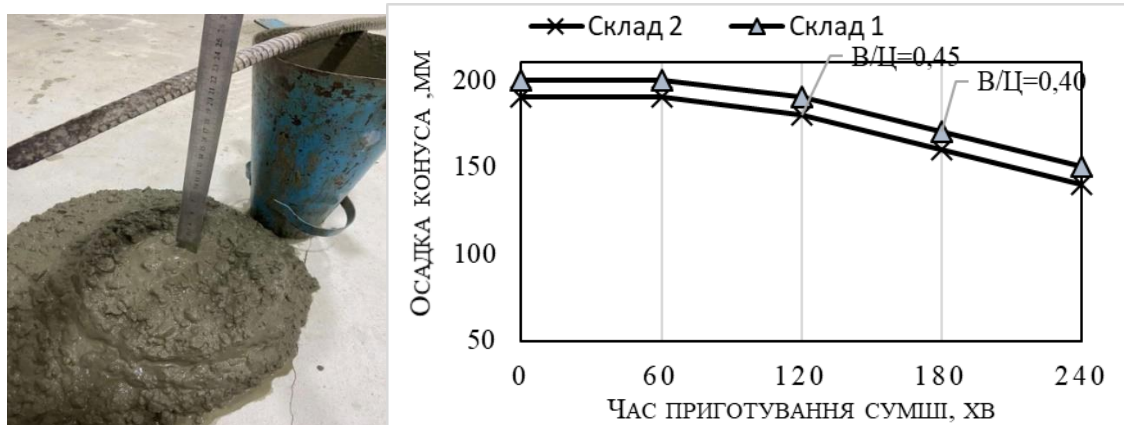


Рис. 4.14. Осадка конуса (а) та збереженість властивостей у часі (б) модифікованих бетонних сумішей

Для бетонної суміші, модифікованої РСЕ-4 на основі модифікованих акрилових полімерів осадка конуса починає втрачатися через 90 хв - для складу 1, і 80 хв – для складу №2 (згідно з ДСТУ Б В.2.7-96-2000, максимальна допустима тривалість транспортування бетонної суміші для марки за легкоукладальністю Р4 складає 90 хв). Встановлено, що повітрявміст для модифікованих бетонних сумішей складу №1 і №2 складає відповідно 3,0 і 3,2%.

Важливою характеристикою бетонних сумішей в умовах монолітного бетонування є її однорідність та стійкість до розшаровування. Для високорухливих товарних сумішей (марка за легкоукладальністю Р4) для складу №1 водовідділення не спостерігається, а розчинівідділення складає 0,2%, а для складу №2, дані показники складають 0,4% і 1,0% відповідно, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-96-2000 (водовідділення не більше 0,8 %, а розчинівідділення – 4,0 %).

Міцність. Результатами експериментальних випробувань модифікованих еко-ефективних бетонів встановлено, що для складу №1 ($\text{Щ}_{\text{ГР4-16}} : \text{ЗБР}_{2-16}=50 : 50$) границя міцності на стиск через 1; 3; 7 і 28 діб складає 24,7; 44,6; 63,9 і 78,7 МПа відповідно; при цьому забезпечується клас міцності С50/60, що дозволяє такі бетони класифікувати як високоміцні.

Таблиця 4.8

Фізико-механічні властивості модифікованих еко-ефективних бетонів

Склади бетону	В/Ц	ОК, см	$\rho_{\text{сум.}}$, кг/м ³	$V_{\text{п.}}$, %	Границя міцності на стиск, МПа, у віці, діб				
					1	2	7	28	90
Склад №1	0,40	19,0	2400	3,0	24,7	39,6	63,9	78,7	85,9
Склад №2	0,45	20,0	2380	3,2	19,3	34,8	54,7	70,5	79,2

Як видно з табл. 4.8, при заміні гранітного щебеню фр. 4-16 мм на заповнювач рециклінгу бетону (склад 2, $\text{Щ}_{\text{гр4-16}} : \text{ЗБР}_{2-16}=0 : 100$) міцність знижується у всі терміни тверднення; в той же час, такий еко-ефективний модифікований бетон відповідає класу міцності С45/55.

Водопоглинання та пористість. Характер пористості має особливо важливе значення при формуванні експлуатаційних властивостей бетонів (табл. 4.9). Дослідженнями параметрів пористої структури бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону, визначених за кінетикою водопоглинання (ДСТУ Б В 2.7-170:2008), показано, що найбільший середній розмір пор ($\lambda_1=3,5$) і найменша однорідність пор за розмірами ($\alpha=0,36$) характерна для бетону з використанням 100% ЗРБ. Для складу №1 із застосуванням $\text{Щ}_{\text{гр4-16}} : \text{ЗБР}_{2-16}=50 : 50$ забезпечується одержання більш однорідної мікроструктури модифікованої цементуючої матриці, про що свідчить зменшення середнього розміру пор в 1,75 рази та одержання більш рівномірних розмірів пор ($\alpha=0,45$).

Таблиця 4.9

Показники водопоглинання та пористості модифікованого бетону

Склад бетону	ρ_c , кг/м ³	Водопоглинання, %		Середній розмір пор, λ_1	Однорідність пор за розмірами, α
		W_m	W_v		
Склад №1	2400	1,90	2,88	2,0	0,45
Склад №2	2380	2,42	4,21	3,5	0,36

Як видно з мікрофотографії (рис. 4.15), модифікований бетон складу 1 ($\text{Щ}_{\text{гр}4-16} : \text{ЗБР}_{2-16}=50 : 50$), що тверднув 28 діб, характеризується щільною мікроструктурою, яку кольматує активна пуцоланова добавка «зола-винесення - мікрокремнезем». Утворення гідросилікатів кальцію ущільнюють контакт та підвищують міцність зчеплення між поверхнею заповнювача і цементуючою матрицею (рис. 4.15, а, б). Продукти гідратації модифікованої цементуючої матриці наростають на зернах заповнювача, створюючи монолітну структуру та міцну контактну зону з мінімальною кількістю пор та пустот, що визначає підвищені показники міцності та довговічність бетону.

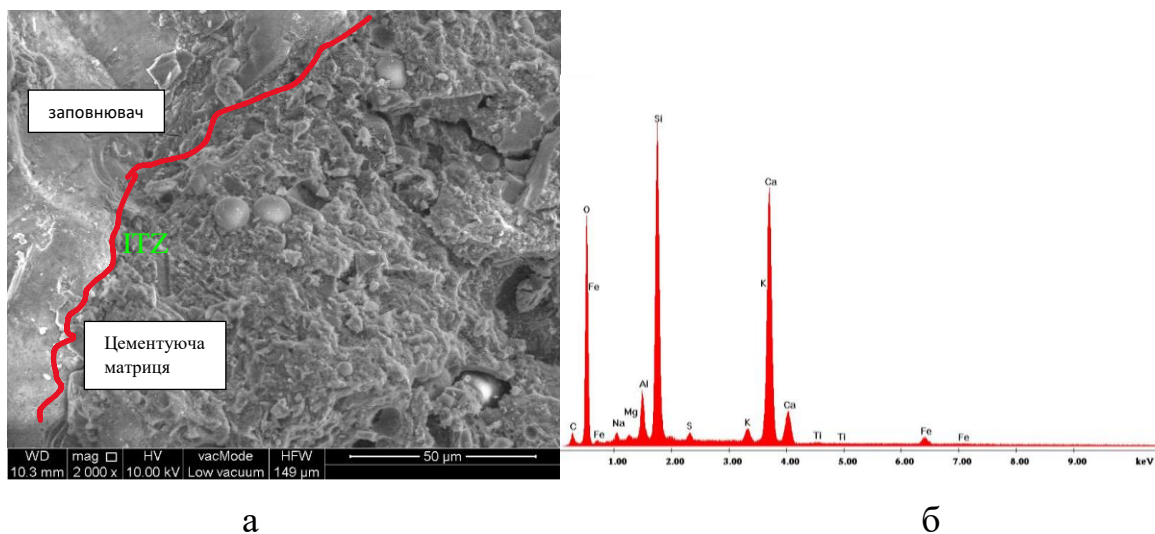


Рисунок - 4.15. Мікроструктура модифікованої матриці бетону через 28 діб тверднення

Деформативні властивості та тріщиностійкість. Призмову міцність визначали випробуванням зразків-призм $100 \times 100 \times 400$ мм. Визначення модуля пружності та призмової міцності модифікованого бетону згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2009 наведено на рис. 4.14. Як видно з табл. 4.8, для еко-ефективного бетону (склад №1), призмова міцність становить $f_{\text{cm, prism}}=59,5$ МПа, розрахункове значення модуля пружності складає $E_{\text{cd}}=46,5$ ГПа. При заміні гранітного щебеню фр. 4-16 мм на заповнювач рециклінгу бетону (склад №2, $\text{Щ}_{\text{гр}4-16} : \text{ЗБР}_{2-16}=0 : 100$) показники призмової міцності і модуля пружності знижуються і становлять відповідно $f_{\text{cm, prism}}=48,2$ МПа та $E_{\text{cd}}=37,9$ ГПа.

Таблиця 4.10

Показники міцності та деформативності модифікованих бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону

Клас бетону	Кубикова міцність, $f_{cm, cube}$ МПа	Призмova міцність, $f_{cm, prism}$ МПа	Модуль пружності, $E_{cd} \cdot 10^{-3}$, МПа	Коефіцієнт Пуассона, ν
C50/60	78,7	59,5	46,5	0,17
C45/55	70,5	48,2	37,9	0,16



Рисунок 4.16 – Випробування бетонів на основі ЗРБ: а – визначення модуля пружності; б – визначення призмovoї міцності

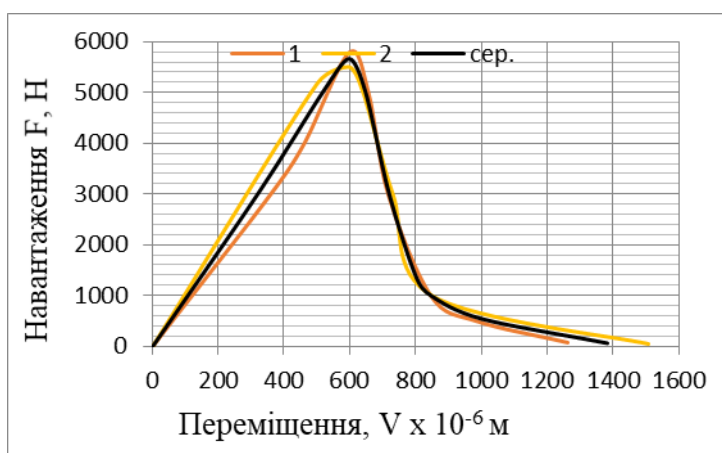
Процеси деформування та руйнування еко-ефективних бетонів розглядали в контексті поліструктурної теорії. Методами лінійної механіки руйнування згідно методики С.Й. Солодкого [47] досліджені процеси деформування та руйнування модифікованих бетонів з використанням установки, яка забезпечує контрольований режим руху тріщин. Аналізом результатів силових і енергетичних характеристик тріщиностійкості (табл. 4.11) Встановлено, що для еко-ефективних високоміцних бетонів на основі ЗРБ

(склад 1), показники питомих і загальних питомих ефективних витрат енергії на статичне руйнування до моменту початку руху тріщини становлять 287 і 404 Дж/м² відповідно при в'язкості руйнування $K_i=0,95 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Це узгоджується з конфігурацією спадної вітки діаграми (рис. 4.17, а). В той же час, модифікований бетон (склад 2) характеризується нижчими значеннями тріщиностійкості ($G_i=192 \text{ Дж/м}^2$, $K_i=0,65 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$), що відповідає діаграмі (рис. 4.17, б). Це свідчить, що повне заміщення гранітного щебеню на ЗРБ не забезпечує необхідних вимог щодо експлуатаційної надійності еко-ефективних бетонів.

Таблиця 4.11

Силві та енергетичні характеристики тріщиностійкості
еко-ефективних бетонів на основі ЗРБ

Складу бетону	G_i , Дж/м ²	G_l , Дж/м ²	G_F , Дж/м ²	G_{CE} , Дж/м ²	J_i , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	K_c , МПа·м ^{1/2}
Склад 1	287	18	404	11	175	0,95	0,19
Склад 2	192	9	276	8	122	0,65	0,17



а



б

Рисунок 4.17 - Повністю рівноважна діаграма деформування модифікованого бетону (склад 1)

Морозостійкість і водонепроникність. Морозостійкість модифікованих бетонів визначали за прискореною методикою згідно з ДСТУ Б В.2.7-49-96. Встановлено, що зразки бетону (зразки-куби 100x100x100 мм) складу №1 витримують 300 циклів поперемінного заморожування-відтавання у 5 % водному розчині натрію хлориду при втраті міцності до 5% та маси до 3%; при цьому досягається марка за морозостійкістю F300.

Показник водонепроникності еко-ефективних бетонів визначено згідно з EN 12390-8 методом глибинного проникнення води під тиском. Встановлено, що для складу №1 забезпечується водонепроникність W12 (глибина проникнення води під тиском змінювалася 25, 27, 22 мм; для складу №2, глибина проникнення води для зразків збільшилася до 68, 70, 68 мм, що забезпечує марку за водонепроникністю W10 (табл. 4.12).



а



б

Рисунок 4.18 – Зразки бетону на основі заповнювачів рециклінгу після випробування на водонепроникність згідно EN 12390-8:

а – склад №1, б – склад №2

Таблиця 4.12

Показники водонепроникності згідно EN 12390-8

Опис зразків, розмір, мм	Показник	Результат випробувань	
		Склад №1	Склад №2
куб 150x150x150 куб 150x150x150 куб 150x150x150	Глибина проникнення води під тиском, мм	25	48
		27	50
		22	58
	Марка за водонепрони- кністю (розрахункова)	W 12	W 10

Під час визначення глибини карбонізації встановлено, що для еко-ефективного бетону складу №1 і №2 цей показник становить 1,5 і 2,5 мм, (рис. 4.19, а, б).

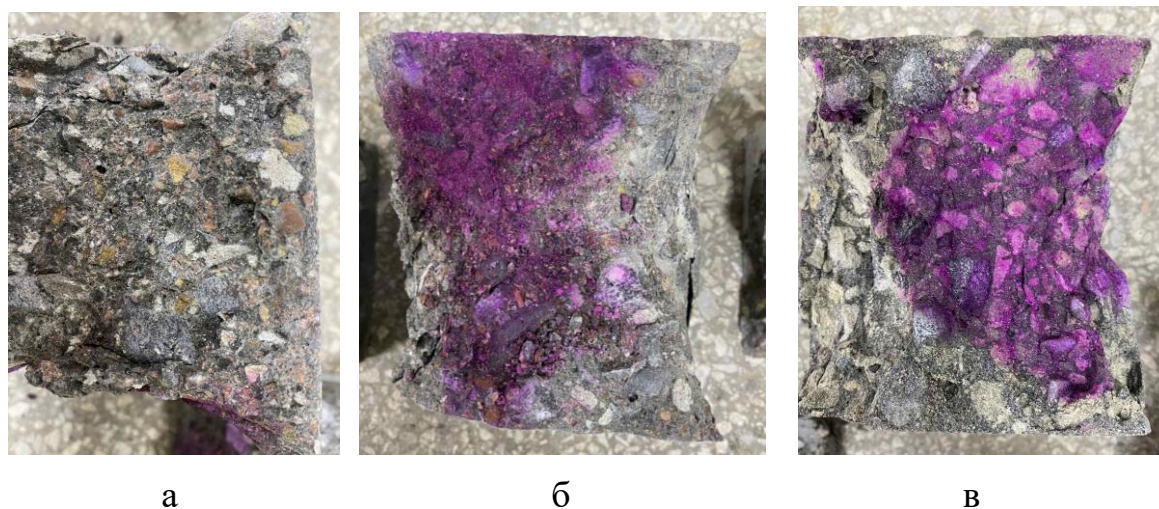


Рисунок 4.19 – Поверхня свіжого сколу бетонних кубів при визначенні глибини карбонізації бетонів на основі заповнювачів рециклінгу: а – зразок перед випробуванням, б – склад №1, б – склад №2

Показники будівельно-технічних і експлуатаційних властивостей модифікованих еко-ефективних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону наведені в табл. 4.13.

Таблиця 4.13

Показники якості еко-бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону

Показники	Одиниці вимірювання	Значення показника для бетонів	
		Склад 1	Склад 2
В/Ц		0,40	0,45
Середня густина бетонної суміші, ρ	кг/м ³	2400	2380
Повітровміст суміші бетонної у неущільненому стані	%	2,8	3,0
Осадка конуса	см	18	19,5
Міцність на стиск f_{cm} , у віці, діб	МПа		
2		39,6	35,8
7		63,9	54,7
28		78,7	70,5
Оцінка питомої міцності, f_{cm2}/f_{cm28}		0,50	0,50
Модуль пружності, $E \cdot 10^{-3}$	МПа	46,5	37,9
Призмova міцність, $f_{cm, prism}$	МПа	59,4	48,2
Коефіцієнт Пуассона, ν		0,17	0,16
Водопоглинання	%	2,88	4,21
Водонепроникність		W12	W10
Морозостійкість, марка F		F300	F200

Таким чином, еко-ефективні бетони характеризуються підвищеною рухливістю, однорідністю бетонної суміші, високою міцністю, покращеними деформативними властивостями, щільністю, що в кінцевому результаті сприяє їх довговічності та дозволяє розширити область їх використання в будівництві.

Висновки до розділу

1. Розроблено наукові положення щодо створення раціонального складу еко-ефективних високоміцних бетонів шляхом багаторівневого збалансованого однорідного розподілу компонентів за геометричними розмірами та однорідним розподілом частинок твердої фази на різних структурних рівнях, що дозволяє отримати максимально щільну та міцну його структуру. Редукування водовмісту синтезованої високодисперсної цементуючої системи забезпечується багатоконпонентним органо-мінеральним модифікатором синергетичної дії, що складається з високодисперсної активної пуцоланової добавки та суперпластифікаторів на основі полікарбоксилатних ефірів різних типів.

2. Отримано математичні моделі міцності та оптимізовано гранулометричний склад заповнювачів в залежності від вмісту гранітного щебеню та заповнювачів рециклінгу бетону і полікарбоксилатного суперпластифікатора. Для підвищення ефективності дії СП в бетонні суміші введено дисперсну фазу у вигляді активної пуцоланової добавки «зола-винесення - мікрокремнезем» з питомою поверхнею $S_p = 5800 \text{ см}^2/\text{г}$.

3. Встановлено, що рівномірне проходження пуцоланової реакції компонентів на різних структурних рівнях забезпечується застосуванням портландцементу з вапняком дисперсністю $4200 \text{ см}^2/\text{г}$, високодисперсною активною пуцолановою добавкою «зола-винесення - мікрокремнезем». Структура цементуючої матриці модифікованого бетону, що визначає його високу міцність, є дрібнодисперсна із значно меншим вмістом портландиту і вищою кількістю - низькоосновних гідросилікатів кальцію, при цьому зростає концентрацією твердої фази в одиниці об'єму.

4. Багаторівневе модифікування мікроструктури високоміцних бетонів комплексними добавками на основі високодисперсної АПД «зола-винесення - мікрокремнезем» і високоефективного полікарбоксилатного суперпластифікатора на основі акрилових полімерів забезпечує максимально щільну, з високим ступенем упорядкованості упакування частинок,

цементуючу матрицю та адгезійну міцність на межі зерен «старого цементу» і «нової» цементуючої матриці.

5. Розроблено еко-ефективні бетони на основі заповнювачів рециклінгу бетону з максимальними показниками технологічності, щільності, міцності та довговічності, що визначають підвищені експлуатаційні характеристики (марка за водонепроникністю W12, марка за морозостійкістю F300). Створення безперервного дисперсно-гранулометричного складу частинок і зерен твердої фази, при якому кожна наступна більш тонкодисперсна фракція повинна в оптимальній кількості з максимальним заповненням міжзернових пустот дозволяє максимально ущільнити структуру і зробити її більш однорідною, що забезпечує підвищені експлуатаційні властивості еко-ефективних бетонів.

РОЗДІЛ 5. ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ БЕТОНІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ЗАПОВНЮВАЧІВ РЕЦИКЛІНГУ БЕТОНУ

5.1. Дослідно-промислова апробація бетонів з використанням заповнювачів рециклінгу бетону

Будівельна індустрія - найважливіша галузь народного господарства, яка характеризується значними масштабами використання сировинних матеріалів і виробництва виробів різного призначення, високим ступенем механізації та автоматизації виробничих процесів [9, 11, 43]. Усі технологічні етапи включають різноманітні механізми та устаткування, ефективна експлуатація яких взаємозалежна з властивостями сировини, що переробляється, напівфабрикатів та їхньою зміною під дією механічних, теплових та інших видів впливів під час добування, транспортування, подрібнення, змішування, формування. Широкий діапазон властивостей бетону обумовлений його складом, властивостями вихідних матеріалів, технологією приготування та укладання бетонної суміші в конструкцію, умовами ущільнення та тверднення. Технологічні властивості бетонної суміші мають велике значення для технології зведення бетонних і залізобетонних конструкцій у монолітному будівництві, тому що визначають умови формування та їхню кінцеву якість.

Сучасний стрімкий розвиток будівельної галузі спрямований на розроблення нових, економічно вигідних і ефективних складів товарного бетону на основі заповнювачів рециклінгу бетону, що дозволяє вирішувати проблему з відходами будівельної промисловості, які впливають також на екологічні аспекти.

З метою зниження собівартості товарного бетону в роботі було замінено 50 % щебеню гранітного (фр. 5-20 мм) на заповнювачі рециклінгу бетону (фр.

5-20 мм). Технологія виготовлення товарних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону не відрізняється від стандартної технологічної схеми (рис. 5.1).

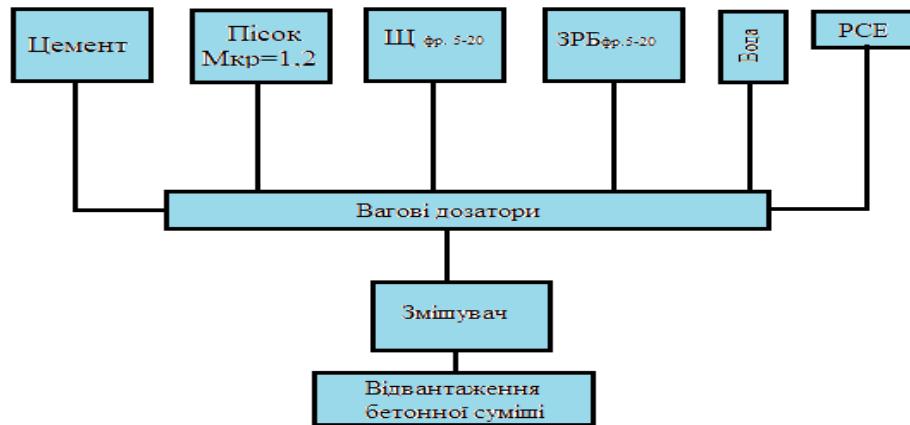
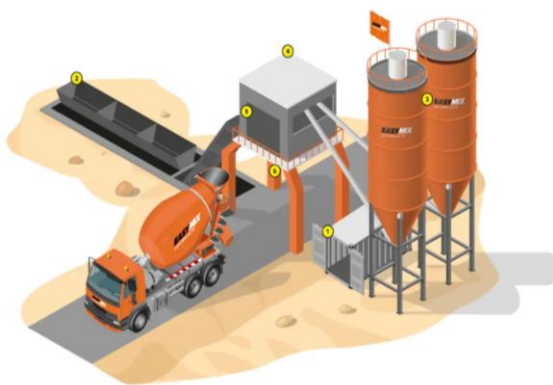


Рисунок 5.1 – Технологічна схема виготовлення товарного бетону на основі заповнювачів рециклінгу бетону

Дана технологія передбачає дозування та подавання матеріалів у змішувач (рис. 5.2. а), в тому числі заповнювача на основі рециклінгу бетону (фр. 5-20 мм), який завантажують в окремий бункер і дозують у відсотковому співвідношенні відносно природного заповнювача ($\text{Щ}_{\text{гр}} : \text{ЗРБ} = 50 : 50$). Блок-схема ТЗОВ «Бетонікс» наведена на рис. 5.2, б.



а



б

Рисунок 5.2 – Технологічна схема (а) та блок-схема ТЗОВ «Бетонікс» (б) виготовлення товарного бетону на основі заповнювачів рециклінгу бетону

На підприємстві ТзОВ «Бетонікс» виготовлено товарний бетон на основі заповнювачів рециклінгу бетону для влаштування монолітного залізобетонного перекриття (плита перекриття $a \times b \times c = 25 \times 7 \times 0,2$ м) третього поверху житлового багатоквартирного будинку у кількості 35 м^3 (Додаток Б). Бетонування проводилось БК «Вікінг» під час зведення житлового багатоквартирного будинку (м. Львів, вул. Миколи Пимоненка, 1).

Для одержання товарного бетону використано портландцемент СЕМ ІІ/А-LL 42,5R ДСТУ Б EN 197-1 ($\rho = 350 \text{ кг/м}^3$), кварцовий пісок ($M_k = 1,2$) Давидівського родовища Львівської обл., гранітний щебінь фракції 5-20 мм Рокитнянського спецкар'єру ТОВ «РКДЗ» Київської обл., відходи рециклінгу власного бетону (ЗРБ) фракції 5-20 мм ТзОВ «Бетонікс», м. Львів. Для проектування товарного бетону класу міцності С25/30 застосовано крупний заповнювач у відсотковому співвідношенні «щебінь гранітний : відходи рециклінгу = 50 : 50». Для забезпечення необхідної рухливості бетонної суміші та її збереження в часі вводили полікарбосилатні суперпластифікатори на різній полімерній основі. Бетонну суміш одержували шляхом одночасного змішування основних компонентів: портландцемент з вапняком СЕМ ІІ/А-LL 42,5 NR, пісок кварцовий з $M_k = 1,3$, щебінь гранітний (фр. 5-20 мм), ЗРБ (фр. 5-20 мм), полікарбосилатний суперпластифікатор РСЕ-4 та вода.

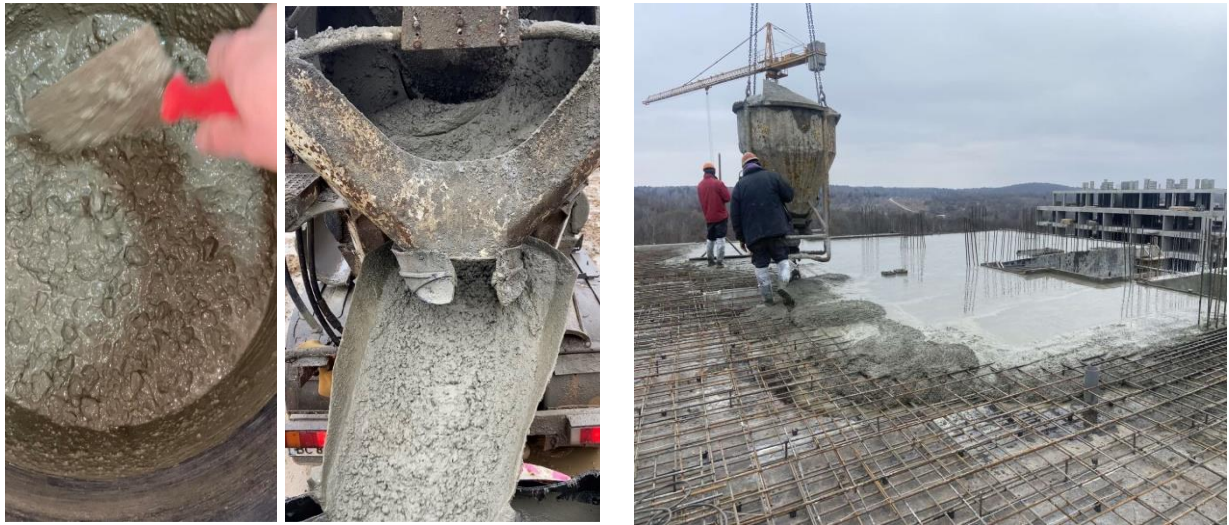
Таблиця 5.1

Показники якості товарного бетону на основі заповнювачів рециклінгу бетону

Марка за осадкою конуса	Середня густина кг/м^3	Термін придатності бетонної суміші, год	Повітро-вміст, %	Марка за водо не-проникн і-стю	Міцність на стиск, МПа, у віці, діб			Клас бетону
					2	7	28	
S4	2380	2,5	3,0	W8	19,4	27,8	39,7	C25/30

Бетонна суміш, яка поступила на будівельний майданчик, мала наступні характеристики: марка за осадкою конуса S4 ($OK = 20 \text{ см}$); об'єм втягнутого

повітря - 3,0%; збереження необхідної рухливості протягом 2,5 год з моменту її приготування на бетонному заводі; водовідділення менше 0,2% .



а

б

Рисунок 5.3 – Товарна бетонна суміш на основі заповнювачів рециклінгу бетону (а) та влаштування монолітного залізобетонного перекриття (б)

Бетонну суміш з використанням на основі заповнювачів рециклінгу бетону подавали автобетононасосом. Товарний бетон з відходами рециклінгу бетону виготовлено з урахуванням вимог, які встановлені до вартості та довговічності порівняно зі звичайним бетоном, що дозволяє зробити позитивний внесок в економічний та екологічний цикли міського господарства.

На підприємстві Beton Racio (Словаччина, м. Трнава) отримано практичний досвід під час навчання «Betón na báze recyklovaného kameniva» та в процесі влаштування влаштування подушки під фундамент товарного бетону на основі RCA фр. 8-16 мм (завод виробник бетону LADCE Betón) (Додаток Г). Товарний бетон характеризувався маркою за осадкою конуса S4 та класом за міцністю C30/37. Застосування RCA-Beton проведено відповідно до SN EN 206-1 (зазвичай для цивільного будівництва).

Подрібнення та сортування заповнювачів рециклінгу бетону RCA-Beton відбувається безпосередньо на будівельному майданчику з використанням мобільної дробильно-сортувальною установкою Nordtrack, технічні характеристики якої наведено в табл. 5.2. Мобільна дробильно-сортувальна

установка Nordtrack (рис. 5.4, а) призначена для первинної переробки та підготовки RCA.

Таблиця 5.2

Технічні характеристики мобільної дробильно-сортувальної установки
Nordtrack

Параметри	Дробарка
Отвір для подавання відходів	1270 x 735 мм (50 x 29 дюймів)
Двигун	Рівень 3 LRC: CAT C9 261 кВт / Етап ШВ: CAT C9.3 CSE 275 кВт / Рівень 4F / Етап V: CAT C9.3B 261 кВт
Вага	56 500 кг (124 600 фунтів)
Транспортна ширина	3000 мм (9 '10 ")
Транспортна висота	3600 мм (11 '8,8 ")
Транспортна довжина	15 500 мм (50 '8 ")
Продуктивність	20 т. в год.
Включено в базову конфігурацію	Пульт дистанційного керування, система розпилення води, пилезахисний ковпачок на головному конвеєрі, бічний конвеєр
	Магнітний сепаратор

Після подрібнення відходів заповнювач RCA просіюється та сортується за фракціями 0-4, 4-8, 8-16, 16-32, 32-63 мм (рис. 5.4, б, в). Вміст заповнювачів RCA підбирається залежно від запроєктованого складу та класу міцності бетону, фізико-механічних характеристик RCA, наданих лабораторією з наступним їх використанням для виготовлення і реалізацією на об'єкті (рис. 5.4, д, е).



а



б



в



г



д



е

Рисунок 5.4 – Мобільна дробильно-сортувальна установка Nordtrack (а); просіювання на фракції і сортування (б, в); бетонний завод (г); влаштування подушки під фундамент (д, е)

5.2. Техніко-економічні показники бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону

Використання відходів бетону як альтернативного джерела заповнювачів для виготовлення «нового» конструкційного бетону визначає економічні та екологічні перспективи в практиці будівельного виробництва. В умовах зростання собівартості виробництва пріоритетним напрямком є відновлення та збереження, як ресурсів на зведення будівель, так і ресурсів на відновлення будівельних конструкцій. Виробництво бетонів з використанням заповнювачів рециклінгу бетону, є важливим напрямком розвитку будівельної галузі.

Техніко-економічне порівняння ефективності виконувались з врахуванням вартості переробки бетонних залишків будівельних конструкцій у заповнювачі для бетонних сумішей з використанням мобільної дробильної установки та допоміжних механізмів. Розрахована собівартість склала 177,8 грн/т або 249,8 грн/м³, що корелює з відпускними цінами на аналогічний продукт представлений на ринку України. В умовах ТзОВ «Бетонікс» собівартість виробництва 1 м³ бетонної суміші з використанням заповнювачів рециклінгу бетону складає 1997,00 грн, тоді як для бетонної суміші з використанням щебеню гранітного (фр. 5-20 мм) – 2326,00 (табл. 5.3). Економічний ефект при виготовленні бетонної суміші з використанням ЗРБ складає 329,00 грн/м³.

Ефективність використання мобільної дробильної установки при приготуванні бетонної суміші безпосередньо на будівельному майданчику розраховувалась з допомогою програмного комплексу АВК 5 (3.7.1) на прикладі формування монолітного перекриття з бетону класу С20/25, з врахуванням вартості транспортування заповнювачів в 30 -кілометровій зоні доставки (для міської забудови) та можливості зменшення витрат на вивезення будівельних відходів та залишків будівель.

Таблиця 5.3

Економічне обґрунтування використання бетонів на основі ЗРБ

Матеріали	Ціна, грн./т	Базовий варіант: Щ ₅₋₂₀ (100%)		Новий варіант: Щ ₅₋₂₀ :ЗРБ ₅₋₂₀ =50:50	
		Витрата матеріалів, на 1 м ³	Вартість 1 м ³	Витрата матеріалів, на 1 м ³	Вартість 1 м ³
СЕМ II/A-LL 42.5 NR	3100	350	1 085	350	1 085
Пісок	325	0,42	136,5	0,5	162,5
Щ ₂₋₅	680	0,3	204	-	-
Щ ₅₋₂₀	750	0,97	727	0,62	465
ЗРБ ₅₋₂₀	460(177,8)	-	-	0,62	110
Вода	27 грн/м ³	0,144	3,9	0,175	4,7
Хім. Додатка	32,5 грн/кг	1, 88	170,6	1,97	170,6
Витрати на виготовлення 1 м ³ бетонної суміші	грн	2326,00		1997,00	

На основі отриманих результатів визначено одиничну вартість укладання бетону на основі природних заповнювачів та рециклінгу бетону. Наведені розрахунки (в додатку Д) засвідчують, що використання технології рециклінгу бетону дозволяє отримати економічний ефект у розмірі 971,00 грн на кубометр при вкладанні монолітного перекриття з бетону класу С20/25. Крім того використання бетонів на основі заповнювачі рециклінгу бетону сприяє зменшенню використання природних ресурсів і супутніх екологічних витрат при розробці надр і захороненні відходів.

Висновки до розділу

1. На ТЗОВ «Бетонікс» здійснено випуск дослідної партії товарного бетону на основі заповнювачів рециклінгу бетону для влаштування монолітного залізобетонного перекриття (плита $a \times b \times c = 25 \times 7 \times 0,2$ м)

третього поверху житлового багатоквартирного будинку у кількості 35 м³ (м. Львів, вул. Пимоненка, 1). Товарний бетон характеризувався маркою за осадкою конуса S4 та класом за міцністю C25/30.

2. На підприємстві Beton Racio (Словаччина, м. Трнава) одержано практичний досвід під час навчання «Betón na báze recyklovaného kameniva» з використанням заповнювачів рециклінгу бетону в складах товарних бетонів для монолітного будівництва. Прийнято участь у влаштуванні подушки під фундамент товарного бетону на основі RCA фр. 8-16 мм (завод виробник бетону LADCE Betón). Товарний бетон характеризувався маркою за осадкою конуса S4 та класом за міцністю на стиск C30/37.

3. Показано техніко-економічне обґрунтування виготовлення бетону з використанням заповнювачів рециклінгу бетону. В умовах ТзОВ «Бетонікс» виробнича собівартість 1 м³ бетону на основі заповнювачі рециклінгу бетону (фр. 5-20 мм) порівняно з бетоном на основі щебеню гранітного (фр. 5-20 мм) зменшується на 329,00 грн.

Результати досліджень, що викладені у дисертаційній роботі, опубліковані в роботах [25, 33, 34, 43, 10-3, 104, 121, 125] і додатку А.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість розроблення еко-ефективних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону за рахунок комплексного модифікування полікарбосилатними суперпластифікаторами на різній полімерній основі та змішаними активними пуцолановими добавками різного генезису, що сприяє зниженню капілярно-пористої структури бетону на мікро-, мезо- та макрорівнях та підвищенню експлуатаційних властивостей.

2. Дослідженнями фізичних характеристик заповнювачів встановлено, що середня густиною зерен ЗРБ складає 2400 кг/м^3 , пористість зерен фракції 5-20 мм - 9,3 %, водопоглинання досягає 6,1 %, а для зерен дрібної фракції 0,16-5,0 мм – зростає до 7,8 %. ЗРБ характеризується маркою за подрібнюваністю 800 відповідно до ДСТУ Б В.2.7-75-98. Методом оптичної мікроскопії показано, що на поверхні зерен різних фракцій фіксуються залишки затверділого розчину. Кількісним рентгенофазовим аналізом за Рітвельдом встановлено, що пилоподібна фракція (менше 80 мкм) характеризується вмістом SiO_2 - 21,3 %, CaCO_3 - 35,8 %, крім того фіксуються гідратні фази портландиту та сліди еtringіту, кількість яких складає відповідно 12,2 % і 0,8%.

3. Проведено підбір зернового складу природного піску ($M_k=1,3$) та дрібного заповнювача рециклінгу бетону ($M_k=2,75$) для отримання мінімальної пустотності суміші заповнювачів. Встановлено, що найбільшою насипною густиною ($\rho_n=1450 \text{ кг/м}^3$) і найнижчою пустотністю ($P=36,1\%$) характеризується склад суміші в співвідношенні $P_{M_k1,3}:ЗБР_{M_k2,75}=50:50$ %. Показано, що для дрібнозернистого бетону ($\text{Ц:П}=1:1,94$, $\text{РК}=181-183$ мм) на основі дрібних заповнювачів складу $P_{M_k1,3}:ЗБР_{M_k2,75}=50:50$ % при $\text{В/Ц}=0,45$ міцність через 2 і 28 діб складає відповідно 37,1 і 79,0 МПа. Встановлено, що при введенні полікарбосилатного суперпластифікатора за рахунок водоредукуючого ефекту ($\Delta\text{В/Ц}=40$ %) забезпечується підвищення міцності через 2 і 28 діб відповідно до $R_{ct2}=60,4$ МПа і $R_{ct28}=95,0$ МПа.

4. Доведено ефективність впливу змішаної активної пуцоланової добавки (АПД) «зола-винесення - мікрокремнезем» ($S_{\text{пит}} = 5800 \text{ см}^2/\text{г}$) та полікарбонатного суперпластифікатора на міцність дрібнозернистих бетонів на основі ЗРБ на мезо- та макрорівнях. Встановлено, що введення 5,0 мас. % АПД + 1,0 мас. % РСЕ за рахунок водоредукуючого ефекту $\Delta V/\Omega = 30,6\%$ забезпечує найбільший приріст міцності ($R_{\text{ст1}} = 64,1 \text{ МПа}$, $R_{\text{ст2}} = 82,7 \text{ МПа}$, $R_{\text{ст7}} = 96,1 \text{ МПа}$ і 28 діб $R_{\text{ст2}} = 125,7 \text{ МПа}$) модифікованих бетонів; при введенні АПД «зола-винесення - мікрокремнезем» та РСЕ забезпечується зниження умовної в'язкості в 1,5-2,0 рази з одержанням суперпластифікованої цементуючої системи ($R_{\text{Суттарда}} = 310 \text{ мм}$).

5. Методом рентгенофазового аналізу за Рітвельдом встановлено кількісний вміст основних гідратних фаз цементного каменю (80 мас. % СЕМ П/А-LL 42,5 R + 20 мас. % АПД) через 20 год гідратації (етрингіту - 14,7 %, портландит - 11,2 %). Введення АПД забезпечує зменшення вмісту портландиту на 32%, що підтверджується також даними термогравіметричного аналізу. Методом растрової електронної мікроскопії встановлено, що модифікування цементного каменю АПД + РСЕ сприяє утворенню додаткової кількості гідросилікатів типу С-S-H(I).

6. Запроектовано склади еко-ефективних бетонів з використанням заповнювачів рециклінгу бетону (марка за осадкою конуса S4) із застосуванням експериментально-статистичного моделювання з параметрами планування: ЗРБ ($X_1 = 0; 50; 100 \text{ мас.}\%$) і РСЕ ($X_2 = 0; 1,5; 3,0 \text{ мас.}\%$). Використання оптимізованого зернового складу заповнювачів та 1,5 мас.% полікарбонатного суперпластифікатора на основі модифікованих акрилових полімерів забезпечує отримання бетонів класу за міцністю С35/45 при витраті портландцементу $350 \text{ кг}/\text{м}^3$; введення 3,0 мас.% РСЕ забезпечує одержання високоміцних бетонів класу міцності С50/60 та С55/67. Згідно з ДСТУ Б EN 206-1, за оцінкою питомої міцності модифіковані бетони характеризується середнім ($f_{\text{cm2}}/f_{\text{cm28}} = 0,37-0,48$) та швидким ($f_{\text{cm2}}/f_{\text{cm28}} = 0,50$) наростанням.

7. Дослідженнями встановлено, що міцність структурних складників модифікованого бетону класу міцності С30/35 змінюється наступним чином: щебінь гранітний – 110 МПа, цементний камінь – 90 МПа, розчинова частина бетонної суміші – 74 МПа, бетон – 50 МПа, тобто міцність бетону є менша в 1,8 рази від цементного каменю та в 1,5 рази від його розчинової частини. Встановлено, що при введенні змішаної активної пуцоланової добавки «зола-винесення - мікрокремнезем» в більшій мірі заповнюється міжчастковий простір з утворенням щільної ультрамікроструктури цементуючої матриці, що сприяє зміцненню контактної зони на межі «заповнювач рециклінгу бетону – «нова» цементуюча матриця», рівномірному перебігу гідратаційних процесів і пуцоланової реакції на усіх структурних рівнях, а в кінцевому результаті дозволяє підвищити експлуатаційні властивості бетону.

8. Розроблені еко-ефективні бетони з використанням оптимізованого гранулометричного складу заповнювачів ($\text{Щ}_{\text{гр4-16}} : \text{ЗБР}_{2-16}=50 : 50$) характеризуються підвищеними технологічними і будівельно-технічними властивостями: збережуваність в часі 2 год (осадка конуса 190 мм), стійкість до розшарування (водовідділення складає 0,2%), клас міцності на стиск С50/60, що дозволяє розроблені бетони класифікувати як високоміцні; при цьому досягаються наступні показники: призмova міцність $f_{\text{cm, prism}}=59,5$ МПа, модуль пружності $E_{\text{cd}}=46,5$ ГПа, в'язкість руйнування $K_i=0,95$ МПа·м^{1/2}, марка за водонепроникністю W12 та марка за морозостійкістю F300.

9. Дослідно-промислово апробацію товарних бетонів, виготовлених ТзОВ «Бетонікс» з використанням заповнювачів рециклінгу бетону, проведено БК «Вікінг» для влаштування монолітного залізобетонного перекриття третього поверху житлового багатоквартирного будинку (м. Львів, вул. Пимоненка, 1) в кількості 35 м³. Результати впровадження підтверджують перспективність використання розроблених еко-ефективних товарних бетонів, економічна ефективність від впровадження складає 329,00 грн на 1 м³ бетонної суміші.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автомонова В.О., Власенко В.В., Зайцева К.О., Кривільова С.П. Рециклінг відходів виробництва та брухту бетонних конструкцій як центральна ланка концепції екологізації заводів ЗБК. Вісник НТУ «ХПІ». 2017. Вип. 48 (1269). С. 16-23.
2. Бабіч М., Рунова Р., Кріпка Л. Європейські стандарти на цемент: практика впровадження. АВЦУ "Укрцемент". Х.: ПП "Юнісофт", 2016. 72 с.
3. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ, 2011. 529 с.
4. Бліхарський З. Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2008. 108 с.
5. Болотских О. Н., Ройтер Г.Г., Циммер У. П. Европейские методы физико-механических испытаний бетона. Берлин, 2017. 199 с.
6. Волинська Є. В. Екобетони на основі шлаколузкого цементу з використанням слюдовмісних побічних продуктів гірничо-добувної промисловості: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.05. Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ. 2018. 23 с.
7. Гев'юк І. М. Мультимодальні композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та модифіковані бетони на їх основі: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.05. Національний університет «Львівська політехніка». Львів. 2018. 21 с.
8. Гончар О.А. Конструкційні бетони, отримані з використанням відходів промисловості. Вісник ОДАБА. 2019. Вип. 76. С. 78-84.
9. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шпилюк П. С. Бетони і будівельні розчини: підручник. Київ: Основа, 2016. 568 с.
10. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язання будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне: НУВГП, 2011. 174 с.

11. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Марчук В. В., Степасюк Ю. О., Скрипник М. М. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини : монографія. Рівне : НУВГП, 2017. 424 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-171:2008. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови. Київ, 2010. 93 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-74-98 Крупні заповнювачі природні, з відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Класифікація.
14. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 Настанова щодо визначення складу важкого бетону, дата початку дії 01.07.2014.
15. ДСТУ 9171:2021 Настанова щодо забезпечення збалансованого використання природних ресурсів при проектуванні споруд, від 01.08.2022.
16. ДСТУ EN 206:2018 (EN 206:2013, IDT). Бетон. Технічні вимоги, експлуатаційні характеристики, виробництво та критерії відповідності. 2018.
17. ДСТУ Б EN 197-1:2015 (EN 197-1:2011, IDT) Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів. К.: Мінрегіонбуд України, 2016. 53 с.
18. Закон України «Про відходи». Документ 187/98-ВР, редакція від 31.03.2023.
19. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В. Некоторые особенности механизма действия органо–минеральных модификаторов на цементные системы. Сейсмостойкое строительство. 2017. № 1. С. 40–46.
20. Ковальський В. П., Сідлак О. С. Використання золи–виносу ТЕС у будівельних матеріалах // Вісник Сумського національного аграрного університету: Серія «Будівництво». 2014. Вип. 10 (18). С. 44–47.
21. Кривенко П. В., Пушкарева Е. К., Гоц В. И., Ковальчук Г. Ю. Цементы и бетоны на основе топливных зол и шлаков: монография. Киев: изд-во ООО «ИПК Экспресс-Полиграф», 2012. 258 с.
22. Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Кочевих М.О. Заповнювачі для бетону. 2001 К.: ФАДА, ЛТД – 339 с.

23. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Дудник Л. В. та ін. Порівняння міцності і довговічності бетонів на сульфатостійкому портландцементі ССПЦ 400-Д0 та портландцементі з добавкою пуцолани ПЦ II/A-П-500Р-Н. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2019. № 75. С. 91–98.

24. Кропивницька Т. П. Концепція еко-ефективних наномодифікованих лужноактивованих композиційних цементів з високою ранньою міцністю. Вісник Національного університету "Львівська політехніка" : Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 99–107

25. Кропивницька Т.П., Саницький М.А., Камінський А.Т., Гев'юк І.М., Рихліцька О.В. Патент на винахід № 125923 Модифікована ремонтна композиція; заявн. Національний університет "Львівська політехніка". а202102421; заявл. 06.05.2021; опубл. 06.07.2022; 27.

26. Марущак У. Д., Русин Б. Г., Мазурак Т. А., Олевич Ю. В. Швидкотверднучі бетони на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними добавками. Будівельні матеріали і вироби. 2015. № 3. С. 36–39.

27. Морковська Н.М., Ахмед А. Переробка будівельних відходів, що утворюються в Україні. Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна. 2019. С. 210-214.

28. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Перевірка відповідності гранулометричного складу дорожніх цементобетонних сумішей. Вісник ХНАДУ, 2019. Вип. 86, Т. II. С. 53-62.

29. Пащенко А. А., Мясникова Е. А., Саницкий М. А. и др. Теория цемента : под ред. А. А. Пащенко. К.: Будівельник, 1991. 169 с.

30. Пушкарьова К.К. Порівняльний аналіз української, німецької та європейської нормативної бази щодо оцінки якості заповнювачів для розчинів та бетонів. Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка, 2013. № 49. С. 124-132.

31. Плугин А. Н., Плугин А. А. та ін. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов. Київ, 2011. (1). 333 с.

32. Постанова від 27.09.2022 № 1073 Про затвердження Порядку поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України.

33. Рихліцька О.В., Кропивницька Т.П., Кагарлицький Р.Р. Модифіковані клінкер-ефективні бетони на основі екоцементів. 6-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування». 2021. С.129.

34. Рихліцька О.В. Еко-ефективні бетони з використанням заповнювачів рециклінгу будівельних відходів. Енергоефективне місто. XXI століття: матеріали науково-практичної конференції, 10-11 листопада 2022 р., Одеса. 2022. С.42–44.

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

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

37. Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. В'язучі речовини: підручник. К.: Основа. 2012. 448 с.

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

39. Русин Б.Г. Формування мезоструктури високофункціональних дрібнозернистих бетонів з високою міцністю у ранньому віці. Вісник НУ „Львівська політехніка”. „Теорія і практика будівництва”. Львів, 2011. № 697. С. 211-215.

40. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи і бетони: монографія. Львів: Видавництво ТОВ «Простір-М», 2021. 206 с.
41. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі портландцементи з добавкою вапняку. Будівельні матеріали та вироби. 2019. № 1-2 (100). С. 18–23.
42. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Іващишин Г.С., Русин Б.Г. Концепція низьковуглецевого розвитку в цементній промисловості. Будівельні матеріали та вироби. 2017. № 5-6. С. 24–27.
43. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Рихліцька О.В., Яніцький О. Швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. 2020. Вип. 38. С. 258–266.
44. Саницький М.А., Марущак У.Д., Позняк О.Р. Енергоефективні технології в будівництві: навчальний посібник. Львів: Простір-М, 2022. 160 с.
45. Саницький М.А., Соболев Х.С., Марків Т.Є. Модифіковані композиційні цементи. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2010. 132 с.
46. Смалев М.В., Дзюбинська О.В., Шелкович О. Світовий досвід повторного використання бетону в будівельному виробництві. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, Вип. 7, 2017. С. 233-238.
47. Солодкий С.Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2008. 144 с.
48. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 560 с.
49. Толмачов С. М. Дослідження сумісності суперпластифікаторів і цементів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2015. Вип. 31. С. 176–182.
50. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Ніжин : Аспект-Поліграф, 2010. 228 с.

51. 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.
52. Шейніч Л. О., Іонов Д. С., Сопов В. П. Особливості процесів структуроутворення цементного каменю, модифікованого комплексною органо–мінеральною добавкою. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2013. Вип. 52. С. 308–314.
53. 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.
54. Штарк Й., Бернд В. Долговечность бетона : пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. К.: Оранта, 2004. 301 с.
55. Штарк Й. Щелочная коррозия бетона: пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. К., 2010. 166 с.
56. Abdel Hafez R.D., Hadzima-Nyarko M., Ahmed S.M., Tayeh B.A. Recycled Chicken Feather Sand as a Partial Replacement for Natural Sand for Producing Eco-Friendly Mortar. Buildings. 2023. 13. 421.
57. Abhishek V., Krishna M., Shivanshu A., Shivank K., Nitin O., Yash G. Recycled Aggregate from C&D Waste Modified by Dry Processing and Used as A Partial Replacement of Coarse Aggregate in Concrete. Journal of Materials Science & Surface Engineering, 5(7): 671-678.
58. Aïtcin P. C. Supplementary cementitious materials and blended cements. Science and Technology of Concrete Admixtures. 2016. P. 53–73.
59. Aïtcin P. C. The Influence of the Water/Cement Ratio on the Sustainability of Concrete. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 2019. Vol. 5. P. 807-826.
60. Akhtar A., Sarmah A.K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. J. Clean. Prod. 2018, 186, 262–281.

61. Ali B., Qureshi L.A, Baig H.S., Malik S., Din M., Aslam H.M.U. Effect of Molasses and Water–Cement Ratio on Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019. P.1-15.
62. Ali B., Qureshi L.A. Durability of recycled aggregate concrete modified with sugarcane molasses. *Construction and Building Materials*. 2019. 229. P.1-12.
63. Al-Kerttani O.M. and Al-Bawi R. Shrinkage and permeability properties of self – compacting concretes containing recycled coarse and/or fine glass aggregates // *International journal of advanced research*. 2017. № 5. P. 1650-1666.
64. Andrew R. M. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth Syst. Sci. Data*. 2018. № 10. P. 195–217.
65. Antoni Chandra L., Hardjito D. The impact of using fly ash, silica fume and calcium carbonate on the workability and compressive strength of mortar. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 125. P. 773–779.
66. Arvaniti A.C., Yuenger M.C. G., Bernal S.A. et al. Characterization of Particle Size, Surface Area, and Shape of Supplementary Cementitious Materials. *Particulate Science and Technology*. 2014. 32(4). 44 p.
67. Ashrafian A., Hamzehkolaei N.S., Dwijendra A., Ng. K., Yazdani M., An Evolutionary Neuro-Fuzzy-Based Approach to Estimate the Compressive Strength of Eco-Friendly Concrete Containing Recycled Construction Wastes. *Buildings* 2022, 12, 1280.
68. Bedoya M.A., Tobon J.I. Incidence of recycled aggregates and ternary cements on the compressive strength and durability of ecological mortars. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. P. 01192.
69. Biernacki J. J., Bullard J. W., Sant G., Brown K., Glasser F. P., Jones S., Prater T. Cements in the 21st Century: Challenges, Perspectives, and Opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. 42.
70. Blikharsky Z.Y., Sobol K., Markiv T., Selejdak J. Properties of concretes incorporating recycling waste and corrosion susceptibility of reinforcing steel bars. *Materials*. 2021.14, iss. 10.

71. Bost P., Regnier M., Horgnies M. Comparison of the accelerating effect of various additions on the early hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials*. 2016. №113. P. 290–296.
72. Deja J., Gawlicki M., Kohutek Z., Kotwica L., Lagosz A., Mroz R., Pichor W. *Beton. Technologie i metody badan. Stowarzyszenie Producentow Cementu*. Krakow, 2020. 938 s.
73. DIN 4226-100:2002-02. Gesteinskörnungen für Beton und mörtel - Teil 100: Rezyklierte gesteinskörnungen. 2002. P. 29.
74. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Ribakov Y. Heat-resistant ash and slag concrete with activating admixtures. *Revista Romana de Materiale = Romanian Journal of Materials*. 2021. Vol. 51, iss. 1. P. 106–115.
75. Çakır Ö. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. *Construction and building materials*. 2014. № 68. P. 17–25.
76. Cao M., Ming X. Effect of Macro-, Micro- and Nano-Calcium Carbonate on properties of cementitious composites. A Review. *Materials*. 2019. Vol. 12 (781). 20 p.
77. Chung S. Y., Elrahman M. A., Sikora P., Rucinska T., Horszczaruk E., Stephan D. Evaluation of the Effects of Crushed and Expanded Waste Glass Aggregates on the Material Properties of Lightweight Concrete Using Image-Based Approaches. *Materials (Basel)*. 2017. № 10 (12). P. 1354.
78. Cembureau welcomes EU Green Deal: Written by Global Cement staff, 02 February, 2023. <https://www.globalcement.com/news/item/15269-cembureau-welcomes-eu-green-deal>
79. Cementing the European Green Deal. Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050.
80. Collepardi M., Valente M. Recent Developments in Superplasticizers. *The 8th International Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete: Sorrento (Italy)*, 2006, 1, 14.

81. Construction Aggregates Market Size [2023-2030] | Industry Analysis by Share, Trends, Growth and Global Outlook Report. Fortune Business Insights, 2023.
82. Chladzynski S., Garbacik A. Cementy wieloskładnikowe w budownictwie. SPC, Krakow, 2008. 125 s.
83. Felekoğlu B., Tosun K., Baradan B. Compatibility of a polycarboxylate-based superplasticiser with different set-controlling admixtures. *Construction and Building Materials*, 2011. 25(3). P. 1466–1473.
84. Fic S. B. Adhezja i samoorganizacja struktury materialu w tworzeniu konstrukcji. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej. Lublin. 2019. 299 s.
85. Flatt R., Schober I. Superplasticizers and the rheology of concrete. *Understanding the Rheology of Concrete*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2012, P. 144-208.
86. Gamze Erzençin S., Kaya K., Perçin Özkorucuklu S., Özdemir V., Gizem Y. The properties of cement systems superplasticized with methacrylic ester-based polycarboxylates. *Construction and Building Materials*. 2018. 166, 96-109.
87. Gerges N. N., Issa C. A., Fawaz S. A., Jabbour J., Jreige J., Yacoub A. Recycled glass concrete: coarse and fine aggregates. *The Journal of Scientific and Engineering Research*. January 2018. Vol. 3. No. 1.
88. Giergiczny Z. Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*. 2019. 124. P. 1–18.
89. Gołaszewski J. Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance. *Construction and building materials* 2012; 35: P. 586-596.
90. Gołaszewski J. Domieszki do betonu efekty działania ocena i badania. Gliwice, 2016. 263 s.
91. Guo H., Shi C., Guan X., Zhu J., Ding Y., Ling T.C., Zhang H., Wang Y., Durability of recycled aggregate concrete - A review, *Cement and Concrete Composites* (2018) 89, 251-259.

92. Hooton R. D. Future directions of design, specification, testing and construction of durable concrete structures. *Cement and concrete research*. 2019. 124. P. 105827.
93. Ivashchyshyn H., Sanytsky M., Kropyvnytska T., Rusyn B. Study of low-emission multi-component cements with a high content of supplementary cementitious materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, № 6 (100). P. 39–47.
94. Jang Seok-Joon, Yun Hyun-Do. Mechanical properties of ready-mixed concrete incorporating fine recycled aggregate magazine of concrete research. 2015. 67(12):621-632.
95. Jamrozy Ż. *Beton i jego technologie*. Warszawa, PWN. 2000. <https://www.nexto.pl/upload/sklep/pwn-demo>.
96. Juenger M., Provis J., Elsen J. Supplementary cementitious materials for concrete. Characterization needs. *Materials research society*. 2012. 1488. P. 1–15.
97. Kang X., Li Y. Effect of recycled fine powder and mineral admixture on the properties of the cement mortar. *Earth and environmental science*. 219. 012026.
98. Kirakevych I., Sanytsky M., Shyiko O., Kagarlitskiy R. Modification of cementitious matrix of rapid-hardening high-performance concretes. *Theory and building practice*. 2021. Vol. 3, № 1. P. 79–84.
99. Kou S, Poon C., Agrela F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*. 2011. Vol. 33. Issue 8. P. 788-795.
100. Krawczyk B., Szydło A., Mackiewicz P., Dobrucki D. Suitability of aggregate recycled from concrete pavements for layers made of unbound and cement bound mixtures. *Roads and bridges*, 2018. 39 – 53.
101. Kryvenko P. V., Runova R. F., Rudenko I. I. et. al. Analysis of plasticizer effectiveness during alkaline cement structure formation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 4/6(88). P. 35–41.

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

103. Kropyvnytska T., Geviuk I., Stekhna R., Rykhlitska O., Deschenko L. Effect of limestone powder on the properties of blended portland cements. *Theory and Building Practice*, 2021. V. 3, 1, P. 35–41.

104. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucinska T., Rykhlitska O. Development of nanomodified rapid hardening clicker-efficient concretes based on Portland-composite cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4/6 (100). P. 38–48.

105. Kurdowski W. *Chemia cementu i betonu*. *Polski Cement*. 2010. 728 s.

106. Liu J., Yu C., Ran Q., Yang Y. Recent advance of chemical admixtures in concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 124, 2019. P.105-834.

107. Li X., Qin D., Hu Y., Ahmad W., Ahmad A., Aslam F., Joyklad P. A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. *Journal of Building Engineering*, 2022. Vol. 45, 103447.

108. Locher Friedrich W. *Cement – Principles of production and use*. Verlag Bau + Technic GmbH. 2006. 536 p.

109. Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R. Supplementary cementitious materials. *Cement and concrete research*. 2011. 41(3). P. 217–229.

110. Lukowski P. *Modyfikacja materiałowa betonu*. SPC, 2016. 365 s.

111. Makul N., Fediuk R., Amran M., Zeyad M. A., Klyuev S., Chulkova I., Ozbakkaloglu T., Vatin N., Karelina M., Azevedo A. Design strategy for recycled aggregate concrete: a review of status and future perspectives. *Crystals* 2021. 11(6). 695 p.

112. Makul N., Fediuk R., Amran M., Zeyad A.M., Murali G., Vatin N., Klyuev S., Ozbakkaloglu T., Vasilev Y. Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: a review. *Crystals*. 2021. 11(3). 232.

113. Malešev M., Radonjanin V., Marinković S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability* 2010. 2(5). 1204-1225.

114. Małolepszy J., Deja J., Brylicki W., Gawlicki M. *Technologia betonu*. Uczelniane wydawnictwa naukowo-dydaktyczne. Kraków, 2000. 326 s.
115. Neville A. M. *Właściwości betonu*. Kraków: Polski Cement, 2000. 874 s.
116. Paul S.C., Gpag van Zijl, Šavija B. Mechanical and durability properties of recycled concrete aggregate for normal strength structural concrete. *International journal of sustainable construction engineering & technology*. 2013. Vol. 4. No 1. P. 89-103.
117. Pereira P., Luis Evangelista, Jorge de Brito. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composite*, 2012. Vol. 34(9). P. 1044-1052.
118. Pizoń J. Long-term compressive strength of mortars modified with hardening accelerating admixtures. *Procedia engineering*, 2017. Vol. 195. P. 205–211.
119. Plank, J., Sakai, E., Miao, C. W., Yu, C., Hong, J. X. *Chemical Admixtures – Chemistry, Applications and Their Impact on Concrete Microstructure and Durability*. *Cement and Concrete Research*, 2015. 7. 81 – 99.
120. Plank J., Schroefl C., Gruber M., Lesti N., Sieber R. Effectiveness of polycarboxylate superplasticizers in ultra-high strength concrete: The importance of PEC compatibility with silica flume. *Journal of advanced concrete technology*, 2009. Vol. 7. № 1. P. 5–12.
121. Rykhlytska O., Kropyvnytska T. Effect of polycarboxylate superplasticizers on the properties of ready-mix concrete. *Theory and building practice*, 2022. Vol. 4, № 1. P. 43–48.
122. Revilla-Cuesta V., Skaf M., Santamaría A., Espinosa A.B. Vanesa Ortega-Lopez. Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate subjected to alternating-sign temperature variations: Thermal strain and damage. *Case studies in construction materials*, 2022. P. № 17. P. 01204.
123. Rusyn B., Sanytsky M., Szymanska J., Geviuk I. Sustainable concretes containing supplementary cementitious materials. *Budownictwo o*

zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Czestochowa, 2012. R. IX (9). 1. P. 95–102.

124. Salahuddin H, Qureshi LA, Nawaz A, Abid M, Alyousef R, Alabduljabbar H, Aslam F, Khan SF, Tufail RF. Elevated temperature performance of reactive powder concrete containing recycled fine aggregates. *Journals MDPI*. 2020. № 13. P. 3748.

125. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Ivashchyshyn H., Rykhlytska O. Eco-efficient blended cements with high volume of supplementary cementitious materials // *Budownictwo i Architektura*. 2019. T. 18 (4). S. 5–14.

126. Sanytsky M., Kruts T., Kropyvnytska T., Rusyn B. Sustainable green engineered composites containing ultrafine supplementary cementitious materials. 14th International congress on the chemistry of cement, Beijing, China. 2015. 1, 265.10.

127. Sikora P., Elrahman M. A., Stephan D. The influence of nanomaterials on the thermal resistance of cement-based composites: A Review. *Nanomaterials*. 2018. 8/ 465. P. 1–33.

128. Silva R.V., Neves R., Brito J. de, Dhir R.K. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*. 2015 62: 22-32.

129. Singh S. B., Munjal P., Thammishetti N. Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar. *Journal of building engineering*. 2015. Vol. 4. P. 94–100.

130. Schneider M. The cement industry on the way to low-carbon future. *Cement and concrete research*. 2019. 124. 1–19.

131. Sobol K., Markiv T., Hunyak O. Effect of mineral additives on structure and properties of concrete for pavements. *Current issues of civil and environmental engineering : XVI International scientific conference in Košice, Lviv, Rzeszów* : 6-8 September, 2017.

132. Tamayo Pablo, Pacheco Joao, Thomas Carlos, Jorge de Brito, Rico Jokin. Mechanical and durability properties of concrete with coarse recycled aggregate produced with electric arc furnace slag concrete. *Appl. Sci*. 202. 10, 216.

133. Théréne F., Keita E., Naël -redolfi J., Boustingorry P., Bonafous L., Roussel N. Water Absorption of recycled aggregates: measurements, artifacts and practical consequences, *Cem. Concr. Res.* (2020) 137: 106196.

134. Tošić N., Torrenti J. M. New Eurocode provisions for recycled aggregate concrete and their implications for the design of one-way slabs. *Building Materials and Structures*. 2021. 64. 119-125.

135. The role of cement in the 2050 low carbon economy: CEMBUREAU, 2013. 64p.

136. Troian V., Gots V., Keita E., Roussel N., Angst U., Flatt R. J. Challenges in Material Recycling for Postwar Reconstruction. *RILEM Tech Lett* 2022, 7, 139-149.

137. Urban M. Low cement content SCC (Eco-SCC) – the alternative for ready-mix traditional concrete. *MATEC Web of conferences*, 2018. 163. P. 1004.

138. VDZ «Practical and theoretical training of VDZ». Raw material preparation and grinding, 2016.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Саницький А.М., Кропивницька Т.П., Рихліцька О.В., Яніцький О.Б. Швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. Рівне: [б. в.]. 2020. Вип. 38. С. 258-266.

2. Kropyvnytska T., Geviuk I., Stekhna R., Rykhlitska, O., Deschenko, L. Effect of limestone powder on the properties of blended portland cements. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoj politehniky: Teoriia i praktyka budivnytva. 2021. Vol. 3. No. 1. P. 35–41.

3. Rykhlitska O., Kropyvnytska T. Investigation of the effect of polycarboxylate superplasticizers on the properties of ready-mixed concrete // Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoj politehniky: Teoriia i praktyka budivnytva. 2022. Vol. 4. No. 1. P. 43-48.

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

4. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucinska T., Rykhlitska O. Development of nanomodified rapid hardening clicker-efficient concretes based on Portland-composite cements // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances. 2019. Vol. 4/6 (100). P. 38–48. 5. (Scopus).

5. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Ivashchyshyn H., Rykhlitska O. Eco efficient blended cements with high volume of supplementary cementitious material. Budownictwo i Architektura. 2019. T. 18 (4). P. 5–14.

Продовження додатку А*Патент:*

6. Кропивницька Т.П., Саницький М.А., Камінський А. Т., Гев'юк І. М., Рихліцька О.В. Патент № 125923 Модифікована ремонтна композиція. Заявн. Національний університет "Львівська політехніка". а202102421; заявл. 06.05.2021; опубл. 06.07.2022; 27. (*Патент на винахід*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Саницький М. А., Кропивницька Т. П., Рихліцька О. В. Концепції енергоефективності в секторі цементу та бетону // Енергоефективне місто. XXI століття : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 15–16 жовтня 2020 р., Одеса. – 2020. – С. 62–65.

8. Рихліцька О.В., Кропивницька Т.П., Кагарлицький Р.Р. Модифіковані клінкер-ефективні бетони на основі екоцементів //6-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування». 2021:С. 129.

9. Рихліцька О.В. Еко-ефективні бетони з використанням заповнювачів рециклінгу будівельних відходів. Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективне місто. XXI століття». 10-11 листопада 2022 р. Одеса. – 2022. – С. 133.

Додаток Б

Затверджую

Директор ТзОВ «Бетонікс»

Мельник В.В.

від _____ 2023 р.



АКТ

**про впровадження товарного бетону на основі відходів рециклінгу бетону
для монолітного залізобетонного перекриття**

Ми, що нижче підписались, представник підприємства ТзОВ «Бетонікс» – комерційний директор Іванчусь М. та представники Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н, проф. Кропивницька Т.П., аспірант Рихліцька О.В. склали даний акт про виготовлення та впровадження партії товарного бетону на основі відходів рециклінгу бетону для влаштування монолітного залізобетонного перекриття (плита перекриття $a \times b \times c = 25 \times 7 \times 0,2$ м) третього поверху житлового багатоквартирного будинку (м. Львів, вул. Миколи Пимоненка, 1) у кількості 35 м^3 .

Для одержання товарного бетону використано портландцемент СЕМ II/A-LL 42,5R ДСТУ Б EN 197-1 ($\rho = 350 \text{ кг/м}^3$), кварцовий пісок ($M_k = 1,2$) Давидівського родовища Львівської обл., гранітний щебінь фракції 5-20 мм Рокитнянського спецкар'єру ТОВ «РКДЗ» Київської обл., відходи рециклінгу власного бетону (RCA) фракції 2,5-20 мм ТзОВ «Бетонікс», м. Львів. Для проектування товарного бетону класу міцності C20/25 застосовано крупний заповнювач у відсотковому співвідношенні «щебінь гранітний : відходи рециклінгу = 50 : 50». Для забезпечення необхідної рухливості бетонної суміші та її збереження в часі вводили полікарбосилатні суперпластифікатори на різній полімерній основі.

Бетонна суміш, яка поступила на будівельний майданчик, мала наступні характеристики: марка за осадкою конуса S4 ($OK = 20 \text{ см}$); об'єм втягнутого повітря - 3,0%; збереження необхідної рухливості протягом 2,5 год з моменту її приготування на бетонному заводі; водовідділення менше 0,2%. Товарний бетон з відходами рециклінгу бетону виготовлено з урахуванням вимог, які встановлені до вартості та довговічності порівняно зі звичайним бетоном, що дозволяє зробити позитивний внесок в економічний та екологічний цикли міського господарства.

Комерційний директор ТзОВ «Бетонікс»

від Національного університету «Львівська політехніка»

д.т.н., професор

аспірант


 Іванчусь М.


 Кропивницька Т. П.


 Рихліцька О. В.



20062
DCTV EN ISO/IEC 17025

ПРОТОКОЛ № 20062-013/МБ.ПВ.23 від 28.03.2023р.

Випробувань бетону

ВЛ ПрАТ "Івано-Франківськцемент" атестат акредитації № 20062 від 22.09.2021 р. дійсний до 03 вересня 2023 р.

Замовник	Випробувальна лабораторія будівельних матеріалів і виробів Національного університету "Львівська політехніка", м. Львів
Ідентифікація/маркування зразка	№1 за 20.02.2023р. (ідентифікація замовника) Зразок куб бетону зареєстрований в лабораторії під номером № 112 3-23 №2 за 20.02.2023р. (ідентифікація замовника) Зразок куб бетону зареєстрований в лабораторії під номером № 113 3-23 №3 за 20.02.2023р. (ідентифікація замовника)
Відбір зразка	Зразок куб бетону зареєстрований в лабораторії під номером № 114 3-23 Надано випробувальною лабораторією будівельних матеріалів і виробів Національного університету "Львівська політехніка", м. Львів
Дата надходження у ВЛ	10.03.2023
Дата випробувань	24.03.2023-27.03.2023р.

Глибинне проникнення води під тиском

Ідентифікаційне позначення зразків	Дата виготовлення зразків	Опис зразків, розмір, мм	Показник	Результат випробувань	НД (методи випробувань)	Невизначеність вимірювань
№1	13.01.2023	куб 150x150x150	Глибина проникнення води під тиском, мм	25	EN 12390-8	±1,0мм
№2		куб 150x150x150		27		
№2		куб 150x150x150		22		
(112 3-23) (113 3-23) (114 3-23)		Придатні для випробувань	Водонепроникність (розрахунково)	W12 W12 W12	погоджено з ВЛБМВ	-

Виконавці: Наталія ДОРОШЕНКО

Зразки після випробувань зображені у додатку 1.

Інженер-технолог ВЛ ВВМ
ПрАТ "Івано-Франківськцемент"



Сягенія ЛЕБЕДЕНКО

Сягенія ЛЕБЕДЕНКО

Протокол випробувань стосується тільки зразки, який підданий випробуванням. Повне або часткове передруккування протоколу без дозволу ВЛ ВВМ ПрАТ "Івано-Франківськцемент" не допускається.

Кінець протоколу.

Trnava dn. 20 december 2022 r.



**BETON
RACIO®**

SILA MYŠLIENKY V BETÓNE

Certifikát

ukončenie štúdia

«Betón na báze recyklovaného kameniva»

pre

Oksana Rykhlytska

TOO «LADCE Betón»



Prísady do betónu

Додаток Д

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)		- 1 -		28_СД_ЛС1ЕС_02-01-04	
дисертація рециклінг					
Локальний кошторис на на будівельні роботи №02-01-04 з розрахунками одиничної вартості на оригінальний бетон житловий об'єкт					
Основа: креслення (специфікації) №				Кошторисна вартість	6,861 тис. грн.
				Кошторисна трудомісткість	0,01545 тис.люд.год.
				Кошторисна заробітна плата	1,132 тис. грн.
				Середній розряд робіт	3,1 розряд

Складений за поточними цінами станом на "14 березня" 2023 р.

№ Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										заробітної плати	в тому числі заробітної плати
1	ЕН6-45-14	Приготування важкого бетону з щебеню, клас бетону В30	100 м3	0,01	448569,07 18220,27	6775,72 3009,78	4486	182	68 30	301,9100 45,4170	3,02 0,45
Розрахунок одиничної вартості ЕН6-45-14											
		Заробітна плата									
		Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт 2		301,91						60,35	18220,27
		Машини та механізми									
СН203-99		Автовантажувачі, вантажопідйомність 2 т	маш.год	8,2	461,15 89,46				3781,43 733,57		
СН211-811		Бетонозмішувачі примусової дії пересувні, місткість 250 л	маш.год	32,1	93,28 70,91				2994,29 2276,21		
		Разом машин та механізмів							6775,72 3009,78		

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)		- 2 -		28_СД_ЛС1ЕС_02-01-04							
1											
Матеріали											
С111-1325 варіант 2		Портландцемент загальнобудівельного та спеціального призначення, марка 500 (СЕМ ІІА-LL 42.5 NR)	т	35	3599,20				125972,00		
С111-1712 варіант 1		ПМД	кг	10000	8,79				87900,00		
С142-10-2 варіант 1		Вода	м3	14,5	27,90				404,55		
С1421-9457 варіант 2		Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 2-4 мм, марка М800, 300 кг/м куб, відпускна ціна 680 грн/т, відстань транспортування 30 км	м3	25,8	1672,69				43155,40		
С1421-9458 варіант 2		Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 5-20 мм, марка М800, 970 кг/м куб, відпускна ціна 750 грн/т, відстань транспортування 30 км	м3	69,2	1772,65				122667,38		
С1421-9552 варіант 1		Пісок природний, збагачений, 420 кг/м, (відпускна ціна 325 грн/т)	м3	30	826,30				24789,00		
С1632-110 варіант 1		Суперпластифікатор	кг	525	35,59				18684,75		
		Разом матеріалів							423573,08		
2	ЕН6-22-1	Улаштування перекриттів безбалкових товщиною до 200 мм на висоті від опорної площадки до 6 м (без врахування вартості бетону)	100м3	0,01	160151,98 67225,17	14284,29 5612,44	1602	672	143 56	964,7700 67,3508	9,65 0,67
Розрахунок одиничної вартості ЕН6-22-1											
		Заробітна плата									
		Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт 3,4		964,77						69,68	67225,17
		Машини та механізми									
СН202-129		Крани баштові, вантажопідйомність 8 т	маш.год	41,96	306,97 128,34				12880,46 5385,15		
СН203-101		Автовантажувачі, вантажопідйомність 5 т	маш.год	1,54	537,70 104,00				828,06 160,16		
СН233-261		Верстат трубозгинальний гідравлічний	маш.год	4,29	11,58 1,36				49,68 5,83		
СН233-345		Прес-ножиці комбіновані	маш.год	7,12	73,89 8,61				526,10 61,30		

Продовження додатку Д

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)										28 СД ЛС1ЕС 02-01-04	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Разом машин та механізмів							14284,29 5612,44		
		<i>Машини, враховані в складі загальнопромислових витрат</i>									
	СН211-101	Бадді, місткість 2 м ³	маш.год	29,97							
	СН270-116	Вібратори поверхневі	маш.год	42,5							
		<i>Матеріали</i>									
	С111-253	Вално будівельне негашене грудкове, сорт 1	т	0,086	3454,34		297,07				
	С111-816	Дріт сталевий низьковуглецевий різного призначення світлий, діаметр 1,1 мм	т	0,025	36304,68		907,62				
	С111-818-1	Дріт сталевий низьковуглецевий різного призначення світлий, діаметр 4,0 мм	т	0,0188	25955,27		487,96				
	С111-1853-4	Цвяхи будівельні 4,0x120 мм	т	0,105	25800,27		2709,03				
	С111-1882	Тканина мішкова	10м ²	3,43	676,79		2321,39				
	С112-53	Дошки обрізні з хвойних порід, довжина 4-6, 5 м, ширина 75-150 мм, товщина 25 мм, III сорт	м ³	2,47	5729,45		14151,74				
	С112-61	Дошки обрізні з хвойних порід, довжина 4-6, 5 м, ширина 75-150 мм, товщина 44 мм і більше, III сорт	м ³	2,81	5488,09		15421,53				
	С123-514-У	Щити опалубки, ширина 300-750 мм, товщина 25 мм	м ²	95,62	441,46		42212,41				
	С142-10-2	Вода	м ³	0,257	42,10		10,82				
		<i>Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат</i>									
	С1999-9001	Електроенергія	кВт-год	24,225	3,4755		84,19				
	С1999-9005	Масляні матеріали	кг	0,425	91,20		38,76				
		Разом матеріалів					78642,52				
3	С331-34-3 варіант 2	Вивезення будівельного сміття самоскидами на відстань 30 км	т	0,7	304,02	304,02	213	-	213	-	-
		Разом прями витрати по кошторису					6301	854	424	-	12,67
		Разом будівельні роботи, грн.					6301		86		1,12
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					5023				
		всього заробітна плата, грн.					940				

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)										28 СД ЛС1ЕС 02-01-04	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Загальнопромислові витрати, грн.					560				
		трудомісткість в загальнопромислових витратах, люд.год.					1,66				
		заробітна плата в загальнопромислових витратах, грн.					192				
		Всього будівельні роботи, грн.					6861				
		Всього по кошторису					6861				
		Кошторисна трудомісткість, люд.год.					15,45				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					1132				

Склад _____ Рихліцька
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Перевірив _____
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Продовження додатку Д

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)												- 1 -		28_СД_ЛС1ЕС_02-01-06	
дисертація															
рециклінг															
Локальний кошторис на на будівельні роботи №02-01-06 з розрахунками одиничної вартості															
на бетон з рециклінгу															
житловий об'єкт															
Основа:						Кошторисна вартість			5,944 тис. грн.						
креслення (специфікації) №						Кошторисна трудомісткість			0,01545 тис. люд. год.						
						Кошторисна заробітна плата			1,132 тис. грн.						
						Середній розряд робіт			3,1 розряд						
Складений за поточними цінами станом на "14 березня" 2023 р.															
№ Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд. год.					
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин					
										в тому числі заробітної плати	в тому числі заробітної плати	на одиницю	всього		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
1	ЕН6-45-14	Приготування важкого бетону з щебеню, клас бетону В30	100 м3	0,01	378198,54	6775,72	3782	182	68	301,9100	3,02				
					18220,27	3009,78			30	45,4170	0,45				
Розрахунок одиничної вартості ЕН6-45-14															
		З а р о б і т н а п л а т а													
		Витрати труда робітників - будівельників		301,91						60,35	18220,27				
		Середній розряд робіт 2													
		М а ш и н и т а м е х а н і з м и													
	СН203-99	Автовантажувачі, вантажопідйомність 2 т	маш.год	8,2	461,15				3781,43						
					89,46				733,57						
	СН211-811	Бетонозмішувачі примусової дії пересувні, місткість 250 л	маш.год	32,1	93,28				2994,29						
		Разом машин та механізмів			70,91				2276,21						
									6775,72						
									3009,78						

Продовження додатку Д


4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)		- 2 -		28_СД_ЛС1ЕС_02-01-06							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
М а т е р і а л и											
	C111-1325 варіант 2	Портландцемент загальнобудівельного та спеціального призначення, марка 500 (СЕМ II/A-LL 42.5 NR)	т	35	3599,20		125972,00				
	C111-1712 варіант 1	ПМД	кг	10000	8,79		87900,00				
	C142-10-2 варіант 1	Вода	м3	17,5	27,90		488,25				
	C1421-9458 варіант 3	Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 5-20 мм, марка M800, 620 кг/м куб, відпускна ціна 750 грн /т, відстань транспортування 30 км	м3	44,2	1772,65		78351,13				
	C1421-9552 варіант 2	Пісок природний, збагачений, 500 кг/м, (відпускна ціна 325 грн/т)	м3	35,6	826,30		29416,28				
	C1423-11296 варіант 3	Щебінь з відходів подрібнення відстань транспортування 1 км	м3	44,2	280,32		12390,14				
	C1632-110 варіант 1	Суперпластифікатор	кг	525	35,59		18684,75				
		Разом матеріалів					353202,55				
2	ЕН6-22-1	Улаштування перекриттів безбалкових товщиною до 200 мм на висоті від опорної площини до 6 м (без врахування вартості бетону)	100м3	0,01	160151,98 67225,17	14284,29 5612,44	1602	672	143 56	964,7700 67,3508	9,65 0,67
Р о з р а х у н о к о б и ч н о ї в а р т о с т і ЕН6-22-1											
		З а р о б і т н а п л а т а									
		Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт 3,4			964,77					69,68	67225,17
		М а ш и н и т а м е х а н і з м и									
	СН202-129	Крани баштові, вантажопідйомність 8 т	маш.год	41,96		306,97 128,34			12880,46 5385,15		
	СН203-101	Автовантажувачі, вантажопідйомність 5 т	маш.год	1,54		537,70 104,00			828,06 160,16		
	СН233-261	Верстат трубозгинальний гідравлічний	маш.год	4,29		11,58 1,36			49,68 5,83		
	СН233-345	Прес-ножиці комбіновані	маш.год	7,12		73,89 8,61			526,10 61,30		
		Разом машин та механізмів							14284,29 5612,44		



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор

з науково-педагогічної роботи

 Давидчак О.Р.

_____ 2023 р.

АКТ

Про використання результатів дисертаційної роботи Рихліцька О.В на тему
«Бетони з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі
заповнювачі рециклінгу бетону»

Нами, головою науково-методичної комісії спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, к.т.н., доцентом Холодом П.Ф., завідувачем кафедри будівельного виробництва д.т.н., професором Саницьким М.А. складено даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Рихліцької О.В. впроваджені в навчальний процес на кафедрі будівельного виробництва, зокрема в курсах: «Сучасні будівельні матеріали і методи досліджень», «Наукові дослідження в будівництві», «Технології утилізації відходів у будівництві», що викладається для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія. Використовуються результати досліджень дисертаційної роботи щодо досліджень фізичних характеристик заповнювачів рециклінгу бетону, будівельно-технічних властивостей еко-ефективних бетонів на основі заповнювачів рециклінгу бетону та оптимізації гранулометричного складу заповнювачів бетону відповідно до європейських стандартів.

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



Холод П.Ф.

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



Саницький М.А.