

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАМІНСЬКИЙ АНДРІЙ ТАРАСОВИЧ

УДК 666.942.32:666.9.035

ДИСЕРТАЦІЯ

**РЕМОНТНІ СУМІШІ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ
ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ЛУЖНОГО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ**

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

_____ / А. Т. Камінський /

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Кропивницька Тетяна Павлівна,

доктор технічних наук, доцент

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

Львів – 2021

Анотація

Камінський А. Т. Ремонтні суміші з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі лужного портландцементу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертаційна робота присвячена вирішенню завдання одержання безусадочних і розширних сумішей на основі лужних портландцементів з підвищеними експлуатаційними властивостями для ремонту бетонних і кам'яних конструкцій, які відзначаються високою міцністю та надійністю. Для обґрунтування актуальності проблеми проведено аналіз особливостей вибору складу цементних сумішей для ремонту будівельних конструкцій та процесів їх руйнування з врахуванням дії комплексу факторів у різних умовах експлуатації. Розглянуто способи регулювання властивостей ремонтних сумішей за рахунок використання безусадочних та розширних цементів на основі гіпсоглиноземистого цементу. Висвітлено переваги і недоліки різних видів ремонтних сумішей та розглянуто фактори, які призводять до складності регулювання деформацій усадки-розширення при експлуатації в різних умовах, а також зниження довговічності відновлених будівельних конструкцій.

Показано, що ефективним способом для швидкого ремонту та зведення бетонних споруд є лужноактивовані цементуючі системи, які дозволяють отримати значну економію засобів, матеріалів і працезатрат як на стадії реконструкції, так і в процесі експлуатації будівель та споруд. Проведено аналіз застосування лужних алюмінійвмісних прискорювачів тверднення, які забезпечують високу ранню міцність, проте можуть призводити до збільшення водопотреби, підвищення пористості і як наслідок зниження довговічності

будівельних матеріалів. Показано, що оптимізація речовинного та гранулометричного складів основних компонентів сумішей забезпечує необхідну мезо- та мікроструктуру розчинів та дозволяє покращити показники якості будівельних композитів. Обґрунтовано застосування суперпластифікаторів полікарбосилатного типу з врахуванням фізичного підходу щодо зменшення водоцементного відношення в напрямку одержання довговічної цементуючої матриці безусадочних та розширних ремонтних сумішей.

Аналіз відомих закономірностей в області будівельного матеріалознавства дозволяє висунути наукову гіпотезу щодо можливості комплексного поєднання алюмінійвмісних мінеральних добавок, лужних активаторів на основі алюмінату натрію та полікарбосилатних суперпластифікаторів для створення модифікованих лужних портландцементних систем з високою ранньою міцністю, які дозволяють одержати ремонтні безусадочні та розширні суміші, що забезпечують необхідну швидкість тверднення, міцність зчеплення з основою, тріщиностійкість, водонепроникність, тобто характеризуються покращеними експлуатаційними властивостями та довговічністю.

Наведено характеристики матеріалів для одержання ремонтних безусадочних та розширних сумішей, а саме портландцементів різних типів виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент», мінеральних алюмінійвмісних добавок (зола винесення, метакаолін), лужного алюмінійвмісного активатора тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та суперпластифікаторів. Показано, що визначення фізико-механічних і будівельно-технічних властивостей лужних портландцементів та ремонтних безусадочних і розширних ремонтних сумішей проведено згідно з діючими нормативним документам і загальноприйнятими методикам. Для дослідження процесів структуроутворення ремонтних безусадочних та розширних сумішей використано сучасні методи фізико-хімічного аналізу, а саме, рентгенівську дифрактометрію, термогравіметрію, растрову електронну мікроскопію та ін.

Наведено загальну блок-схему досліджень, яка показує послідовність виконання роботи та розкриває поетапно основні положення щодо фізико-хімічних особливостей процесів структуроутворення штучного каменю на основі модифікованих лужних портландцементів, принципи створення лужно-алюмінатного нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ як високоефективного прискорювача тверднення портландцементних систем, дослідження засобів регулювання властивостей ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу, розроблення безусадочних та розширних ремонтних сумішей на основі модифікованих лужних портландцементів та дослідження їх будівельно-технічних властивостей.

В роботі теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість отримання швидкотверднучих ремонтних безусадочних сумішей з покращеними експлуатаційними властивостями за рахунок розроблення лужних портландцементів з добавкою вапняку, застосування активної мінеральної добавки пуцоланічної дії (золи-винесення), лужного алюмінійвмісного активатора тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ і суперпластифікатора полікарбоксилатного типу РСЕ, а також високоефективних ремонтних розширних сумішей, одержаних шляхом введення комплексної лужної розширної добавки $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]\text{-CaO-CaSO}_4\text{x}2\text{H}_2\text{O-РСЕ}$ з врахуванням технічних і економічних переваг.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при введенні 1,5..3,0 мас.% лужного алюмінійвмісного активатора тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ до портландцементу з вапняком СЕМ ІІ/А-LL (В/Ц=0,5) рухливість цементно-піщаного розчину зменшується до 125-110 мм. За рахунок процесів прискореного утворення еtringіту забезпечується приріст ранньої міцності на стиск через 14 та 24 год до 7,5 та 10,0 МПа, тоді як через 2; 7 та 28 діб спостерігається зниження міцності в 1,8-3,0 рази порівняно зі складом без добавок, що обумовлено зростанням пористості каменю внаслідок збільшення водопотреби в'язучого. Показано, що при введенні суперпластифікатора полікарбоксилатного типу РСЕ за рахунок водоредукуючого ефекту

($\Delta B/C=28,0\%$) відбувається зростання особливо ранньої міцності - через 14 год до 9,6 МПа. В той же час, збільшення вмісту $Na[Al(OH)_4]$ до 5,0 мас.% призводить до різкого зменшення рухливості цементно-піщаного розчину від 152 до 105 мм при $B/C=0,50$ та прискорення термінів початку тужавіння – до 45 хв, що обумовлено утворенням значної кількості плівкоподібних гідроалюмінатних фаз C_4AH_{19} , які формуються в умовах підвищеної лужності середовища (рН збільшується від 12,5 до 13,2).

Розроблено лужні портландцементи з високою ранньою міцністю різних типів з добавкою лужного алюмінійвмісного активатора тверднення $Na[Al(OH)_4]$. Встановлено, що при введенні 1,5 мас.% $Na[Al(OH)_4]$ та золи-винесення до складу портландцементу з добавкою вапняку при $B/C=0,50$ ($R_K=170$ мм) рання міцність через 12 та 24 год тверднення складає 6,3 та 15,6 МПа, стандартна – 54,6 МПа. Показано, що при введенні 1,0 мас.% РСЕ за рахунок водоредукуючого ефекту $\Delta B/C=30,0\%$ ($R_K = 170$ мм) забезпечується збільшення ранньої міцності через 12 та 24 год - в 4,5 рази (19,3 МПа) та в 2,3 рази (35,0 МПа). Через 2 доби міцність на стиск зростає в 1,8 рази (51,2 МПа), а через 28 діб - у 1,2 рази (73,7 МПа); при цьому $R_{ct1}/R_{ct28}=47,5\%$; $R_{ct2}/R_{ct28}=69,4\%$. Згідно ДСТУ Б EN 197-1 розроблений модифікований лужний портландцемент характеризується високою ранньою ($R_{ct2}= 38,2$ МПа) та стандартною ($R_{ct28} = 60,1$ МПа) міцностями та відноситься до класу 52,5 R. Методом математичного планування експерименту показано, що оптимальний вміст 1,5 мас.% $Na[Al(OH)_4]$ та 1,0% РСЕ забезпечує одержання модифікованого лужного композиційного портландцементу АСЕМ II/B-M (S-P-L) 42,5 R з високою ранньою міцністю ($R_{ct2}=32,0$ МПа, $R_{ct28}=55,6$ МПа). Направлене регулювання процесів раннього структуроутворення лужних портландцементів визначає їх покращені будівельно-технічні властивості.

Розкрито закономірності формування фазового складу та мікроструктури гідросульфоалюмінатних цементуючих систем з використанням методів фізико-хімічного аналізу. Показано, що комплексне поєднання золи-винесення і вапняку в лужноактивованій цементуючій матриці забезпечує

інтенсифікацію процесів раннього структуроутворення за рахунок утворення гідрокарбоалюмінатів та лужних цеолітоподібних гідроалюмосилікатів N-S-A-S-H. Обґрунтовано новий підхід до направленою регулювання процесів раннього структуроутворення в цементуючих системах за рахунок введення в якості ефективного активатора тверднення синтезованого за методом золь-гель технології лужно-алюмінатного нанокompозиту C-A-N-H-PCE, який відноситься до класу інженерних матеріалів на основі шаруватих подвійних гідроксидів (CaAl LDH) та органічних добавок, що створює можливість отримання безусадочних швидкотверднучих цементних ремонтних сумішей. Згідно даних електронної мікроскопії встановлено, що в модифікованій лужноактивованій цементуючій матриці за рахунок явища адсорбційного модифікування переважно утворюються дрібнодисперсні голчасті кристали еtringіту. Показано, що в процесі її тверднення спостерігається їх інтенсивне зрощення, що сприяє за рахунок явища «самоармування» значному збільшенню щільності та непроникності модифікованого цементного каменю. При цьому забезпечується зростання міцності на згин та тріщиностійкості ремонтної суміші. Введення лужного алюмінійвмісного нанокompозиту C-A-N-H-PCE до цементуючої системи на основі на основі СЕМ П/А-LL 42,5 забезпечує високу ранню (через 12 год - 20,8 МПа) та стандартну (через 28 діб - 90,0 МПа) міцності при зменшенні його капілярної пористості до 11,9%.

Дослідженнями впливу зернового складу кварцового піску різних фракцій на формування мезоструктури та властивостей ремонтних сумішей встановлено, що найвищою густиною у насипному ($\rho_n=1533 \text{ кг/м}^3$) і ущільненому ($\rho_{щ}=1690 \text{ кг/м}^3$) станах та найнижчою пустотністю відповідно $P_n=42,2\%$ і $P_{щ}=36,2\%$ характеризується зерновий склад у співвідношенні $M_{к1,3}:M_{к2,7}=25:75$. Показано, що заміна кварцового піску $M_{к2,7}$ на 25 мас.% золи-винесення у складі $M_{к1,3}:M_{к2,7}=25:75$ призводить до збільшення насипної густини (1683 кг/м^3) та зменшення пустотності до 35,3 %. На основі комплексного аналізу математичних моделей за критеріями термінів тужавіння, міцності та деформацій усадки-розширення запроєктовані

ремонтні склади безусадочних сумішей на основі лужних портландцементів, для яких введення оптимального складу добавок: 10-15 мас.% золи-винесення та 2,0-2,5 мас.% С-А-Н-Н-РСЕ забезпечує підвищені показники якості.

Розроблено швидкотверднучі ремонтні безусадочні суміші на основі лужних портландцементів та піску оптимізованого зернового складу. Дослідженнями встановлено, що ремонтні суміші типу ШРБС АН-1 (консистенція – 24 мм) характеризуються початком тужавінням 80-100 хв, високою ранньою міцністю: через 14 год – $R_{тв}=3,4$ МПа, $R_c=9,8$ МПа, через 24 год – $R_c=22,08$ МПа і 28 діб – $R_c=70,9$ МПа; міцність зчеплення з основою складає 4,0 МПа, модуль пружності $E_{cm}=51,7$ ГПа, корозійна стійкість $K_{90}=1,2$, водонепроникність W16, морозостійкість F400. Швидкотверднучі ремонтні суміші характеризуються пониженими деформаціями усадки ($\Delta l/l=0,06$ мм/м), що дозволяє їх віднести до безусадочних.

Розроблено модифіковану комплексну розширну добавку (КРД) $Na[Al(OH)_4] - CaO - CaSO_4 \cdot 2H_2O - РСЕ$ для ремонтних розширних сумішей з регульованою кінетикою утворення еtringіту. Методом растрової електронної мікроскопії показано, що введення РСЕ в модельні системи « $Na[Al(OH)_4] - CaO - CaSO_4 \cdot 2H_2O$ » і « $CaO - Al_2(SO_4)_3$ » за рахунок явища адсорбційного модифікування забезпечує синтез голкоподібних, дрібних кристалів еtringіту та створює можливість для регулювання процесів розширення у цементуючій матриці ремонтних сумішей. Експериментальними дослідженнями встановлено, що введення 20–30 мас.% КРД забезпечує високу швидкість тверднення, при цьому початок тужавіння суміші скорочується до 120–50 хв, деформації розширення складають $\Delta l/l = 0,62 - 1,25$ мм/м, міцність на стиск досягається 40,0-34,0 МПа. Процеси розширення в обмеженому просторі призводять до самоущільнення суміші, міцність на стиск/згин через 28 діб тверднення зростає на 18–23 %. За рахунок додаткової гідрофобізації ремонтних сумішей зростає довговічність бетонних та кам'яних конструкцій.

ТзОВ «Теріос» здійснено апробацію швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші ШБРС АН-1 на основі лужного портландцементу в кількості 2,0 т та проведено замонолічування закладних анкерних деталей. На території агрокомплексу ТОВ «АГРІНГРУП» із використанням ремонтної суміші на основі лужного портландцементу ТзОВ «Теріос» проведено роботи із відновлення пошкодженого фундаменту під силосами елеватору (с. Барвінкове, Харківської обл.). ПП «Терміт» здійснено випуск дослідної партії ремонтної розширної суміші в кількості 1600 кг і проведено ремонтні роботи з відновлення бетонних елементів конструкції. При виконанні герметизації швів між залізобетонними конструкціями та при введенні комунікацій в споруду застосовано ремонтну розширну суміш з КРД на основі лужного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$. Економічний ефект застосування ремонтної розширної суміші складає 204 грн/т. ТОВ «Рууф» впроваджено спеціальні безусадочні ремонтні суміші з гідрофобною добавкою для гідроізоляції підвального приміщення офісного центру.

Результати експериментальних досліджень і промислового впровадження використано в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисциплін «Виробнича база будівництва», «Сучасні будівельні матеріали і методи досліджень», «Наукові дослідження в будівництві» для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Ключові слова: ремонтна суміш, лужний алюмінійвмісний активатор, зола-винесення, лужний портландцемент, наноккомпозит, дрібнокристалічний еtringіт, деформації усадки та розширення, міцність зчеплення з основою, експлуатаційні властивості.

Список публікацій здобувача:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Кропивницька Т., Саницький М., Семенів М., Камінський А. Підвищення експлуатаційних властивостей цегляної кладки зовнішніх стін

огороджувальних конструкцій // *Науковий вісник будівництва. 2018. Т.91, №1. С. 146–151.*

2. Камінський А. Використання лужного прискорювача на основі алюмінату натрію в технології бетону // *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 57–62.*

Статті у науковому періодичному виданні, що включене до міжнародних наукометричних баз:

3. Kropyvnytska T., Semeniv R., Kotiv R., Kaminskyu A., Gots V. Studying the effect of nano-liquids on the operational properties of brick building structures // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 5/6(95). P. 27–32. ISSN 1729-3774. SCOPUS. (DOI: 10.15587/1729-4061.2018.145246).*

4. Kropyvnytska T., Semeniv R., Chekaylo M., Kaminskyu A. Impact of modifiers on the properties of brick masonry construction // *The international journal Sustainable development. 2018. Vol. 2. P. 77–82.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Кропивницька Т., Семенів Р., Камінський А. Вплив нанорідин на стійкість зовнішніх цегляних стін будівель і споруд щодо висолоутворення // *Збірник тез доповідей II міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». Харків, 2018. С.127-128.*

6. Кропивницька Т., Семенів Р., Камінський А., Гоц В. Ефективність використання модифікуючих речовин для захисту цегляних конструкцій // *Тези доповідей 7-ої міжнародної науково-технічної конференції. Харків, 2018. С. 195–197.*

7. Semeniv R., Kaminskyu A. Efficiency of the Modifiers Use for Protection of Brick Structures // *LEA`2018 «GAC». 2018. P. 111-112.*

8. Камінський А., Кропивницька Т., Семенів Р. Модифіковані бетони для ремонту конструкцій та споруд // *Тези доповідей 8-ої міжнародної науково-технічної конференції. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 153–154.*

9. Kropyvnytska T., Kaminskyi A., Semeniv R., Chekaylo M. The effect of sodium aluminate on the properties of the composite cements // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (TRANSBUD-2019)*, 708 012091.

10. Semeniv R., Kropyvnytska T., Kaminskyi A. Studying the effect of nano-liquids on the operational properties of brick building structures // *International Seminar on Circular Economy and Sustainability in Civil Engineering ISCESCE 2020 (Львів, 2020)*.

11. Камінський А. Система гідроізоляційних матеріалів «Мегатрон» // *Будексперт, Львів, 2020. № 02. С. 4*

Патент:

12. Спосіб визначення міцності зчеплення у кам'яній кладці в лабораторних умовах: пат. 102599 Україна. и 201808833;. опубл. 10.11.2019, Бюл. № 21. – 4 с. (Т. П. Кропивницька, Р. М. Семенів, А. Т. Камінський).

Annotation

Kaminskyi A. T. Repair mixes with the increased operational properties on the basis of alkaline Portland cement. – On rights of the manuscript.

The thesis for Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 192. Construction and Civil Engineering (19 – Architecture and Construction). – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2021.

The dissertation is devoted to solving a task to obtain the operation-enhanced shrink-resistant and expansible alkaline Portland cement-based mixtures for the repair of the concrete and masonry structures distinguished by their high durability and reliability. In order to justify the relevance of the problem, it fulfilled the analysis of the cement mixtures composition for the repair of the construction structures and their demolishing processes against a background of factors under the different operating conditions. It considered the ways to manage the particularities of the repair mixtures using the shrink-resistant and expansible gypsum-alumina-based cement. It reflected the pros and cons of the various types of the repair mixtures and

addressed the factors causing difficulty in expanding shrinkage deformation management under the different operating conditions as well as a longevity reduction for the renovated building structures.

It showed that the effective method for the swift repair and construction of the concrete facilities was the alkaline-activated cementing systems, which allowed gaining significant savings of tools, materials, and work-months both at the renovation stage and during the operation of buildings and facilities. It performed the analysis on applying the alkaline aluminum-contained accelerating agents which provided high early durability, but they could lead to increasing water consumption, voids content, and, as a result, reducing the longevity of the construction materials. It showed that optimization of the material and fractional compositions of the major mixture components provided necessary meso- and microstructure of solutions and allowed boosting the quality indicators for the construction composites. It justified applying the superplasticizing polycarboxylate agents against the background of a physical approach to reduce the water-cement ratio in order to obtain a durable cementing pattern of the shrink-resistant and expansible repair mixtures.

Analysis of known patterns in the field of building materials science allows us to put forward a scientific hypothesis about the possibility of a complex combination of aluminum-containing mineral additives, alkaline activators based on sodium aluminate and polycarboxylate superplasticizers for creating modified alkaline Portland cement systems with high early strength which allow to obtain repair non-shrinking and expanding mixtures that provide the required curing speed, adhesion strength to the substrate, crack resistance, water resistance, i.e. are characterized by improved performance and durability.

It was considered the characteristics of materials for repair non-shrinkage and expansion mixtures, namely Portland cements of different types of production of PJSC "Ivano-Frankivskcement", mineral aluminum-containing additives (fly ash, metakaolin), alkaline aluminum-containing curing activator $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ and superplasticizers. It was shown that the determination of physical-mechanical and construction-technical properties of alkaline Portland cements and repair non-shrink

and expanded repair mixtures was carried out in accordance with current regulations and generally accepted methods. Modern methods of physicochemical analysis, namely, X-ray diffractometry, thermogravimetry, scanning electron microscopy, etc. were used to study the processes of structure formation of repair non-shrinking and expanding mixtures. It was shown the general block diagram of researches which shows sequence of performance of work and reveals step by step the basic provisions concerning physicochemical features of processes of structure formation of an artificial stone on the basis of modified alkaline Portland cements, principles of creation of alkaline-aluminate nanocomposite C-A-N-H-PCE as the highly effective accelerator regulation of properties of repair mixes on the basis of alkaline Portland cement, development of non-shrink and wide repair mixes on the basis of modified alkaline Portland cements and research of their construction and technical properties.

The paper theoretically substantiates and experimentally confirms the possibility of obtaining fast-curing repair non-shrink mixtures with improved performance properties due to the development of alkaline Portland cements with the addition of limestone, the use of active mineral additive pozzolanic action (fly ash), alkaline aluminum-containing activator $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ and superplasticizer polycarboxylate type PCE, as well as highly effective repair expansion mixtures obtained by introducing a complex alkaline expansion additive $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]\text{-CaO-CaSO}_4\text{x}2\text{H}_2\text{O-PCE}$, taking into account technical and economic advantages.

The experimental investigations indicated if 1.5..3.0 wt. % of the hardening alkaline aluminum-contained activator $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ was put into the Portland cement with limestone CEM II/A-LL (W/C=0.5) a cement and sand composition mobility ratio decreased to 125-110 mm. Due to the ettringite - accelerated processes, the initial compression capacity increased to 7.5 and 10.0 MPa was evaluated in 14 and 24 hours, and, meanwhile, the strength reduction in 1.8 to 3.0 times compared with the composition was observed in 2; 7 and 28 days, which was caused by increasing of the stone voids content because of the enhanced binder water demand. It showed that extremely initial strength was enhanced to 9.6 MPa in 14

hours due to water reducing effect ($\Delta W/C=28.0\%$) after the polycarboxylate superplasticizing agent PCE inputted. However, enhancing $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ content up to 5.0 % wt made the cement and sand composition mobility ratio to be sharply reduced from 152 to 105 mm in the case of $W/C=0.50$ and the hardening target time was boosted to 45 min which was caused by a significant amount of the film-shaped hydro-aluminate phases of C_4AH_{19} formed under the increased pH (pH was increased from 12.5 to 13.2).

It exploited the various types of the high initial durable alkaline Portland cement supplemented with the hardening alkaline aluminum-containing activator $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$. It defined if 1.5 wt. % of $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ and the fly ash were put into the Portland cement composition supplemented with limestone in the case of $W/C=0.50$ (workability 170 mm) the hardening initial strength was constituted to 6.3 and 15.6 MPa in 12 and 24 hours, and the standard one – 54.6 MPa. It showed that in case of 1.0 wt. % of PCE input and due to water-reducing effect with $\Delta W/C=30.0\%$ (workability 170 mm) the strength was increased in 4.5 times (19.3 MPa) and in 2.3 times (35.0 MPa) in 12 and 24 hours. The compressive strength was increased in 1.8 times (51.2 MPa) in 2 days, and in 1.2 times (73.7 MPa) in 28 days; meanwhile, $R_{c1}/R_{c28}=47.5\%$; $R_{c2}/R_{c28}=69.4\%$. According to DSTU B EN 197-1 the modified alkaline Portland cement exploited was treated as high initially ($R_{c2}=38.2$ MPa) and normally ($R_{c28}=60.1$ MPa) durable and dealt with as class 52.5 R. The mathematic experimental design techniques showed that the optimized content of 1.5 wt. % of $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ and 1.0 % of PCE ensured to obtain the modified alkaline composition Portland cement with the high initial strength ($R_{c2}=32.0$ MPa, $R_{c28}=55.6$ MPa). The targeted process management for the initial structure formation of the alkaline Portland cement determined their improved construction and technical properties.

It discovered the mechanisms of the phased composition formation and the microstructure of the hydrosulfoaluminate cementing systems using the physical-chemical analysis methods. It showed the compressive combination of fly ash and limestone in the alkaline-accelerated cementing pattern made the initial structure

formation processes to be enhanced due to the formation of hydrocarboaluminates and alkaline zeolite-shaped hydro-aluminosilicates N-C-A-S-H. It justified a new approach for the targeted management processes of the cementing systems initial structure formation due to the input of the quality-efficient hardening accelerating agent synthesized by zol-gel aluminate nanocomposite technique C-A-N-H-PCE and classified as the engineering materials based on layered double hydroxides (CaAl LDH) and organic supplements which enabled to obtain shrink-resistant and rapidly hardening cement repair mixtures. According to the electron microscopy fact-findings, it defined that the finely dispersed and acicular crystals of the ettringite were mostly generated in the modified alkaline-accelerated cementing pattern due to the absorptive modification effect. It showed that during its hardening process their intensive binding was observed that facilitated to significantly increase the modified cement stone solidness and integrity due to a self-cementing effect. In this case, the repair mixture compression strength and crack resistance were enhanced. The aluminum-contained nanocomposite C-A-N-H-PCE put into the cementing system using CEM II/A-LL 42.5 provided a high initial (22.0 MPa in 12 hours) and standard (90.0 MPa in 28 days) strength if its capillary porosity was reduced to 11.9%.

Investigating the impact of the different graded size silica sand on the repair mixtures mesostructure formation and particularities found out that the graded size at the ratio of $M_{K1,25}:M_{K2,76}=25:75$ was treated as one having the highest solidness in bulk ($\rho_H=1533 \text{ kg/m}^3$) and compacted ($\rho_{\text{III}}=1690 \text{ kg/m}^3$) states and the lowest void coefficients as $V_I=42.2\%$ and $V_r=36.2\%$ respectively. It showed that silica sand $M_{K2,76}$ substituted with 25 wt. % of fly ash composed of $M_{K1,25}:M_{K2,76}=25:75$ led to increase the bulk solidness (1683 kg/m^3) and reduce the void coefficient to 35.3%. Based on a coherent analysis of the mathematical models classified by shrink and expansion hardening periods, capacity, and deformation, the shrink-resistant repair mixture compositions were designed on a basis of the alkaline Portland cement, for which the input of the optimal composition of supplements, namely 10 to 15 wt. %

of flue ash and 2.0 to 2.5 wt. % of C-A-N-H-PCE, provided the increased quality indicators.

It exploited the rapidly hardening shrink-resistant repair mixtures using the alkaline Portland cement and the optimized graded size sand. The investigations determined that the repair mixtures (with 24 mm in consistence) was specified with 80 to 100 min in hardening start, and with $R_{tb}=3.4$ MPa and $R_c=9.8$ MPa in 14 hours, $R_c=22.08$ MPa in 24 hours and $R_c=70.9$ MPa in 28 hours in a highly initiated durability; the adhesive strength to the base was constituted to 4.0 MPa, elasticity coefficient - $E_{cm}=51.7$ GPa, corrosive resistance - $K_{90}=1.2$, water-resistance - W16, and freezing resistance - F400. The rapidly hardening repair mixtures were treated by the reduced shrink deformations ($\Delta l/l=0.06$ mm/m) which allowed classifying them as shrink-resistant ones.

It exploited the comprehensive expansible supplement $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{PCE}$ for the expansible repair mixtures with the ettringite regulated kinetics. The scanning electron microscope investigation method showed that PCE put into the model system “ $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ” and “ $\text{CaO} - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ” due to the absorptive modification effect provided a synthesis of the acicular and finely dispersed ettringite crystals and enabled to manage the expanding processes for the cementing pattern of the repair mixtures. The experimental investigations determined that the input of 20–30 wt.% of KRD provided a high Dhardening speed rate, meanwhile the mixture hardening initiation reduced to 120 to 50 min, the expansion deformations were constituted to $\Delta l/l = 0.62$ to 1.25 mm/m, and the compression strength achieved 40.0 to 34.0 MPa. The expanding processes in the restricted space led to the mixture self-compaction, and after 28-day hardening, the compression / deflection strength increased in 18 to 23 %. Due to the additional hydrophobization for the repair mixtures, the longevity of the concrete and masonry structures was enhanced.

“Terios” LLC performed the approbation of the rapidly hardening shrink-resistant repair mixture using the alkaline Portland cement with 2.0 t in total and carried out the grouting of the embedded anchor items. At the territory of the

agricultural complex “AHRINHRUP” LLC “Terios” LLC performed the works to rehabilitate the damaged foundation under the elevator bins (Barvinkove village, Kharkiv region) using the alkaline Portlandcement-based repair mixtures. PE “Termit” made a pilot lot production of the expansible repair mixture with 1600 kg in total and performed the repair works to rehabilitate the concrete structure units. While encapsulating the joints between the reinforced concrete structures and embedding the utility systems into the building, the expansible КРД repair mixture based on the alkaline accelerating agent $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ was used. The economic impact of the expansible repair mixture applied was constituted to 204 UAH per t. “Ruuf” LLC introduced the special shrink-resistant repair mixtures with the hydrophobic agent “Mehatron” TM in order to perform the water isolation for the office centre basement.

The outcomes of the experimental investigations and the industrial implementation were used by Lviv Polytechnic National University in the educational process while studying the subjects “Production basis for construction”, “Modern building materials and research methods”, “Construction scientific investigations” for the students of the specialty 192 “Construction and Civil Engineering”.

Keywords: repair mixture, alkaline aluminum-containing activator, fly ash, alkaline Portland cement, nanocomposite, finely crystalline ettringite, shrink and expansion deformations, adhesive strength to the base, operational properties.

ЗМІСТ

ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
1.1. Особливості вибору складу цементних сумішей для ремонту будівель і споруд.....	28
1.2. Способи регулювання властивостей ремонтних сумішей на основі портландцементних систем	37
1.3. Лужні цементы для швидкого ремонту та зведення бетонних споруд	48
1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза	55
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	60
2.1. Характеристика матеріалів.....	60
2.2. Фізико-механічні випробування.....	66
2.3. Фізико-хімічні методи досліджень	70
РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ШТУЧНОГО КАМЕНЮ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ ЛУЖНИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ	71
3.1. Вплив прискорювачів тверднення на фізико-механічні властивості портландцементів різних типів.....	71
3.2. Оптимізація складів лужних портландцементів, модифікованих комплексною добавкою $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ – РСЕ	82
3.3. Фазовий склад та мікроструктура каменю на основі модифікованого лужного портландцементу з добавкою $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$	94
3.4. Принципи створення алюмінатного нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ як високоефективного прискорювача тверднення портландцементних систем.....	102
Висновки до розділу	111

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗУСАДОЧНИХ ТА РОЗШИРНИХ РЕМОНТНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ ЛУЖНИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ.....	114
4.1. Дослідження засобів регулювання властивостей ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу.....	114
4.2. Проектування складів ремонтних безусадочних сумішей на основі лужних портландцементів	119
4.3. Будівельно-технічні властивості ремонтних безусадочних сумішей на основі лужних портландцементів.....	126
4.4. Дослідження процесів структуроутворення в модельних розширних системах на основі алюмінату натрію.....	137
4.5. Технологічні та експлуатаційні властивості ремонтних розширних сумішей.....	151
Висновки до розділу	162
РОЗДІЛ 5. ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ЛУЖНИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ ТА РЕМОНТНИХ СУМІШЕЙ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	165
5.1. Дослідно-промислова апробація ремонтних сумішей на основі лужних портландцементів з підвищеними експлуатаційними властивостями.....	165
5.2. Техніко-економічні показники ремонтних сумішей на основі лужних портландцементів.....	174
Висновки до розділу	177
ВИСНОВКИ.....	179
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	185
ДОДАТКИ.....	199

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CEM I	–	портландцемент згідно EN 197-1:2000
CEM II/A-LL	–	портландцемент з вапняком згідно EN 197-1:2000
ISTRA-40 (ГЦ-40)	–	глиноземистий цемент
ЗВ	–	зола-винесення
МК	–	метакаолін
Na[Al(OH) ₄]	–	тетрагідроксоалюмінат натрію
PCE	–	полікарбоксилатний суперпластифікатор
ЛСТ	–	лінгосульфонат технічний
КРД	–	комплексна розширна добавка
ШРБС	–	швидкотверднуча ремонтна безусадочна суміш
S _{пит}	–	питома поверхня
В/Ц	–	водо-цементне відношення
НГТ	–	нормальна густина тіста
τ _п , τ _к	–	терміни початку та кінця тужавіння
РК	–	розплив стандартного конуса
П	–	рухомість
K _{об}	–	коефіцієнт водовідділення
R _c	–	міцність при стиску
R _{bt}	–	міцність при згині
K _c	–	коефіцієнт тріщиностійкості
РФА	–	рентгенофазовий аналіз
ДТА	–	диференційно-термічний аналіз
РЕМ	–	растрова електронна мікроскопія
ІЧ	–	інфрачервона спектроскопія
W	–	водонепроникність
F	–	морозостійкість
K _{ст,90}	–	коефіцієнт корозійної стійкості за міцністю при стиску через 90 діб тверднення

ВСТУП

Актуальність теми. Збереження будівельного фонду країни з кожним роком набуває все більшого значення, при цьому важливе місце відводиться бетонним та кам'яним конструкціям, які відзначаються високою міцністю та надійністю. В той же час, найважливішою особливістю таких будівельних конструкцій може бути неоднакова довговічність складових їх елементів, що призводить до руйнування будівель та споруд з віком експлуатації та викликає необхідність проведення вторинного, додаткового ремонту. Для відновлення будівельних конструкцій використовуються спеціальні ремонтні суміші, в результаті чого відбувається відновлення їх несучої здатності і геометричної форми. Правильний вибір ремонтних сумішей з врахуванням дії комплексу експлуатаційних факторів дозволяє отримати значну економію засобів, матеріалів та трудозатрат як на стадії реконструкції, так і в процесі експлуатації будівель та споруд. При цьому слід також враховувати принцип сумісності ремонтних матеріалів і ремонтваної основи, що передбачає створення складної системи, основними елементами якої є матеріал ремонтваної конструкції, поверхня контакту та компонентний склад ремонтних сумішей.

На даний час найбільше поширення отримали цементні ремонтні суміші, переваги яких полягають у простоті їх приготування. Разом з тим, традиційні портландцементи при твердненні характеризуються високими деформаціями усадки внаслідок висихання і ущільнення колоїдальних продуктів їх гідратації. Тому для ремонту та відновлення в таких випадках, коли усадочні деформації неприпустимі, необхідно застосовувати безусадочні та розширні цементні суміші. На сьогоднішній день відомі склади таких цементів на основі портландцементу, глиноземистого цементу і гіпсу, в яких фактором, що сприяє розширенню, є утворення крупних кристалів еtringіту. В той же час, основними недоліками таких спеціальних цементів є енергоємність технології виробництва, висока вартість компонентів, складність регулювання

деформації усадки-розширення при експлуатації в різних умовах, а також недостатня довговічність.

Головними критеріями сучасного будівництва є висока швидкість виконання ремонтних та відновлювальних робіт, а також довговічність і експлуатаційна надійність будівель і споруд. Одним з методів регулювання тверднення цементних ремонтних сумішей, особливо збільшення їх ранньої міцності та водонепроникності є застосування лужних цементів. Суміші на їх основі застосовуються для капітального ремонту найскладніших конструкцій, які перебувають в різноманітних умовах експлуатації. В той же час, лужні прискорювачі тужавіння часто викликають збільшення водопотреби в'язучого, підвищення пористості цементного каменю, що призводить до зниження кінцевої міцності бетонів на основі швидкотверднучих портландцементів та довговічності будівельних споруд.

Узагальнення результатів досліджень у області будівельного матеріалознавства свідчить, що вирішення завдання одержання ефективних цементних ремонтних сумішей значною мірою досягається за рахунок розроблення основ технології модифікованих лужних портландцементів широкого речовинного складу, яка базується на використанні мінеральних алюмінійвмісних та сульфатних добавок, лужно-алюмінатного прискорювача та суперпластифікатора полікарбосилатного типу з метою інтенсивної генерації дрібнодисперсних кристалів еtringіту в ранній період структуроутворення в напрямку формування більш щільної мінімально напруженої мікроструктури цементуючої матриці безусадочних та розширних композитів. Тому актуальним науковим і практичним завданням є розроблення ефективних, економічно доцільних, низькоенергоємних швидкотверднучих ремонтних сумішей на основі безусадочних та розширних модифікованих лужних портландцементних в'язучих.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.
Дисертація виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт «Технології створення низькоемісійних багатокomпонентних цементів та

модифікованих бетонів і будівельних розчинів на їх основі» (номер держреєстрації 0117U007178), «Лужно-сульфатноактивовані композиційні цементи з високою ранньою міцністю та низькоенергоємні бетони на їх основі» (номер держреєстрації 0119U002253) відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України та НДР «Розроблення та дослідження модифікованих цементів для мурувальних і штукатурних робіт та будівельних розчинів на їх основі» відповідно до договору № 0528 (номер держреєстрації 0115U004209); «Дослідження властивостей бетонів і будівельних розчинів з добавками алюмінійвмісних груп» (номер держреєстрації 0117U007566).

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення швидкотверднучих безусадочних та розширних ремонтних сумішей з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі модифікованих лужних портландцементів різного речовинного складу за рахунок комплексного поєднання алюмінату натрію та суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу в напрямку формування щільної мікроструктури цементуючої матриці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз досліджень особливостей складів цементних сумішей для ремонту будівель і споруд та способів регулювання їх властивостей;

- дослідити вплив лужного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та полікарбоксилатного суперпластифікатора РСЕ на фізико-механічні властивості портландцементів;

- розробити лужні портландцементи різних видів з високою ранньою міцністю та дослідити їх будівельно-технічні властивості;

- визначити принципи створення алюмінатного нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ як високоефективного прискорювача тверднення портландцементних систем;

- встановити фізико-хімічні закономірності процесів структуроутворення штучного каменю на основі швидкотверднучих лужних портландцементів з високою ранньою міцністю;

- запроєктувати склади ремонтних безусадочних сумішей на основі лужних портландцементів;

- дослідити показники якості ремонтних безусадочних сумішей на основі лужних портландцементів;

- визначити процеси взаємодії в модельних розширних системах $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{PCE}$;

- дослідити експлуатаційні властивості ремонтних розширних сумішей на основі лужних портландцементів;

- здійснити промисловий випуск швидкотверднучих ремонтних сумішей на основі лужних портландцементів, провести практичну апробацію та обґрунтувати їх техніко-економічну ефективність.

Об'єктом досліджень є процеси регулювання властивостей модифікованих безусадочних та розширних ремонтних сумішей на основі лужних портландцементів за рахунок поєднання мінеральних алюмінійвмісних складників, алюмінатного нанокompозиту С-А-Н-Н та полікарбоксилатного суперпластифікатора РСЕ в напрямку створення ефективних конструкційних матеріалів нового покоління.

Предметом досліджень є лужні портландцементи та модифіковані ремонтні суміші, що дозволяють якісно проводити відновлювальні інженерно-технічні роботи згідно сучасних тенденцій у будівництві.

Методи досліджень. Для виконання експериментальних результатів застосовано комплекс сучасних методів фізико-хімічного аналізу: рентгенівську дифрактометрію, термогравіметрію, растрову електронну мікроскопію та ін. Визначення фізичних, фізико-механічних та будівельно-технічних властивостей лужних портландцементів та ремонтних безусадочних і розширних ремонтних сумішей проведено згідно з діючими нормативними документами і загальноприйнятими методиками. Оптимізацію складу

ремонтних сумішей проведено із застосуванням методу експериментально-статистичного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

- теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість одержання вискоефективних безусадочних сумішей для швидкого ремонту бетонних та кам'яних конструкцій на основі лужного портландцементу СЕМ II/A-LL та золи-винесення за рахунок комплексного модифікування в'язучої системи добавками гідроалюмінату натрію та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу з врахуванням пониження водопотреби для забезпечення максимальної міцності при мінімальних розмірах пор і капілярів;

- вперше запропонований новий підхід до направлено регулювання процесів раннього структуроутворення в цементуючих системах за рахунок введення в якості ефективного активатора тверднення синтезованого за методом золь-гель технології алюмінатного нанокompозиту С-А-Н-Н – РСЕ, який відноситься до класу інженерних матеріалів на основі шаруватих подвійних гідроксидів (CaAl LDH) та органічних добавок, що створює можливість отримання безусадочних швидкотверднучих цементних ремонтних сумішей;

- виявлені закономірності впливу комплексної розширної добавки CaO - Na[Al(OH)₄] – CaSO₄·2H₂O – РСЕ на процеси гідратації та тверднення модифікованих лужних портландцементних систем та встановлено, що при цьому в ранній період структуроутворення за рахунок явища адсорбційного модифікування естерами полікарбоксилатів інтенсивно генеруються дрібнодисперсні кристали еtringіту, які забезпечують збільшення щільності, зниження капілярної пористості цементного каменю та підвищення довговічності матеріалу;

- отримано комплекс експериментально-статистичних моделей технологічних та фізико-технічних показників ремонтних сумішей на основі лужних портландцементних систем, що кількісно характеризують дію

високоалюмінатної золи-винесення, гідроалюмінату натрію, полікарбоксилатних суперпластифікаторів в напрямку забезпечення заданих властивостей, та показано, що в даних суперпластифікованих цементуючих системах прискорене наростання міцності на стиск/згин відбувається завдяки поєднанню ефектів мікронаповнювача та самоармування з утворенням додаткової кількості гідратних фаз в неклінкерній частині цементуючої матриці.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено лужні портландцементи II типу різних груп з вмістом лужного натрієвого алюмінійвмісного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$, що одержуються за «бетонною» технологією та експериментально підтверджено технічні та економічні переваги даних в'яжучих порівняно із звичайними портландцементами;

- за результатами досліджень розроблено проект технічних умов (ТУ У 23.5-02071010-178:2020) «Модифіковані швидкотверднучі ремонтні суміші на основі лужного портландцементу». Швидкотверднучі ремонтні безусадочні суміші типу ШРБС одержуються шляхом змішування оптимізованого гранулометричного складу дрібного заповнювача, портландцементу з вапняком, золи-винесення та алюмінійвмісного нанокompозиту C-A-N-H-PCSE;

- розроблено склади ремонтних безусадочних сумішей на основі лужного портландцементу з покращеними експлуатаційними характеристиками: підвищеною ранньою міцністю ($R_{c14\text{год}}=9,8$ МПа, $R_{c24\text{год}}=22,1$ МПа), пониженими деформаціями усадки-розширення, підвищеною водонепроникністю W16, адгезійною міцністю (4-5 МПа), сульфатостійкістю ($K_{ct90}=1,2$), морозостійкістю F400;

- здійснено апробацію на ПП «Терміт» ефективних швидкотверднучих ремонтних безусадочних сумішей на основі лужного портландцементу з високою ранньою міцністю для замонолічування закладних анкерних деталей з вирішенням завдань забезпечення високої швидкості тверднення, понижених

деформацій усадки-розширення, підвищення адгезії розчину, водонепроникності, а також міцності і довговічності;

- розроблено склади спеціальних ремонтних розширних сумішей з модифікованою комплексною розширною добавкою на основі лужного портландцементу та на ПП «Терміт» здійснено їх апробацію при відновленні бетонних елементів конструкції. При виконанні герметизації швів між елементами залізобетонних конструкцій застосовано ремонтну розширну суміш з КРД на основі лужного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$; ТзОВ «РУУФ» впроваджено спеціальні безусадочні ремонтні суміші з гідрофобною добавкою для гідроізоляції підвального приміщення офісного центру;

- теоретичні положення дисертаційної роботи та результати експериментальних досліджень і промислового впровадження використовуються в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисциплін «Виробнича база будівництва», «Сучасні будівельні матеріали і методи досліджень», «Наукові дослідження в будівництві» для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні експериментальних досліджень, обробленні одержаних даних, впровадженні результатів роботи у виробництво. Постановка завдання та формулювання основних положень і висновків проводились під керівництвом наукового керівника д.т.н., доц. 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] – дослідження експлуатаційних властивостей будівельних розчинів; [2] – дослідження впливу лужного прискорювача на основі алюмінату натрію та РСЕ на фізико-механічні властивості сумішей методом математичного планування експерименту; [3, 10] – оптимізація складу нано-рідин та дослідження їх впливу на показники водопоглинання та капілярного

підсмоктування будівельних композитів; [4, 7] – визначення міцнісних і деформативних властивостей кладки; [5, 11] – дослідження впливу нанокompозитів на показники гідрофобності зовнішніх стін будівель і споруд; [6, 8] – визначення показників якості модифікованих бетонів для ремонту конструкцій та споруд; [9] – дослідження впливу алюмінату натрію на властивості композиційних цементів; [12] – патентний пошук способу визначення міцності зчеплення у кам'яній кладці в лабораторних умовах.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях: International joint forum LEA'2018 & YSTCMT'2018 (Львів, 2018), II Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні» (Харків, 2018), 7-8-ма Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2018, 2019), IOP Conference Series «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» TRANSBUD-2019 (Харків, 2019), Будівельний форум (Львів, 2016-2020 pp.), International Seminar on Circular Economy and Sustainability in Civil Engineering ISCESCE 2020 (Львів-Щецін, Польща, 2020).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 2 статті у наукових фахових виданнях України, 1 – у науковому періодичному виданні іншої держави, 1 – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 7 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій (одна з яких входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus) та патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 218 сторінок та включає 33 таблиці, 85 рисунків, список використаних джерел із 152 найменування на 13 сторінках і 8 додатків.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Особливості ремонтних сумішей на основі портландцементів

Розвиток сучасної системи господарювання неможливий без зведення нових та реконструкції існуючих будівель та споруд [4, 9, 41, 50, 58, 90]. При цьому виникає важливе питання їх надійної та безпечної експлуатації, а також зменшення витрат на відновлення та зведення. Згідно ДБН А.22-3:2014 будівництво включає реконструкцію, капітальний ремонт, реставрацію технічне переоснащення об'єктів будівництва та ін. Бетон та цементний розчин широко використовуються під час проведення різних робіт у будівництві [2, 3, 12, 15, 81, 116].

Серед сучасних будівельних матеріалів важливе місце займають спеціальні будівельні розчини, які одержують за технологією сухих будівельних сумішей [20, 60]. Згідно ДСТУ Б В.2.7-126:2011 суміші за призначенням поділяють на групи: для мурування, ремонту поверхонь із бетону та розчину, ін'єктування мінеральних та полімерних бетонних поверхонь, заповнення швів, облицювання, штукатурення, анкерування дрібних будівельних та оздоблювальних елементів, улаштування гідроізоляції та ін. За основною в'язучою речовиною суміші поділяють на цементні, гіпсові, вапняні (мінеральні), полімерні та складні (одночасне використання різних видів в'язучих або спеціально розроблених в'язучих композицій). За компонентним складом ремонтні суміші поділяються на однокомпонентні - цементні суміші; двокомпонентні - епоксидні і поліуретанові; трикомпонентні - деякі суміші на основі поліуретану. Перевагою однокомпонентних складів є простота приготування ремонтного розчину: суміш розбавляється водою в потрібній пропорції.

Властивості сумішей визначаються спеціальними добавками [19, 20]. За цим параметром суміші поділяються на кілька категорій: морозостійка (витримує низькі температури і оптимальна для зовнішніх робіт); швидкотверднуча - відрізняється високою швидкістю втрати пластичності (схоплювання), що і забезпечує прискорення процесу набору міцності (твердіння); посилена / особливо міцна - володіє підвищеними характеристиками міцності та сприймає значні механічні навантаження; водостійка - не чутлива до тривалого впливу вологи, використовується при реставрації фасадів будівель і приміщень з підвищеною вологістю (басейни, підвали, резервуари); гідрофобна (водовідштовхувальна) - застосовується для гідроізоляції та ліквідації протікання в бетонних конструкціях; безусадочна – оптимальна заміна для сумішей з усадкою до 1,0 мм/м; тиксотропна - відрізняється підвищеною адгезією і призначена для реставрації вертикальних і похилих поверхонь; еластична - використовується при ремонті конструкцій, що зазнають динамічні навантаження (в тому числі басейнів, мостів, портових і гідротехнічних споруд); екологічно безпечна - не має негативного впливу на здоров'я людини.

Ремонтні суміші за властивостями, що мають значний вплив на формування та роботу ремонтної системи поділяють на дві групи: технологічні та експлуатаційні [12, 44, 60]. Технологічні властивості забезпечують можливість застосування ремонтних сумішей при певних технологіях нанесення, збереження однорідності на весь час вкладання. До основних технологічних характеристик можна віднести: легкоукладальність (в'язкість, пластичність, розплив або осадка конуса); життєздатність (зміна реологічних властивостей в часі); седиментаційна стійкість (відсутність розшарування та осідання компонентів різної густини). Основні технологічні властивості ремонтних сумішей впливають на формування структурно-механічних властивостей та ефективної площі контакту матеріалу з основою (підкладкою). Як приклад ручне нанесення тиньку, що буде мати значний вплив на дефектність контакту ремонтної суміші через її пластичність. Особливістю

ручного нанесення є низька інтенсивність впливу на ремонтну суміш. У разі недостатньої пластичності суміш буде складно ущільнити та усунути дефекти контакту. Під час ін'єктування ремонтної суміші в тріщину, її текучість буде впливати на ймовірність проникнення в найдрібніші дефекти структури основи.

Експлуатаційні властивості стають визначальними при подальшій роботі ремонтної суміші, після початку тверднення та втрати необхідності контролю технологічних властивостей. До основних експлуатаційних властивостей відносять: модуль пружності; показники усадочних деформацій; коефіцієнт температурних деформацій; водо-, паро-, газопроникність; морозостійкість; хімічна та корозійна стійкість; міцність зчеплення з «старим» бетоном; кінетика набору міцності; стандартна міцність ремонтної суміші [80]. Експлуатаційні характеристики повинні забезпечувати роботу ремонтної суміші протягом всього періоду експлуатації, що включає: можливість перерозподілу напружень на межі контакту між «старим» та «новим» бетоном; збереження суцільності контакту при виникненні деформацій між матеріалами під дією зовнішніх факторів; підвищення стійкості відновлених елементів до агресивних впливів [18, 65, 77, 110].

Вплив характеристик ремонтної суміші на надійність та довговічність роботи системи «основа - ремонтна суміш - середовище» оцінюється за їх сумісністю з відповідними будівельними матеріалами основи. Деформаційна сумісність забезпечує здатність відновленої ділянки зберігати форму в разі виникнення певних деформацій та змін розмірів її елементів. Руйнування в ремонтній системі або окремих її складових відбувається внаслідок: надлишкових усадочних деформацій (пластична усадка); надлишкового розширення в ремонтних сумішах; надлишкового термічного розширення ремонтної суміші при твердненні; надлишкової температури деформації ремонтного матеріалу внаслідок коливань температури середовища. Усадочні та температурні деформації спричиняють виникнення напружень у ремонтній системі, на характер яких значною мірою впливають співвідношення

деформативності матеріалів. За показником механічної сумісності ремонтні суміші можна розділити за двома напрямками використання: неконструкційний ремонт – сприйняття навантаження ремонтною сумішшю не передбачається (ізоляційні покриття, відновлення захисного шару бетону); конструкційний ремонт – розчин сприймає силові навантаження, що передавалися на зруйнований бетон [4, 13, 41, 52].

Поверхня «старого» бетону – це контактна міцність поверхневого шару (наявність ослабленої плівки на поверхні конструкції). Якість такої поверхні оцінюється рухомістю бетонної суміші, кількістю цементного тіста, стійкістю до розшарування та водовідділення, а також деструкцією поверхневого шару внаслідок циклічних впливів, корозійним пошкодженням поверхні контакту [114, 123]. Вплив шорсткості поверхні основи на міцність залежить від її характеру, напрямку діючих сил та виду навантаження у зоні контакту. Характер шорсткості впливає на величину площі розвиненої поверхні (збільшення площі контакту за рахунок виступів та впадин), а також дефектністю контакту між матеріалами.

Міцність зчеплення ремонтної суміші з основою залежить від багатьох факторів, що включають характеристики бетону основи, властивості ремонтного матеріалу та особливості його нанесення, а також особливості взаємодії матеріалів, а саме в період контакту та формування структури ремонтної системи. Здатність ремонтної суміші сформувати з бетонною основою контакт із достатньою міцністю зчеплення визначається адгезійною сумісністю. Якість роботи системи «ремонтна суміш - контактна зона - основа» є визначальною і залежить від граничних напружень, а саме, показник міцності при контакті повинен бути не меншим, ніж відповідні значення за даним показником складових ремонтної суміші [8, 51, 53].

Усунення дефектів та пошкодження поверхонь бетонних або залізобетонних конструкцій за технологію ремонтних робіт можна розділити на такі способи: торкретування конструкції; омонолічування конструкції (бетонна сорочка); місцеве нанесення захисних матеріалів; повне покриття

поверхні ремонтними сумішами. Товщина шару (мінімальна / максимальна) визначає розміри дефектів, які усуваються за рахунок застосування ремонтної суміші. Цей показник коливається в межах 1-100 мм залежно від призначення ремонтної суміші конкретного складу. Оптимальна товщина шару підбирається з врахуванням ступеня руйнування бетонної поверхні: тріщини глибиною до 5 мм, окремі раковини, забруднення (1 ступінь); відколи і лущення глибиною 10-20 мм (2 ступінь); тріщини глибиною 20-40 мм (3 ступінь); руйнування глибиною 40-100 мм (4 ступінь); глибина пошкоджень становить 40 см - повне оголення арматури (5 ступінь), де ремонтні суміші є вже неефективні.

Торкретування є одним із найбільш ефективних способів для відновлення та захисту поверхонь конструкції, що досягається високою якістю як самого матеріалу, так і його контакту з основою [115, 135]. Процес торкретування полягає в механічному нанесенні (тиск стиснутого повітря - 0,15-0,20 МПа) на поверхню конструкції шарів цементного розчину – торкрету або при набризгу бетонної суміші (тиск нанесення більший в 1,5 рази). Шляхом торкретування утворюють зовнішній високощільний захисний шар бетону або розчину, здійснюючи ремонт пошкоджених поверхонь залізобетонних елементів конструкцій. Основною перевагою торкретування є повна механізація процесу. Для проведення торкретування використовують спеціальні багатокомпонентні модифіковані цементно-піщані розчини складу 1:2...1:6 (максимальна крупність заповнювача - 10 мм) з різноманітними добавками (активні мінеральні добавки, полімерні добавки, мікроармування; пластифікуючі, прискорюючі, водоутримувальні добавки) у вигляді готової суміші, яку замішують з водою вже на будівельному майданчику або доставляють товарну суміш із бетонного вузла. Технологію торкретування застосовують: при ремонті та підсиленні конструкцій; влаштуванні захисних покриттів (антикорозійних, гідроізоляційних, вогнестійких); закріплення гірничих виробок під час проходження тунелів у гірничо-видобувній галузі.

Останнім часом для швидкого будівництва «друку» будівель та споруд

застосовується інноваційна технологія 3D-друк, яка дозволяє проводити роботи за технологією екструзії шляхом пошарового нанесення бетонної суміші [120, 145]. В якості будівельного матеріалу використовується високотехнологічна бетонна суміш з використанням лише дрібного заповнювача, особливістю якої є висока текучість. Використання технології 3D-друку забезпечує екологічність - будівельні 3D-принтери використовують сонячну енергію і при цьому виділяється незначна кількість CO₂, доступне і швидко зведене житло, зниження витрат на будівництво в 2,5-2,7 рази, зменшення відходів будівництва, а також архітектурні рішення та гнучкість дизайну. При цьому для доставлення сумішей бетононасосами, забезпечення їх високої технологічності, прискореного тужавіння, а також високої міцності конструкції в ранньому віці виникає необхідність застосування високовартісних спеціальних добавок-модифікаторів [93, 118, 127].

Тріщини є найбільш поширеними дефектами та пошкодженнями в бетонних та залізобетонних конструкціях. Ефективне відновлення конструкцій із тріщинами може здійснюватися із застосуванням спеціальних модифікованих цементних сумішей [71, 72, 57]. Здатність ремонтної суміші як системи залежить від її цілісності, що забезпечується щільним контактом між шарами із достатньою силою зчеплення. Для захисту швів у бетонних конструкціях, а також в цегляній і кам'яній кладках широко застосовується гідроізоляція [69]. Згідно ГБН В.2.3-218-003:2010 гідроізоляція – це захист будівельної конструкції від проникнення води; водонепроникний бетон має забезпечити марку за водонепроникністю не нижче W12. Вид ремонту будівель чи споруд залежить від стану конструктивних елементів, існуючої гідроізоляції та стану несучих конструкцій. Згідно СОУ 35417345 91.080.40-002:2017 гідроізоляційна проникаюча суміш суха будівельна виготовляється з використанням цементного в'язучого або змішаних мінеральних в'язучих, що містять заповнювачі, наповнювачі та хімічні компоненти і призначена для відновлення та влаштування гідроізоляції бетонних та залізобетонних конструкцій з розкриттям тріщин до 0,4 мм за рахунок підвищення

водонепроникності, корозійної стійкості, морозостійкості бетону, а також його здатності до «самолікування» тріщин. Розроблення та виробництво таких сумішей вперше здійснила компанія ICS / Penetron International Ltd (США). На даний час відомим холдингом з виробництва матеріалів для системи гідроізоляції є ЗАТ «Група Компаній "Пенетрон"».

Авторами Руновою Р.Ф. та Носовським Ю.Л. [60] розглянуто фізико-хімічні основи будівельних розчинів нового покоління та розкриті базові рецептури усіх різновидів спеціальних сумішей. В роботах Гоца В.І., Дворкіна Л.Й. та ін. [12, 15] висвітлено сучасні уявлення про особливості технологічних рішень з виготовлення бетонів, будівельних розчинів та розглянуто проблеми підвищення їх довговічності при дії агресивних середовищ.

Для підвищення міцності на розтяг при згині до складу мінеральних цементних сумішей додають фібру. Дослідженнями Дерев`янку В.Н. та ін. [18] показано, що використання базальтового волокна в складі цементно-піщаного розчину дозволяє впливати на міцнісні та деформативні характеристики композиційного матеріалу. Дані свідчать, що базальтове волокно забезпечує тривимірне зміцнення розчину порівняно з традиційною арматурою, яка забезпечує лише двохвимірне зміцнення. Саницьким М.А та ін. [63] показано, що введення базальтового волокна забезпечує підвищену довговічність будівельних композитів. При цьому знижуються усадочні деформації, значно зростає тріщиностійкість, ударна в'язкість. В той же час, такі розчини не мають необхідної швидкості тверднення.

Дослідженнями Шейніча Л.О., Приймаченко А.С. та Пушкарьової К.К. [78] встановлено, що вплив комплексної алюмосилікатної добавки (зола-винесення + метакаолін) у кількості 7-15% дозволяє зменшити тепловиділення та деформації усадки бетону. Авторами Дворкіним Л.Й., Руновою Р.Ф. та ін. [17] розроблені склади сухих сумішей будівельних для влаштування покриття промислових підлог будівель, ефективність яких визначається покращенням показників якості цементуючої матриці шляхом введення комплексного модифікатора.

Пушкарьовою К.К. та Суханевич М.В. [54] розроблено рецептури та досліджено експлуатаційні властивості двокомпонентних гідроізоляційних покриттів підвищеної еластичності на основі композиційних цементів (оптимальний склад: 50-55 % портландцементу, 15-22 % золи-винесення, 25-30% шлаку) та стирол-акрилових дисперсій різного складу. Показано, що одним з перспективних способів покращення властивостей гідроізоляційних сумішей на основі мінеральних в'язучих речовин є направлене регулювання їхньої структури на мікрорівні - шляхом модифікування цементуючої матриці добавками, які здатні направлено впливати на склад та морфологію продуктів гідратації штучного каменю та отримання необхідних експлуатаційних властивостей, а також на мезорівні – за рахунок регулювання гранулометрії заповнювача з метою одержання щільного непроникного матеріалу. Крім цього ефективним способом вдосконалення гідроізоляційних матеріалів з цементно-полімерною матрицею є направлене регулювання структури та властивостей матеріалу на нанорівні для отримання довговічного і надійного захисту бетону [55, 117, 130, 131].

Дослідженнями Суханевич М.В. [68] встановлено, що введення вуглецевих нанотрубок забезпечує можливість нанорівневого регулювання структури та властивостей, що дозволить вирішити проблему адгезії покриття до старого бетону, нівелювати границю поділу в системі «покриття-основа» та продовжити термін експлуатації споруд. Марціх А.С. [40] розроблено наномодифіковані гідроізоляційні розчини на основі портландцементів з комплексною добавкою на основі неочищених вуглецевих нанотрубок. При застосуванні портландцементу з гранульованим доменним шлаком (до 35%) та алюмосилікатів у вигляді бентонітової глини - до 7,5% та дисперсії неочищених вуглецевих нанотрубок в модифікаторах спостерігається підвищення міцності розчину на стиск / згин на 32/36%, водонепроникності – на 26%, міцності зчеплення з основою - на 40 %, зменшення усадки - 36%. В той же час, такі наномодифіковані гідроізоляційні розчини мають спеціальне

застосування для тонкошарових гідроізоляційних покриттів і характеризуються підвищеною собівартістю.

Враховуючи вплив навколишнього середовища, механічні руйнування (недотримання технології при приготуванні розчину), значні навантаження з часом призводять до руйнування і стійких бетонних конструкцій з часом [56]. Для відновлення первісної якості поверхні бетонних конструкцій застосовуються спеціальні ремонтні суміші [69]. Завдяки використанню таких матеріалів під час реконструкції бетону, немає необхідності повністю замінювати пошкоджену ділянку.

Структура ремонтних розчинів дозволяє з'єднатися з бетонною основою на тривалий час. Основними характеристиками таких відновлювальних з'єднань є атмосферостійкість, високий ступінь адгезії, довговічність, несприйнятливність до вологи і морозостійкість. Такі ремонтні суміші можна класифікувати за напрямками застосування, зокрема для відновлення бетонних систем, що перебувають під навантаженням; реорганізації підлогових бетонних покриттів; попередження залізобетонних систем від виникнення корозії. Відомо, що одержання одночасно всіх необхідних параметрів в ремонтній суміші дуже важко. Так, швидке набирання міцності ремонтної суміші (40-50 МПа) протягом доби може призвести до зниження довговічності, а саме руйнування та втрати міцності вже через декілька місяців. З іншої сторони, при отриманні розчину дуже високої міцності (80-90 МПа) може призвести до втрати технологічних властивостей і ускладнення нанесення суміші звичайними будівельними методами. Тому необхідно дотримуватись балансу між технологічністю нанесення тиксотропних ремонтних сумішей, кінцевою міцністю, швидкістю набору міцності і довговічністю відремонтованої конструкції [152]. При цьому ремонтні суміші мають характеризуватися безусадочністю, високою морозостійкістю і водонепроникністю.

В той же час, однією з важливих характеристик є принцип сумісності ремонтних матеріалів і основи, що підлягає ремонту. Так, під час вибору

матеріалів для ремонту необхідно враховувати створення складної системи, основними елементами якої є: основа конструкції, що піддається ремонту; поверхня контакту і система ремонтних матеріалів [52]. При цьому слід відзначити, що матеріали для проведення ремонтних робіт переважно відрізняються від матеріалу основи. Тому основною вимогою для виконання якісного ремонту та важливою умовою тривалої експлуатації відремонтованого бетону є забезпечення сумісності ремонтних матеріалів з пошкодженою основою як в затверділому стані, так і в процесі тверднення. В той же час, така комплексна система повинна витримувати різні впливи навколишнього середовища, а також експлуатаційні навантаження і при цьому не втрачати своїх властивостей, не руйнуватися протягом тривалого часу [42]. Неправильне проектування ремонтних сумішей, і як наслідок, несумісність матеріалів є частою причиною повторного руйнування конструкції. Тому виникає необхідність провести пошук рецептурних рішень для регулювання властивостей ремонтних сумішей на основі портландцементних систем, зокрема швидкості тверднення та довговічності.

1.2. Способи регулювання властивостей ремонтних сумішей на основі портландцементних систем

Більшість ремонтних сумішей використовуються при зовнішніх і внутрішніх роботах для усунення вибоїни, тріщин, порожнеч, раковини та ін. пошкоджень бетонної чи розчинової поверхонь [16, 20, 31]. В результаті відбувається відновлення несучої здатності і геометричної форми бетонних і залізобетонних конструкцій та покращення експлуатаційних властивостей бетону (міцність, водонепроникність, морозостійкість). Окремі добавки використовуються для гідроізоляції конструкцій. Традиційні цементи при твердненні характеризуються високими деформаціями усадки внаслідок

висихання і ущільнення колоїдальних продуктів їх гідратації, що може призводити до появи тріщин в місцях з'єднання бетонних і залізобетонних елементів споруд, що порушує монолітність конструкції. Зменшення наслідків усадки можна досягнути рядом конструктивних заходів - це збільшення арматури в конструкції, влаштування температурно-усадочних швів, а також при застосуванні безусадочних і розширних цементів. Необхідність застосування таких цементів виникає при омонолічуванні збірних залізобетонних елементів, відновленні залізобетонних конструкцій, влаштуванні торкрет болтів, закладення тріщин, гідроізоляції підземних споруд, щільних стиків у збірних бетонних та залізобетонних конструкціях, підсилення конструкцій і т.д. Безусадочні цементы при твердінні повинні не лише компенсувати усадку бетону, але і досягати такого розширення, щоб виріб отримував необхідний напружений стан протягом тривалого періоду експлуатації.

Розробленню і дослідженню безусадочних та розширних цементів на основі портландцементу, глиноземистого цементу і гіпсу присвячені роботи В.В. Михайлова, П.П. Буднікова, І.В. Кравченко, Т.В. Кузнецової, А.А. Пашенко, П. Мчедлова-Петросяна, В.І. Бабушкіна, К.С. Кутателадзе, А.Е. Шейкіна, а також Г. Лосье, П.К. Мета, М. Полівка, Г.Л. Калоусека і ін.

На даний час розширні та наружувальні цементы отримують на основі портландцементу, глиноземистого цементу, їх композицій з використанням розширних компонентів і добавок. Відомим в'язучим для отримання розширних цементів є глиноземистий цемент [38, 48, 58, 59]. Глиноземистий цемент (ГЦ) можна розділити на високоалюмінатний (High Alumina Cement) або кальційалюмінатний (Calcium Alumina Cement) цементы. Особливістю під час виробництва глиноземистого цементу є спеціальна сировина для випалу суміші (температура плавлення $1200...1350^{\circ}\text{C}$), яка включає карбонатну (вапняк) та алюмінійвмісну (боксити або інші алюмовмісні матеріали з низьким вмістом кремнезему) складові. Глиноземистий цемент є швидкотверднучим в'язучим, швидкість тверднення якого визначається

переважаючим вмістом у складі низькоосновних алюмінатів кальцію. Значний вклад при дослідженні глиноземистого цементу проведено вченими А. Невілем, Х. Ляфюма, В.А. Кіндом, Д.С. Белянкіним, Н.О. Тороповим, І.В. Кравченко, Т.В. Кузнєцовою, Х.С. Соболю, Й. Талабером та ін.

Мінералогічний склад глиноземистих цементів є досить різний і визначається якістю сировини та технологічними факторами. Згідно даних [38] утворюються наступні різновиди алюмінатів кальцію від високоосновних до низькоосновних: $C_{12}A_7$, CA , CA_2 та CA_6 . Високу ранню початкову міцність цементу, його сульфатостійкість визначає мінерал глиноземистого клінкеру - моноалюмінат кальцію CA . Широке використання спеціального високоалюмінатного в'язучого стало можливе за рахунок надшвидкого темпу набирання міцності, високій інтенсивності тепловиділення у поєднанні з підвищеною жаро- та корозійною стійкістю.

Процеси гідратації в глиноземистому цементі визначають його відмінні властивості порівняно зі звичайними портландцементами [59, 70]. Так, при взаємодії низькоосновних алюмінатів кальцію з водою в глиноземистому цементі утворюються кристалічні гідроалюмінати кальцію (кристалічні) та малорозчинний гідроксид алюмінію (гелеподібний), а при взаємодії високоосновних мінералів портландцементу з водою утворюються гідросилікати кальцію (гелеподібні) та більш розчинний гідроксид кальцію (кристалічний) [79]. Відмінність утворення різних продуктів гідратації також визначається рівнем рН середовища – під час тверднення глиноземистого цементу значення рН є меншим порівняно з портландцементом. У той же час, особливості утворення щільної крупнокристалічної структури гідроалюмінатів кальцію у поєднанні з низькою розчинністю гідроксиду алюмінію у глиноземистому цементі забезпечують отримання спеціальних будівельно-технічних властивостей (висока водонепроникність) бетонів та розчинів на його основі.

Дослідженнями вчених І.В. Кравченко [26] та Т.В. Кузнєцової [38] показано, що для глиноземистих цементів і бетонів на їх основі є характерним

коливання міцності протягом певного періоду часу: міцність цементу інтенсивно зростає до 14 доби і з часом вирівнюється. Зазначається [45], що при експлуатації бетонів і розчинів на основі глиноземистого цементу спостерігається безпричинне руйнування каменю на основі алюмінатного цементу з однієї сторони і поряд з цим – інтенсивне раннє збільшення міцності - з іншої сторони. При цьому високоалюмінатний глиноземистий цемент широко застосовується для отримання високожаростійких бетонів і розчинів, що є одним з пріоритетних напрямків його безконкурентного використання.

Одним з напрямків застосування глиноземистого цементу є отримання спеціальних багатокомпонентних розширюючих в'язучих, які широко застосовуються в будівництві для ремонтних робіт. Згідно [59, 76], такі цементы поділяють на безусадочні (лінійне розширення - 0,01...0,1%), розширні (лінійне розширення - 0,1...0,3%), напружувальні (лінійне розширення - 0,3...1,0%). Цементи цієї групи забезпечують при твердненні у воді, а також повітряно-вологих умовах збільшення об'єму та ущільнення цементуючої матриці бетонів і розчинів. Слід відзначити, що традиційні цементні мінеральні в'язучі речовини при взаємодії з водою утворюють тісто, яке при переході в штучний камінь супроводжуються усадочними деформаціями, що є однією з причин появи тріщин, які знижують довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій.

Розширювальні цементы за показниками вільного розширення при зберіганні зразків (тісто) у воді класифікують на безусадочні - в яких розширення при твердненні складає 2-5 мм/м, що незначно розширюється (5-6 мм/м), середньорозширюючі (8-10 мм/м), сильнорозширюючі (12-15 мм/м) [43]. Так, вільне розширення у бетоні при витраті цементу $\rho = 250-300 \text{ кг/м}^3$ досягається близько 15% від розширення тіста, при $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ – 20% і у розчині $\rho = 600 \text{ кг/м}^3$ – 50%. Проте показник розширення залежно від виду заповнювача і цементу та їх співвідношення може змінюватись; часто при випробуваннях спостерігається значно менше розширення [75].

На даний час розглядаються оксидний і гідросульфоалюмінатний механізми розширення в'язучих систем, які відбуваються за рахунок кристалізаційного тиску утворених гідратів в початковий період гідратації [26, 43, 84, 96, 119]. Оксидне розширення виникає за рахунок розрихлення кристалічної решітки речовини та збільшення її об'єму в процесі гідратації оксидів CaO та MgO цементного клінкеру з утворенням їх гідроксидів. Кальцієве оксидне розширення має обмежене застосування через утруднення його регулювання. До недоліків таких цементів з ефектом розширення, які базуються на утворенні гідроксиду кальцію, відноситься низька стійкість до впливу різних агресивних середовищ, а також невисокі фізико-механічні властивості [26]. В той же час, магнієве розширення (до 0,7%) застосовується для розширних тампонажних цементів при влаштуванні гарячих свердловин (20...200°C) [47].

Механізм гідросульфоалюмінатного розширення полягає в утворенні еtringіту $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ - гідросульфоалюмінату кальцію високосульфатної форми. Внаслідок збільшення об'єму кристалів еtringіту в 2,3 рази в процесі гідратації в'язучої системи проходить гідросульфоалюмінатне розширення, яке в більшій мірі застосовується при отриманні розширних цементів. При цьому найбільш небезпечним є пізнє розширення, що супроводжується внутрішніми напруженнями з подальшим руйнуванням цементного каменю [43].

Розширні цементи можна розглядати як змішані в'язучі – це цементи на основі традиційних компонентів (портландцементний клінкер, глиноземистий клінкер, доменні та високоглиноземисті шлаки, сульфат кальцію, вапно); цементы, що містять синтезовані розширні добавки (високоосновний гідроалюмінат кальцію); цементы на основі сульфоалюмінатного клінкеру (до складу входять мінерали типу- $n\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot m\text{CaSO}_4$). В якості розширних добавок для портландцементу використовують гіпс, сульфат алюмінію та ін. [26, 59]. Для забезпечення оптимальної якості ремонтних сумішей розширні цементы характеризується наступним співвідношенням компонентів:

портландцемент – 60-65%, глиноземистий шлак – 5-7%, двоводний гіпс – 7-10%, гідравлічна добавка – 20-25%. За мінералогічним складом розширний портландцемент повинен містити не менше 7% алюмінату кальцію і більше 45% C_3S . В якості пуцоланових мінеральних добавок використовують трепел, бентоніт, опоку та інші речовини з активністю не менше 200 мг/г СаО. Призначення гідравлічної добавки (гранульований доменний шлак) в розширному цементі – поглинати оксид кальцію, який виділяється при гідратації C_3S та забезпечувати високу швидкість розчинення алюмінатів кальцію і утворення гідросульфоалюмінату кальцію [49, 85].

Згідно [43] розширний цемент за міцністю поділяється на три марки: 400, 500 та 600. Також встановлені норми щодо початку та кінця тужавіння, яке настає відповідно через 30 хв та не пізніше 12 год. Лінійне розширення зразків з чистого тіста при водному твердінні у віці 1..28 діб становить 0,15-1,0% (розширення відбувається лише у вологих умовах). Вироби на основі розширеного портландцементу характеризуються достатньо високою водонепроникністю, морозостійкістю та стійкістю в агресивному середовищі [39, 45]. В той же час, міцність безусадочних і розширних цементів через 7 і 28 діб тверднення є дещо нижчою порівняно з міцністю портландцементів загальнобудівельного призначення.

П.П. Будниковим та І.В. Кравченко [6] отримано декілька видів розширних цементів. Одним з таких в'язучих є портландцемент (93-94%) і доломіт (випалений при 800-900°) або магнезит (3-7%). Механізм розширення в цементному камені полягає в утворенні гідрату оксиду магнію в кількості 0,13-0,40%, а в цементно-піщаному розчині (Ц:П=1:3) – 0,01-0,18%.

В.В. Михайловим та ін. [43] розроблено водонепроникний розширювальний цемент, отриманий в процесі сумісного помелу або якісного змішування тонкомеленого цементу глиноземистого типу і розширювальної добавки (речовини на основі високоосновних або чотирьохкальцієвого гідроалюмінатів кальцію та гіпсу півводного). Для класичного високоміцного водонепроникного розширеного цементу пропонуються склади: 70 мас. %

глиноземний цемент, 10% гідроалюмінати та 20% будівельний гіпс. При цьому високоосновні гідроалюмінати отримують при поєднанні глиноземного цементу, гідратного вапна у співвідношенні 1:1 та води з подальшим витримуванням протягом 48 год, варінням - 5-6 год (температура не більше 150°C), просушуванням та помелом, що значно ускладнює їх виробництво на даний час та є дуже енергоємним процесом, що обумовлює також його високу вартість.

І.В. Кравченко [26] запропоновано гіпсо-глиноземистий розширний цемент – швидкотверднуче гідравлічне в'язуче, яке отримують шляхом сумісного помелу високоглиноземистого шлаку і природного двоводного гіпсу в кількості 30% з наступними характеристиками: початок тужавіння - не раніше 20 хв, кінець – не пізніше 4 год; марок за міцністю М300, М400 і М500. Слід відзначити, що при твердненні такого цементу у повітряно-сухих умовах через 1-3 доби спостерігається розширення до 0,1-1,0% з виявленням подальших усадочних деформацій. Тому необхідною умовою виявлення ефекту розширення у зразків із гіпсо-глиноземистого цементу є їх тверднення у воді. При пропарюванні з інтервалом температур 90-100°C міцність виробів збільшується, але величина розширення зменшується.

О.П. Мчедлов-Петросяном [45] розроблено розширні цементы, які складаються з декількох компонентів: 95 мас.% портландцементу, 2 мас.% сульфату алюмінію $Al_2(SO_4)_3$, 3 мас.% нітрату кальцію $Ca(NO_3)_2$, 0,15% ССБ і 0,015% порошку алюмінію. При цьому компоненти ССБ і $Ca(NO_3)_2$ вводять для врівноваження процесів структуроутворення та кристалізації еtringіту; сіль $Al_2(SO_4)_3$ служить джерелом утворення колоїдного еtringіту з позитивним зарядом, а алюмінієва пудра (пороутворювач) – є компенсатором внутрішніх напружень в масі каменю. Причина розширення каменю – розклинююча дія електроосмотичних сил.

Негматовим З.Ю. [46] отримано безусадочні і розширні шлаколужні в'язучі та бетони на їх основі марок М400-600 з лінійним розширенням 0,184-0,416% і напружувальні – марок М400-500 із зусиллям самоупругнення 0,57-

0,65 МПа; на основі доменних шлаків марок М400-800 з лінійним розширенням 0,200-0,596% і напружувальні – марок М400-500 із зусиллям самонапруження 0,68-0,81 МПа. Для їх одержання були введені у вигляді розширної добавки до складу безусадочних і розширних шлаколузних в'яжучих спеціально синтезовані гіпсовапняні добавки на основі сировини у співвідношенні $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} : \text{CaCO}_3$ відповідно 1:1; 2:1; 3:1 та випалені при температурі 1050 °С. Для одержання розширної добавки також використано содосульфатну суміш, лужні відходи виробництва, соду технічну кальциновану і метасилікат натрію, як лужні компоненти. Шляхом спрямованого регулювання фазового складу продуктів тверднення в'яжучої системи синтезовано безусадочні та розширні низькоенергоємні в'яжучі за рахунок формування в складі продуктів тверднення розширюючих фаз у вигляді гідросульфоалюмінатів кальцію.

Головні засоби управління розширенням пов'язані з регулюванням кінетики утворення еtringіту, його кількості та морфології [74, 75]. Це досягається при дозуванні компонентів, тонкості їх помелу. Отже, розширення цементної системи пов'язане зі збільшенням об'єму твердої фази, що утворюється при гідратації цементу. В найбільшій мірі ці умови реалізуються при реакціях утворення „вторинного” еtringіту, коли останній виникає не в результаті взаємодії безводного мінералу з гіпсом, а при реакції гідроалюмінатів кальцію з розчином сульфату кальцію, що надходить до зони реакції в результаті дифузії. В цьому випадку відбувається збільшення об'єму твердої фази та системи загалом [87, 97]. Для цементів різного складу період інтенсивного розширення становить від 1 до 7 діб, а показник лінійного розширення може знаходитись в широкому діапазоні. Дуже важливим для заданого розвитку процесу є забезпечення умов тверднення цементу. Небезпека тріщиноутворення при сухих умовах значно більша, ніж для звичайного портландцементу. Вважається, що вологісні умови повинні бути забезпеченими до досягнення 50% стандартної міцності каменю.

Для розширного шлакопортландцементу початок тужавіння розчину складає не раніше 30 хв, кінець - не пізніше 4 год. Слід відзначити, що унікальними властивостями розширний цемент характеризується лише при твердінні в умовах високої вологості – у ранньому віці (через 5-7 діб) виробу на його основі необхідно регулярно зволожувати і обгортати поліетиленовою плівкою. Це дозволяє отримати ремонтну конструкцію підвищеної довговічності. Для ефективного проведення ремонтних робіт, зокрема нанесення розширних розчинів у місця тріщини або щілин шириною розкриття 0,2-0,3 мм застосовується склад РЦ:П=1:1, для ремонту ушкоджень шириною 0,5-3 мм - РЦ:П=1 : 2 з зернами піску крупністю 1,0 мм [76, 108].

Застосовуються розширні цементы для ущільнення отворів в бетонних конструкціях, монтажі анкерних з'єднань, ущільнення кабельних і трубних проходів, герметизація стиків і швів, замонолічування введів каналізаційних комунікацій. Перевагами розширних цементів є висока міцність зчеплення з основою; поступове розширення, що обумовлює щільне з'єднання з основою і рівномірне заповнення дефектів та тріщин; висока водонепроникність; морозостійкість (до 500 циклів «заморожування-відтавання»), атмосферостійкість, корозійна стійкість, можливість проведення робіт при понижено додатних температурах [26, 39, 58].

До основних недоліків таких цементів можна віднести: складність і високу енергоємність технології виробництва, висока вартість порівняно з цементами загальнобудівельного призначення, складність регулювання деформації усадки-розширення при експлуатації в різних умовах, термін зберігання від 1 до 3 місяців в герметичній упаковці та обмежені обсяги виробництва [45, 75]. Так, безусадочні цементы на основі шлаколузних в'язучих мають високі фізико-механічні і будівельно-технічні властивості, але вони характеризуються високою складністю технологічного процесу отримання розширюючої добавки, що пов'язано з високою температурою випалу [103, 105]. Таким чином, висока вартість і енергоємність, складність виготовлення традиційних безусадочних та розширних цементів зумовлюють

необхідність дослідження ефективних безусадочних лужних в'язучих з алюмінійвмісними добавками.

Слід відзначити, що для виготовлення безусадочних і розширних водонепроникних розчинів та гідроізолюючих штукатурок застосовують гіпсоглиноземистий цемент складу - 70 мас. % тонкоподрібнений глиноземистий доменний шлак та 30 мас.% гіпс. Для такого цементу характерні властивості: початок тужавіння - 10 хв, кінець - не пізніше 4 год; через 3 доби тверднення границя міцності складає 280 кгс/см², лінійне розширення - від 0,1 до 0,7%, водонепроникність - зразки витримують тиск до 1,1 МПа. Бетони на основі ГГРЦ можна піддавати пропарюванню при температурі не більше 100 ° С. При цьому морозостійкість і вогнестійкість є вищою ніж у портландцементі, але нижчою, ніж у глиноземистого цементу. Для сповільнення тужавіння застосовують буру, оцтову кислоту, сульфатно-дріжджова барда(СДБ).

Основне призначення гіпсоглиноземистого розширного цементу – це виготовлення безусадочних і водонепроникних розчинів, які застосовуються для монтування стиків бетонних і залізобетонних конструкцій; виготовлення гідроізоляційних штукатурок; посилення фундаментів; закладення фундаментних болтів; затирання швів водопровідних комунікацій; забезпечення водонепроникності тунелів метро; спорудження ємностей для зберігання рідкого палива; в якості гідроізоляційного покриття очисних споруд; будівництва басейнів та ін. [26, 34].

Одним з нових видів розширювальних в'язучих матеріалів є пластифікований цемент на основі звичайного портландцементу та пластифікуючих добавок [71-73]. Для одержання необхідної рухливості зазвичай застосовують концентрати сульфітно-спиртової барди, яка забезпечує як підвищену міцність, так і пластичність. Це дозволяє використовувати такий цемент для ремонту робочих поверхонь - доріг, відмосток, заливок під підлогу і т.п. В той же час, найбільший в світі хімічний концерн BASF виготовляє пластифікований безусадочний розширний цемент

марки MACFLOW на основі портландцементу і комплексної розширної добавки з пластифікуючим ефектом. Особливості таких модифікованих цементних матеріалів є отримання бетонів високої ранньої та кінцевої міцності, досягнення високої легковкладальності без додаткового використання добавок-пластифікаторів, а також отримання ін'єкційних безусадочних розчинів з високою плинністю. Пластифікований безусадочний розширний цемент MACFLOW характеризується міцністю через 28 діб трьох класів: 42,5; 52,5; 62,5 МПа; лінійне розширення через 1 добу - 0,5%; водонепроникність - 8 атм; морозостійкість F300. Високі показники будівельно-технічних властивостей дозволяє застосування таких цементів для ремонту і будівництва дорожніх і аеродромних покриттів, мостових конструкцій і цивільних споруд; встановлення анкерів в бетон, ґрунти та скельні породи; як цемент для зароблення тріщин (ін'єкційним методом) в бетонних і кам'яних будівлях; заповнення каналів, в яких знаходиться напружена арматура або анкера під механічною напругою; ін'єкції ґрунтів; встановлення обладнання та металоконструкцій; замонолічування стиків.

F. Pacheco-Torgal та ін. показано, що відновлення інфраструктури є гострим питанням в США. Так, протягом наступних п'яти років для відновлення та ремонту потреби перевищують 1,6 трлн. доларів. Крім цього, швидше проведення ремонтних робіт забезпечує менші витрати на відновлення поверхонь будівельних конструкцій. Більшість сучасних комерційних ремонтних матеріалів не є економічно ефективними, а деякі навіть мають технічні та екологічні обмеження. Тому для подолання вказаних проблем перспективним є застосування лужноактивованих портландцементних систем, які характеризуються технічними, економічними та екологічними перевагами.

1.3. Лужні цементы для швидкого ремонту та зведення бетонних споруд

Екологічні аспекти виробництва портландцементу визначають пошук альтернативних цементів, що направлені на зменшення витрати енергії, ресурсозбереження та зниження емісії CO₂ [10, 64, 66, 88, 91, 95, 141]. Ідея створення одного з видів низькоенергоємних в'язучих, такого як лужні цементы належить В.Д. Глуховському [83]. Лужні цементы характеризуються низькими витратами теплоти і електроенергії на їх виробництво, високими фізико-механічними показниками, довговічністю, тверднуть при підвищених і від'ємних температурах. За будівельно-технічними властивостями лужні в'язучі не поступаються традиційним клінкерним цементам, а по ряду властивостей перевершують їх [24, 30, 89].

За П.В. Кривенко [28, 29] лужні цементы поділяють на два класи - це геоцементы (основні фази - лужні цеолітоподібні гідроалюмосилікаты та додаткові фази - низькоосновні гідросилікаты і гідроалюмінаты кальцію, магнію) та шлаколужні, зололужні цементы (основні фази – гідросилікаты і гідроалюмінаты кальцію і магнію, додаткові – цеолітоподібні сполучення). В основу розроблення лужних цементів покладені наступні принципи: структуроутворюючі функції лужного компоненту; продукти гідратації формуються в системах R₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O і R₂O-RO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O; забезпечення стехіометричного відношення між оксидами, яке відповідає складу природних водних алюмосилікатів типу цеолітів.

Згідно [14, 59, 100, 129] шлаколужні цементы представляють собою гідравлічні в'язучі речовини, отримані шляхом тонкого подрібнення гранульованого шлаку із лужними компонентами або замішаного меленого шлаку лужними розчинами на основі натрію або калію. Згідно ДСТУ Б В.2.7-181:2009 [21] цементы лужні одержуються з таких складників: алюмосилікатний компонент, портландцементний клінкер, доменний гранульований шлак, зола-винесення, базальт і сполук лужних металів (натрій або калій), які зумовлюють в водних розчинах лужну реакцію. Лужні цементы

за речовинним складом і міцністю на стиск в 28-му віці класифікують на такі типи: ЛЦЕМ I - шлаколушний цемент (55... 100 % доменного гранульованого шлаку) марок 300...1000, ЛЦЕМ II - лушний портландцемент (100 % портландцементного клінкеру) марок 300...1000; ЛЦЕМ III - лушний пуцолановий цемент (36...80 % золи або базальту) марок 300, 400, 500; ЛЦЕМ IV - лушний шлакопортландцемент (36...89 % доменного гранульованого шлаку) марок 300...700; ЛЦЕМ V- лушний композиційний цемент (90...95 % доменний гранульований шлак+зола) марок 300...1000.

Основними сировинними компонентами для виготовлення лушних цементів є доменні шлаки, гранульовані шлаки інших виробництв, зола-винесення та відходи різних виробництв, що вміщують сполуки лушних металів. Для одержання лушних цементів в якості сполук лушних металів застосовують їдкі луги (NaOH, KOH), несилікатні натрієві і калієві солі (Na_2CO_3 , K_2CO_3), силікатні та алюмінатні натрієві і калієві солі ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$), солі сульфатні натрію і калію (Na_2SO_4 , K_2SO_4) [11, 29, 32].

Основним складником для цементу типу ЛЦЕМ II є портландцементний клінкер, який відіграє основну структуроутворюючу роль у в'язучому, що полягає у формуванні кальцієвих гідратів. Для цементів інших типів продукт гідратації портландит дозволяє перевести лушні компоненти у найбільш активний стан з подальшим утворенням лушних гідроалюмосилікатів [60, 62, 82, 137].

На даний час можна розглянути дві технології отримання лушних цементів: «цементна», згідно якої складові піддаються сумісному помелу або дисперсні (розмелені) алюмосилікатні компоненти змішуються, що є подібним до технології одержання композиційних цементів загальнобудівельного призначення; «бетонна», згідно якої складники, добавки та лушний компонент (у вигляді розчину або у сухому стані) подаються в бетонозмішувач [59].

Найбільш розповсюдженою є «бетонна» технологія, згідно якої введення лужної добавки (розчин) забезпечує найбільш активну взаємодію з алюмосилікатами та більш інтенсивне тверднення будівельного композиту. При цьому в більшій мірі використовується місцева алюмінійвмісна сировина (природна, техногенна), що має свої економічні переваги. Слід відзначити, що „цементна” технологія не знайшла широкого застосування так як широкомасштабно на цементних заводах лужний цемент не випускається, лише по замовленню.

Група гідравлічних в'язучих речовин, які за класифікаційною ознакою хімічного складу віднесені до лужних, відповідають як загальнобудівельному, так і спеціальному призначенню. Проте розглядаються окремо завдяки особливостям продуктів їх гідратації і широким можливостям регулювання властивостями в заданому напрямку [78, 102, 104].

Для одержання безусадочних лужних цементів застосовують склади : шлак 63-85%; метасилікат натрію 5-12%; портландцементний клінкер 5-15%; сульфат натрію 5-10% [28]. Взаємодія у такій системі проходить із формуванням гідратів (гідросилікат кальцію, гідрогранати, утворення групи цеолітів) і гідросульфоалюмінатів кальцію, переважно у вигляді еtringіту, що і забезпечує безусадочність цементу (усадка через 3 доби 0,09-0,014%, а 28 діб 0,011-0,016%. При твердненні в воді проходить розширення (через 28 діб - 0,2%). Так, для безусадочних цементів характерні скорочені терміни тужавіння - початок в межах 20 хв, кінець - не пізніше 1 год; марки за міцністю М400... М900. Проте порівняно з безусадочними різновидами цементів на основі портланд- та глиноземистого цементів шлаколуужний цемент підлягає тепловолотій обробці $T = 80 \dots 95^{\circ}\text{C}$.

Лужні цементи порівняно зі звичайними портландцементами, характеризуються більш низькими деформаціями усадки. Авторами [27] були розроблені склади і технологія отримання безусадочних цементів на основі лужних цементів, а також цементів з низьким значенням усадки, які можуть

бути використані для закладення і гідроізоляції швів, стиків і тріщин в бетонних та залізобетонних конструкціях і т. п.

Авторами [27, 126] виявлено взаємозв'язок спеціальних властивостей лужних цементів з фазовим складом продуктів тверднення та умови синтезу і властивостей штучного каменю, що створило передумови для розробки безусадочних шлаколуужних цементів. Показано, що одним із шляхів розробки безусадочних і розширних шлаколуужних в'язучих є спрямований синтез в складі продуктів тверднення лужних гідроалюмосилікатних з'єднань з високим ступенем закристалізування, модифікування новоутворень іонами SO_4^{2-} або введення до складу в'язучих розширюючих добавок.

Дослідженнями [92, 134] встановлено технологічні особливості одержання бетонів на основі золівмісних лужних цементів. Показано, що застосування лужних золівмісних цементів у складах бетонів з добавками гідрофобізуючої та редиспергуючої плівкоутворюючої дії дозволяє уникнути укривання та зволоження поверхні, що визначає їх застосування при монолітному будівництві в різних температурних та вологісних умовах, а також під час виробництва збірних бетонних конструкцій і залізобетонних виробів. Авторами встановлено, що бетони на основі лужних цементів з застосуванням золи-винесення показують кращі результати при твердненні в різних температурно-вологісних умовах порівняно з шлакопортландцементом ШПЦ Ш/А-400. Так, при використанні модельної системи «портландцемент – зола-винесення - лужний компонент – ПАР» отримується найвища міцність бетону при змінних температурах від $t=20\pm 2^\circ C$ до $+5^\circ C$, а при використанні модельної системи «портландцемент - зола-винесення – гранульований доменний шлак – лужний компонент –ПАР» забезпечуються оптимальні значення при бетонуванні в умовах температур до $+30^\circ C$.

Авторами [5, 33, 124, 128, 144] запроектовано лужноактивовані (шлакові) цементы з високомодульними розчинними силікатами та бетони на їх основі, які характеризуються необхідною збереженістю працездатності, швидким наростанням міцності, високими показниками міцності на розрив при вигині,

підвищеною стійкістю до утворення тріщин, ударостійкістю та деформаційною стійкістю. Показано підвищені характеристики міцності та деформаційної стійкості розроблених ремонтних розчинів та бетонів на основі лужноактивованих в'язучих.

Кривенко П.В. та ін. [106] розроблена складна комплексна багатофункціональна добавка, що складається з алюмінійвмісного порошку, ПАР, солей-електроліту (NaNO_3) та напівводного гідрату сульфату кальцію ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) для забезпечення необхідних властивостей закріплювальних сумішей на основі лужноактивованого портландцементу, представленого системою «звичайний портландцементний клінкер - метасилікат натрію». Розширення кристалізаційно-конденсаційної структури забезпечується завдяки напруженню за рахунок утворення гідросульфоалюмінату кальцію $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ та гідронітроалюмінату кальцію $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, що дозволяє отримати необхідні показники анкерної суміші - консистенція 190 мм, час збереження працездатності 15 хв, міцність на розтяг при вигині / міцність на стиск через 1 добу та 28 діб відповідно 6,1 / 25,7 МПа та 12,9 / 68,5 МПа; адгезія 0,9 МПа; лінійне розширення до 0,37 мм / м.

Відповідно до принципів кількість лугів визначається вмістом Al_2O_3 в алюмосилікатній складовій лужного цементу. На даний час, ефективною лужною добавкою, яка підвищує водонепроникність бетонів та розчинів є алюмінату натрію [150]. Принцип дії такої добавки у бетоні полягає в прискоренні гідратації цементу, завдяки чому прискорюється процес утворення субмікрокристалічних гідратних фаз, що забезпечує високу міцність бетону [121]. Залежно від рецептури і наявності в її складі різних компонентів кількість введеної добавки варіюється від 1-5 мас.%. Перевагами прискорювача тверднення - алюмінату натрію є підвищення міцності бетону на початковій стадії тверднення - на 50 - 60%, водонепроникності - через 7 діб бетон витримує тиск 8 атм.; нівелювання корозії арматури, що дозволяє його використання для навісних конструкцій (особливо для тунелів і мостів), зниження в 2 рази витрати енергії на прогрів бетонних виробів. Добавка на

основі алюмінату натрію значно зменшує усадку бетонів та розчинів, що підвищує стійкість до утворення тріщин [98, 148].

Вперше, вплив алюмінату натрію на властивості будівельних розчинів було вивчено такими відомими науковими діячами, як А.Я. Якуб і Л.Б. Мітгарц. Бетони на основі портландцементу з добавкою 3-5% алюмінату натрію, при витраті цементу в кількості 320 кг/м³, мають підвищену водонепроникність. В той же час, добавка алюмінату натрію знижує міцність зразків на стиск через 28 діб від 28 до 15% при вологому витримуванні, та на 12-10% – при водному зберіганні. Для приготування алюмінатного бетону замість води застосовується розчин алюмінату натрію, який додається з співвідношенням 1:15; 1:10 або 1:6 за об'ємом. При цьому одержують відповідно 2; 3 і 5% розчини. Однак бетони з добавкою алюмінату натрію не мають широкого поширення при проектуванні та будівництві підприємств з агресивними середовищами. Тому, гідроізоляційні розчини готують на цементах підвищених марок (М400 і вище) і кварцовому піску або штучно отриманому піску з щільних гірських порід. Для влаштування гідроізоляційного шару, що піддається впливу агресивних вод, в якості в'язучих для розчину застосовують сульфатостійкий портландцемент і сульфатостійкий пуцолановий портландцемент.

Слід відзначити, що для бетонних та розчинових сумішей з використанням добавки алюмінату натрію (в залежності від кількості добавки) різко скорочуються терміни тужавіння: початок тужавіння – до 10-15 хв, а кінець – до 15-25 хв, що дозволяє її використання для проведення ремонтних робіт для зароблення тріщин, каверн та ін. Авторами [132, 133, 147] показано, що введення PCE уповільнює час схоплювання, покращує консистенцію та скорочує швидкий розвиток міцності сумішей паст та розчину. Однак комбінації добавок - 1,8% PCE + 1,6% прискорюючої лужної добавки (SSA) на основі нітратів та нітратних солей та 1,8% PCE+ 1% SCA на основі алюмінату натрію забезпечило оптимізацію властивостей і прискорення тверднення сумішей усіх складів.

Проаналізовано дослідження шлаколузних високоміцних цементів для швидкого ремонту пошкоджених бетонних споруд. Показано, що направлена модифікація високоміцних шлаколузних цементів забезпечує високу швидкість набирання ранньої міцності цементів, підвищений ізоморфізм міцнісних характеристик під час навантаження стиску і згину, підвищені адгезійні значення до різних типів поверхні матеріалів, зносостійкість і деформативність [136, 138, 142, 143]. Використання лузноактивованих цементів є перспективним напрямком для прискорення відновлення пошкоджених бетонних поверхонь. Це обумовлено як їх високими фізико-технічними характеристиками, так і значним економічними перевагами порівняно з матеріалами на основі цементів загальнобудівельного призначення. Одним з негативних факторів лузноактивованих цементів та бетонів на їх основі, в т. ч. шлаколузних, є підвищені усадочні деформації та понижені показники проектної міцності на розтяг при згині (по відношенню до міцності на стиск у проектному віці значення становить 0,09-0,105), що призводить до зниження їх тріщиностійкості. Пошук ефективних рішень дозволив розробити методи модифікування високоміцних швидкотверднучих шлаколузних цементів, що забезпечують підвищення їх тріщиностійкості під час деформування шляхом додаткового формування в тверднучій матриці маложорстких структурних елементів, що є ефективним при проведенні ремонтних робіт.

На даний час основною світовою проблемою є зменшення емісії CO₂, витрат та споживання енергії. Основною в'язучою речовиною в складі бетону є звичайні портландцемент (OPC). Це створює багато екологічних проблем: викиди вуглекислого газу та велике споживання енергії [64, 139, 141]. Альтернативними матеріалами портландцементів I типу (OPC) у виробництві бетону є лузно-активовані змішані цементы з меншими витратами енергії та викидами CO₂. Показано вплив лузного активатора на показники розчинової суміші та затверділого розчину на основі бінарних змішаних лузно-активованих цементів в складі яких застосовано золу-винесення (FA) та

гранульований доменний шлак (GBFS) [94, 109, 125, 134]. Результати випробувань показали, що підвищена рухливість та найвища проектна міцність досягається для розчинів, приготованих із співвідношенням 0,40 лужного розчину до вмісту в'язучого речовини. При цьому лужноактивовані розчини характеризувалися підвищеною міцністю на розтяг при згині.

Саницьким М.А. та Кропивницькою Т.П. розроблено високоміцні лужноактивовані композиційні цементи з пониженим клінкер-фактором (0,65-0,50) для одержання швидкотверднучих клінкер-ефективних бетонів поліфункціонального призначення [34-36]. Авторами встановлено принципи наномодифікування цементного каменю на мікро- та наномасштабному рівнях з використанням інноваційного методу золь-гель технології [99], що дозволило суттєво збільшити ранню міцність та довговічність наномодифікованого швидкотверднучого бетону [107, 111].

Таким чином, для забезпечення швидкої реконструкції, відновлення та ремонту будівель і споруд виникає гостра необхідність підвищення якості та довговічності ремонтних сумішей, що досягається правильним проектуванням складу розчинів, застосуванням алюмінійвмісних компонентів, комплексної реалізації ефектів фізичної оптимізації та сульфатно-лужної активації для одержання ефективних швидкотверднучих цементуючих систем і має безпосередній вплив на експлуатаційні характеристики матеріалу.

1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза

Розроблення інноваційних 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, В.М. Дерев'янка, П.В. Кривенка, А.В. Мішутін, А.М. Пługіна, А.А. Пługіна, Р.Ф. Рунової, М.А. Саницького, Х.С. Соболев, С.Й. Солодкого, В.П. Сопова, О.В. Ушерова-Маршака, С.М. Толмачева, Л.О. Шейніча,

Шинкевич О.С, Z. Giergiczny, W. Kurdowski та ін. висвітлено сучасні уявлення про особливості технологічних рішень з виготовлення сучасних бетонів і будівельних розчинів та розглянуто проблеми підвищення їх довговічності в різних умовах експлуатації.

В роботах В.М. Дерев`янка, М.А. Саницького, Марущак У.Д. та ін. показано, що підвищені експлуатаційні властивості (тріщиностійкість, ударна в'язкість, понижені деформації усадки) композиційних матеріалів забезпечуються за рахунок використання базальтового волокна шляхом тривимірного зміцнення розчину порівняно з традиційною арматурою, яка забезпечує лише двохвимірне зміцнення. К.К. Пушкарьовою, М. В. Суханевич А.С. Марціх та ін. розроблено гідроізоляційні суміші на основі мінеральних в'язучих речовин з направленим регулюванням та вдосконаленням їхньої структури на мікро- та нанорівнях для отримання довговічного і надійного захисту бетону. В той же час, такі наномодифіковані гідроізоляційні розчини мають спеціальне застосування і характеризуються підвищеною собівартістю.

За останні роки, у зв'язку із поглибленою спеціалізацією будівельних робіт зросли потреби з використання безусадочних сумішей для ремонтних і відновлювальних робіт. Розробленню і дослідженню безусадочних та розширних цементів на основі портландцементу, глиноземистого цементу і гіпсу присвячені роботи В.І. Бабушкіна, П.П. Буднікова, І.В. Кравченко, Т.В. Кузнецовой, К.С. Кутателадзе, В.В. Михайлова, П. Мchedлова-Петросяна, А.А. Пашенко, Х.С. Соболев, А.Е. Шейкіна, Г. Лосьє, П.К. Мета, М. Полівка, Г.Л. Калоусека, Т. Mori, Т. Higuchi, М. Morioka, А. Nogi та ін. Дослідженнями показано, що такі цементы характеризуються високою адгезійною міцністю, водонепроникністю. Разом з тим, складність і висока енергоємність технології їх виробництва, висока вартість порівняно з цементами загальнобудівельного призначення, складність регулювання деформацій усадки-розширення при експлуатації в різних умовах призводить до їх обмеженого промислового виробництва.

У зв'язку з тим, виникає гостра необхідність розроблення нових видів недорогих низькоенергоємних безусадочних та розширних цементів, які забезпечують підвищення ефективності ремонтних робіт бетонних конструкцій. На основі отриманих результатів досліджень науковою школою ІВРМ ім. Глуховського розроблено шлаколузні в'язучі. В той же час, такі лузні цементу порівняно зі звичайними портландцементами, характеризуються більш високими деформаціями усадки. Вченими Кривенко П.В., О.Г. Ковальчуком, О.М. Петропавловським, А. Palomo, J. Provis та ін. розроблено склади і технологію отримання низькоенергоємних безусадочних лузних цементів для закладення і гідроізоляції швів, стиків і тріщин в бетонних і залізобетонних конструкціях шляхом введення алюмосилікатних добавок, що сприяє зниженню усадочних деформацій штучного каменю за рахунок збільшення гідросульфоалюмінатних новоутворень. В той же час, для одержання необхідних показників якості такі лузні в'язучі вимагають підвищеного вмісту лузних активаторів та не мають широкого промислового виробництва. Тому практичний інтерес представляють безусадочні системи на основі звичайних портландцементів загальнобудівельного призначення.

Для одержання безусадочних розчинів з підвищеною водонепроникністю, серед перспективних класів прискорювачів тверднення можуть бути виділені добавки на основі активних оксидів-гідроксидів алюмінію. Дослідженнями А.Я. Якуб і Л.Б. Мітгарц вперше показано, що введення 3-5 мас.% алюмінату натрію дозволяє підвищити водонепроникність бетонів. Qi Xu та J. Stark показано, що в процесі гідратації системи «цемент-прискорювач $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ » проходить швидке утворення значної кількості плівкоподібних фаз С-А-Н, які призводять до швидкого тужавіння і росту міцності в ранні терміни тверднення. В той же час, при цьому значно зростає водопотреба сумішей, що призводить до зниження міцності через 28 діб тверднення. Одним із способів подолання відповідних труднощів може бути застосування фізичного підходу для створення ефективних композитів – введення суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу (PCE). Саме такий підхід використаний в роботах В.

Felekoğlu, K. Tosun, B. Baradan. Показано, що добавка РСЕ призводять до сповільнення швидкості тверднення, проте поєднання РСЕ з лужними прискорювачами на основі нітратних солей та алюмінату натрію забезпечує оптимізацію властивостей і прискорення тверднення сумішей усіх складів.

Важливе значення на даний час виділяється нанотехнологічному підходу, особливо «золь-гель» технології, що полягає в синтезі нанокompatитів. J. Plank, V. Kanchanason одержано колоїдний посів наночастинок C-S-H-PCЕ, який забезпечує швидку кінетику набирання ранньої міцності цементуючих систем. Саницьким М.А. та Кропивницькою Т.П. синтезовано лужний нанокompatит N-C-S-H-PCЕ, що дозволило розробити лужно-сульфатноактивовані композиційні цементи з високою ранньою міцністю та наномодифіковані бетони на їх основі з покращеними експлуатаційними властивостями. Для досягнення високих технологічних і технічних ефектів при одержанні безусадочних сумішей з підвищеними експлуатаційними властивостями для швидкого виконання ремонтних і відновлювальних робіт, виникає необхідність дослідження лужних активаторів тверднення на основі алюмінату натрію, прискорювачів на основі нітрату кальцію та полікарбоксилатних суперпластифікаторів.

Аналіз відомих закономірностей в області будівельного матеріалознавства дозволяє висунути наукову гіпотезу щодо можливості комплексного поєднання золи-винесення, лужних активаторів тверднення на основі алюмінату натрію і полікарбоксилатних суперпластифікаторів для створення лужних портландцементів з високою ранньою міцністю, які за рахунок лужної активації та наномодифікування дозволяють одержати ремонтні безусадочні та розширні суміші, що забезпечують високу швидкість тверднення, міцність зчеплення з основою, тріщиностійкість, водонепроникність характеризуються покращеними експлуатаційними властивостями та довговічністю.

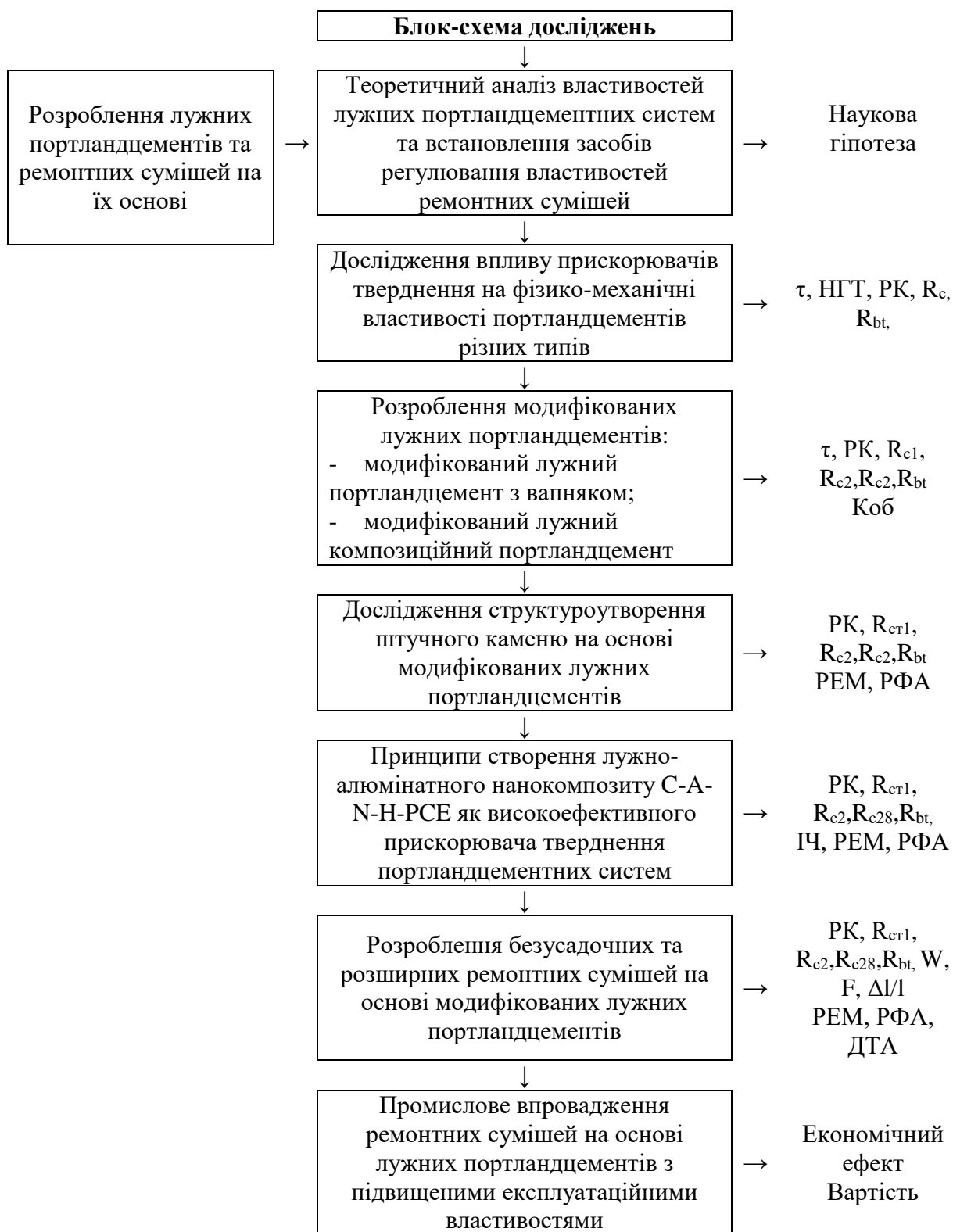


Рисунок 1.1 – Блок-схема дослідження

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика матеріалів

Для розроблення лужних портландцементів та ремонтних сумішей використовували портландцементи загальнобудівельного призначення ПрАТ «Івано-Франківськцемент» типів - СЕМ І 42,5 R (ПЦ І-500Р-Н), СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R (ПЦ ІІ/А-В-500Р-Н), СЕМ ІІ/А-S 42,5 R (ПЦ ІІ/А-Ш-500Р-Н), СЕМ ІІ/А-Р 42,5 R (ПЦ ІІ/А-П-500Р-Н), СЕМ ІІ/В-М(Р-S-L) 32,5 R (ПЦ ІІ/Б-К(Ш-В-П)-400Р-Н). Характеристики портландцементів, випробуваних згідно ДСТУ Б EN 196-1 різних типів наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Фізико-механічні властивості портландцементів

№	Тип цементу	K _{об} , %	Терміни тужавіння, хв		R _c , МПа, у віці, діб	
			поч.	кін.	2	28
1	СЕМ І 42,5 R	20,0	140	220	34,0	49,0
2	СЕМ ІІ/А-Р 42,5 R	16,0	150	230	32,0	44,0
3	СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R	21,0	160	250	35,0	45,0
4	СЕМ ІІ/А-S 42,5 R	23,0	160	240	24,0	44,0
5	СЕМ ІІ/В-М(Р-S-L) 32,5 R	21,0	140	250	18,5	42,0

Мінералогічний склад портландцементного клінкеру, що використаний для виготовлення портландцементів наступний: C₃S – 62,42 мас. %, C₂S – 13,62 мас. %, C₃A – 7,06 мас. % і C₄AF – 12,32 мас. %.

Для проектування складів ремонтних сумішей було використано глиноземистий цемент ISTRA-40 ТМ «Calucem» (Словаччина). Глиноземистий цемент ISTRA – 40 (ГЦ-40) виготовлений основі клінкеру з вмістом однокальцієвого алюмінату (СА) до 80%, що надає йому високу міцність у ранньому віці. Глиноземистий цемент ISTRA – 40 відповідає британському стандарту BS 915 і підлягає контролю згідно ДСТУ Б EN 196-1. Глиноземистий цемент характеризується водовідділенням $K_{об} = 18,0 \%$, водопотребою НГТ=0,24 та стандартною міцністю 100-120 МПа.

Хімічний склад портландцементного та глиноземистого клінкеру зображено на рис. 2.1.

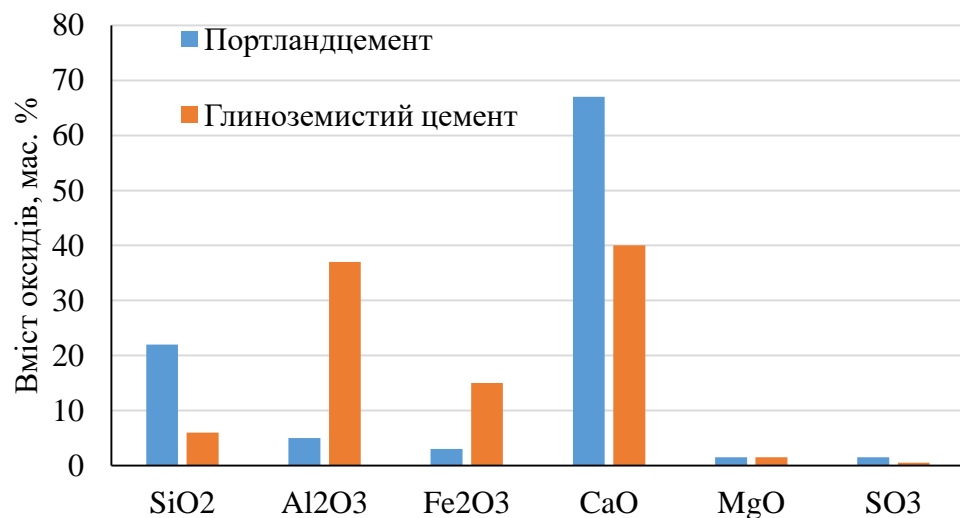


Рисунок 2.1 - Хімічний склад клінкеру

Для проектування ремонтних безусадочних сумішей було використано активні мінеральні алюмінійвмісні добавки, а саме: золу-винесення (ЗВ) Бурштинської ТЕС, метакаолін (МК) МК-40 ТОВ «Мета-Д».

Зола-винесення – тонкодисперсний техногенний матеріал, що характеризується пуцолановими властивостями. Зола-винесення містить скловидні частини, кулеподібної форми. Гранулометричний розподіл частинок за розміром та мікрофотографія частинок золи-винесення зображені на рис. 2.2, а, б.

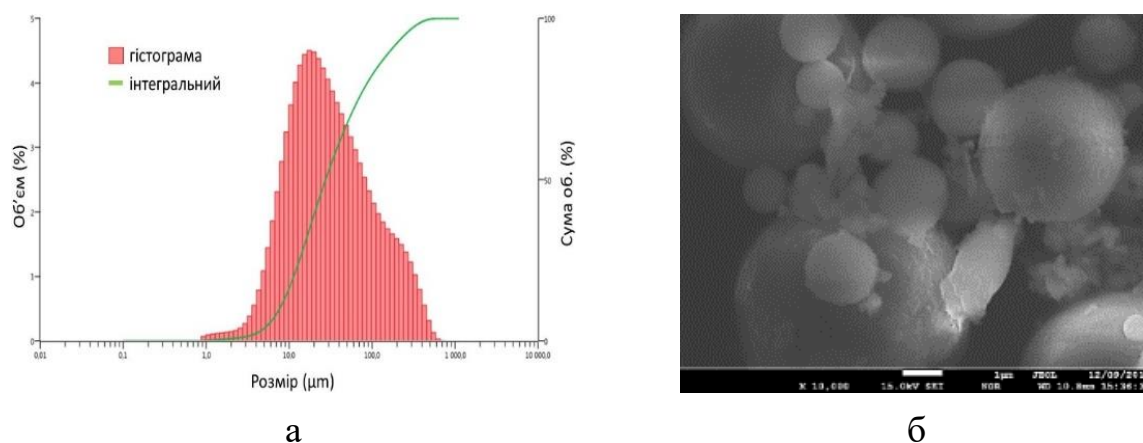


Рисунок 2.2 – Гранулометричний розподіл частинок за розміром (а) та мікрофотографія (б) золи-винесення

Встановлено, що для золи-винесення Бурштинської ТЕС характерні включення зерен недопаленого вугілля (до 15 мас. %), що суттєво збільшує водопотребу та зменшує ефективність застосування добавки. Тому для забезпечення стабільних показників гранулометричного складу золи-винесення, здійснювали просіювання на ситі з розміром вічка 160 мкм.

Метакаолін – тонкодисперсна активна мінерально добавка, продукт дегідратації каолінової глини, що володіє пуцолановими властивостями. Внаслідок температурної обробки каоліну $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ проходить реакція дегідратації, утворюється аморфний силікат алюмінію. Через високу тонину помелу ($640 \text{ м}^2/\text{кг}$) метакаолін використовується в поєднання із супер- та гіперпластифікаторами. Хімічний склад активних мінеральних алюмінійвмісних добавок наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Вміст оксидів у складі активних мінеральних алюмінійвмісних добавок

Мінеральна добавка	Вміст оксидів, мас.%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	H ₂ O
Зола-винесення	53,18	24,08	12,17	2,23	2,01	-	-
Метакаолін	52,6	39,8	1,9	1,0	-	0,1	-

Для розроблення комплексної розширної добавки (КРД) та ремонтних сумішей застосовано в якості добавок природний гіпсовий камінь Дубівецького родовища у вигляді гіпсу сиромеленого (вміст CaSO_4 – 75%) з питомою поверхнею $3500 \text{ см}^2/\text{г}$, а також гіпсове будівельне в'язуче типу Г-5 Н ІІ ТМ «KRUMIX». Гіпсове в'язуче будівельне відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-82:2010. Для одержання комплексної розширної добавки для виготовлення ремонтних сумішей застосовано чисте лабораторне вапно негашене (CaO).

В якості дрібного заповнювача для випробування портландцементів використовували моно- та поліфракційні стандартні піски згідно з ДСТУ Б В.2.7-189:2009 та ДСТУ Б EN 196-1:2015. Часткові залишки стандартних кварцових пісків наведені на рисунку 2.3, а, б.

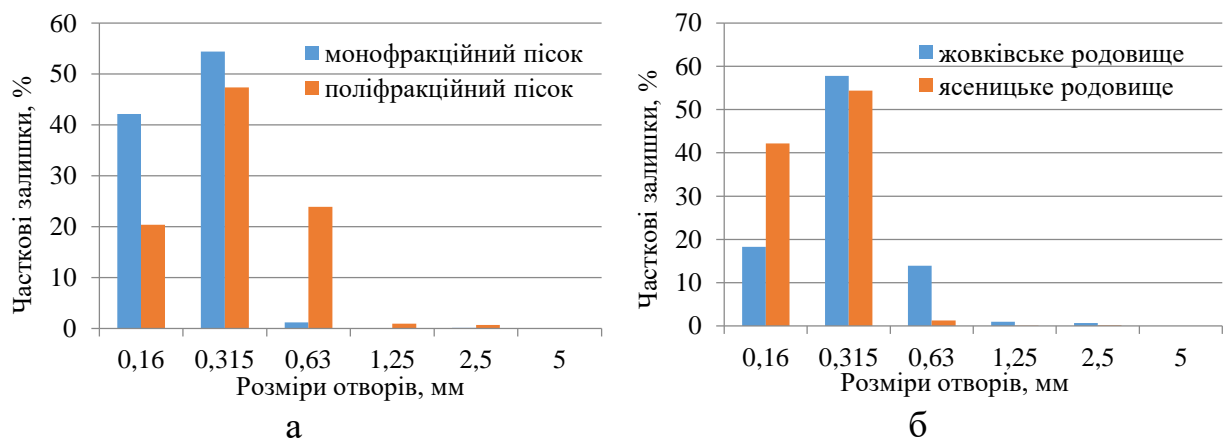


Рисунок 2.3 – Часткові залишки кварцових пісків

Як дрібні заповнювачі для проектування складів ремонтних сумішей використовували піски Ясинецького та Жовківського родовищ. На основі даних результатів просіювання дрібного заповнювача. Визначено, що часткові залишки на ситах 0,63, 0,315 та 0,16 мм для піску Ясинецького та Жовківського родовищ складають відповідно 1,26, 54,4 та 42,17 мас. % і 13,9, 57,8 та 18,3 мас. %. Модуль крупності пісків Ясинецького та Жовківського родовищ становить $M_k=1,25$ та $M_k=1,89$ відповідно. Криві розсіювання пісків

наведено на рис. 2.4, а-г. Показники якості дрібного заповнювача наведено в табл. 2.3. Дані піски характеризуються низьким вмістом органічних домішок.

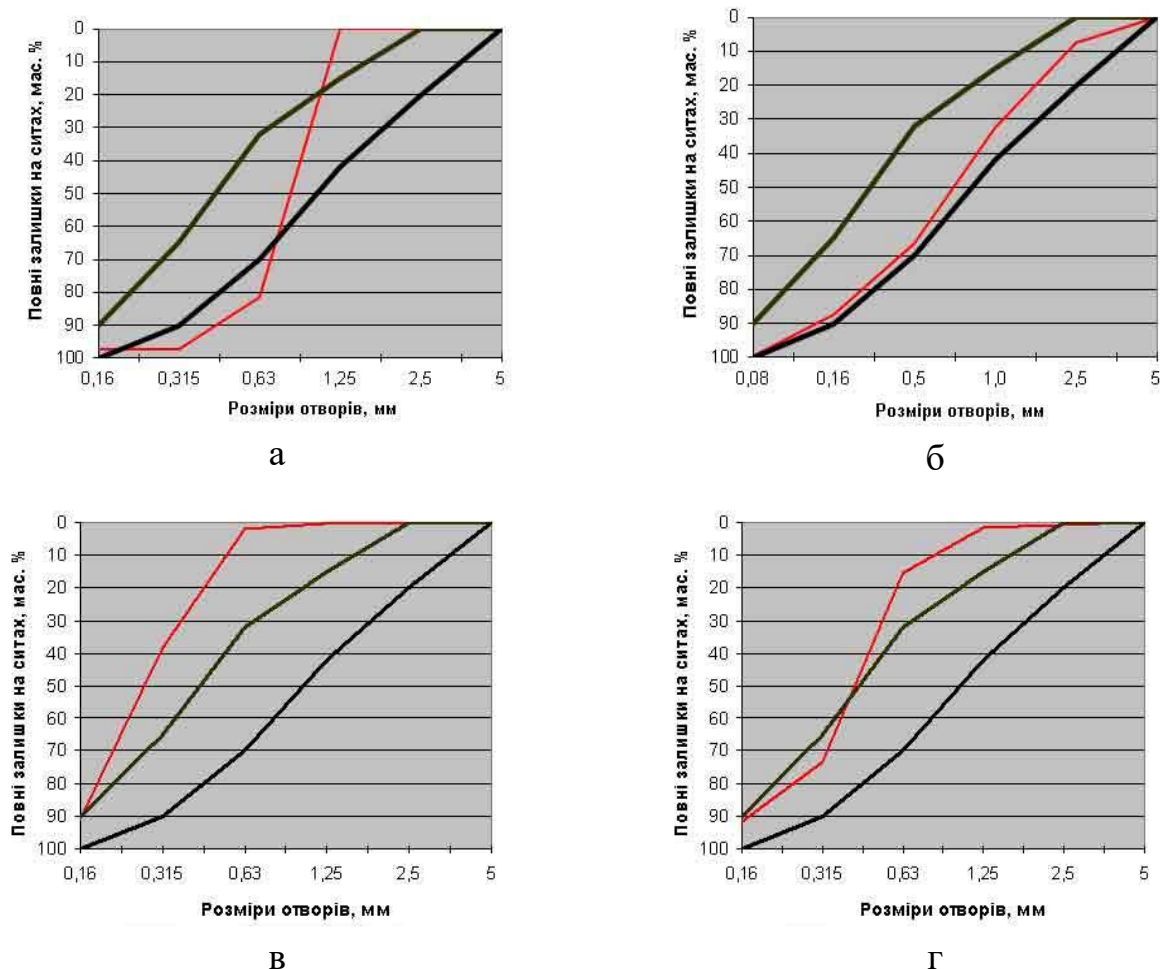


Рисунок 2.4 – Криві розсіювання пісків: а – стандартний монофракційний пісок, б – стандартний поліфракційний пісок, в – пісок Ясинецького родовища, г – пісок Жовківського родовища

Таблиця 2.3

Характеристика пісків

Родовище	Модуль крупності, $M_{кр}$	Насипна густина, кг/м^3	Пустотність, $V_{мп}, \%$	Вміст пиловидних і глинистих частинок, %
Ясинецьке	1,25	1380	47,5	2,7
Жовківське	1,89	1470	43,8	0,6

Для розроблення лужних портландцементів та для пришвидшення тверднення ремонтних сумішей в якості лужного активатора тверднення

використано тетрагідроксоалюмінат натрію $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ ТУ У 20.5-20841500-01:2018. Масова частка алюмінату натрію в добавці становить не менше 38 – 40 мас. %, а масова частка хлоридів менше 0,2-0,5 мас. %. Тетрагідроксоалюмінат натрію - прозора рідина із густиною 1,38 г/см³. рН розчину алюмінату натрію становить 13,0-13,3. Технічні характеристики тетрагідроксоалюмінату натрію представлені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Технічні характеристики тетрагідроксоалюмінату натрію

Назва	Хімічна формула	Зовнішній вигляд	Густина, кг/м ³	рН
Тетрагідроксоалюмінат натрію	$\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$	Прозора рідина	1380	13,3

Для порівняльних дослідження в якості прискорювачів тверднення застосовано сульфату натрію, форміат кальцію, натрієве рідке скло, нітрат кальцію. Сульфат натрію чистий відповідає ТУ 2141-028-00204854-95. Вміст сульфату натрію в добавці не менше 96,0-98,0 мас. %, густина - 2,68 г/см³. Розчинність при 20⁰С становить 28,0 г на 100 г, 42,3 г на 100 г, при температурі 100⁰С. Форміат кальцію ($\text{Ca}(\text{HCOO})_2$) ТУ 2432-011-00203803-98 – сіль кальцієва сіль мурашиної кислоти. Вміст форміату кальцію в добавці не менше 98 мас. %, істинна густина - 2,01 г/см³. Використовують для прискорення термінів тверднення бетонів та розчинів. Натрієве рідке скло (Na_2SiO_3) ТУ У 20.1-00293255-004:2014 – водний розчин силікату натрію. Прозора в'язка речовина, силікатний модуль 2,4. Нітрат кальцію $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ використовується для прискорення термінів тверднення - прискорює реакцію гідратації.

Для регулювання технологічних властивостей ремонтних сумішей використовували пластифікуючі добавки на основі поверхнево-активних речовин (ПАР). Було вибрано пластифікуючі добавки на основі лігносульфонатів технічних та суперпластифікатори на основі полікарбоксилатних етерів BASF та Sika. Суперпластифікатор BASF Glenium

АСЕ 430 (PCE) – добавка четвертого покоління на основі полікарбоксилатних етерів. Технічні характеристики Glenium АСЕ 430 наведені в табл. 2.5. Структурну формулу зображено на рис 2.5, б. Механізм дії суперпластифікатора зображено на рис 2.5, а.

Таблиця 2.5

Характеристика суперпластифікатора Glenium АСЕ 430

Густина г/см ³	Вміст сухої речовини, %	Вміст хлоридів, мас. %	рН (при 20°С)	Вміст лугів (Na ₂ O), мас. %
1,060	25,0	<0,1	5,5	<0,6

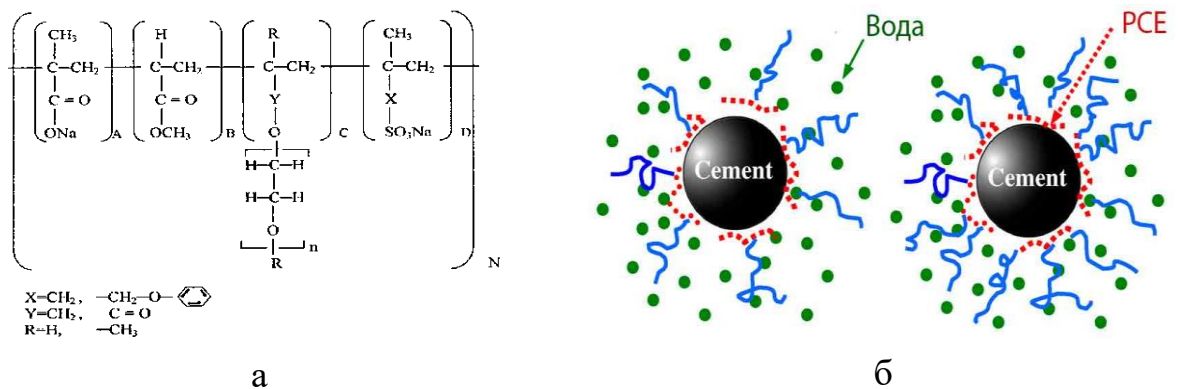


Рисунок 2.5 – Структурна формула (а) механізм дії (б) PCE

2.2. Фізико-механічні методи дослідження

Визначення фізико-механічних властивостей лужного портландцементу та будівельно-технічних властивостей ремонтних сумішей проведено згідно з діючими стандартами [19-23]. Перелік досліджуваних показників та нормативних документів наведено в табл. 2.6.

Для розроблення лужних композиційних портландцементів та ремонтних сумішей застосовано один з методів статистичної обробки результатів – метод ортогонального центрально-композиційного планування. Фізико-механічні властивості цементу визначали згідно діючих нормативних документів. Нормальну густоту цементного тіста (НГТ) визначали з використанням товчачика приладу Віка і його занурення в тісто. Терміни

тужавіння цементів та сумішей визначали вимірювали в часі, коли стандартна голка занурюється в цементне тісто, при НГТ, з періодичністю 10 хв. Водовідділення цементу досліджували в скляних колбах при співвідношенні В:Ц = 1:1. Спостереження проводили протягом 2-3 год. Кінетику зміни температури портландцементів та ремонтних сумішей вимірювали в термосах із використанням точкових електронних термометрів з точністю до 0,1 °С.

Таблиця 2.6

Досліджувані показники і методи випробувань

Показник	Нормативний документ
Нормальна густина тіста	ДСТУ Б.В. 2.7-185:2009
Терміни тужавіння	ДСТУ Б.В. 2.7-185:2009
Водовідділення	ДСТУ Б В.2.7-186:2009
Міцність на стиск/ згин	ДСТУ Б В.2.7-187:2009 ДСТУ Б EN 196-1:2015
Консистенція	EN 413-2
Середня густина	ДСТУ Б В.2.7-170:2008
Водопоглинання	ДСТУ Б В.2.7-239:2010
Деформації усадки	ДСТУ Б В.2.7-216:2009
Міцність зчеплення з основою	ASTM D4541
Рухливість	ДСТУ Б В.2.7-239:2010
Морозостійкість	ДСТУ Б В.2.7-49-96
Водонепроникність	EN 12390-8
Корозійна стійкість	ДСТУ ГОСТ 31384:2008

Марку та клас цементів за міцністю визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-187:2009 (В/Ц=0,39, монофракційний пісок) і ДСТУ EN 196-1:2007 (В/Ц=0,50, поліфракційний пісок). Зразки-балочки формували в форми розміром 40x40x160 мм та витримували протягом 12 год при $t=20 \pm 1$ °С та вологості повітря не менше 90 %. Після цього зразки занурювали у воду при температурі $t_{\text{води}}=20,0 \pm 1,0$ °С та випробовували через 12 год, 1; 2; 7 та 28 діб тверднення.

Міцність на згин визначали з використанням пресу МІІІ-100. Міцність на стиск визначали з використанням металевих пластин площею 25 см² та проводили випробування згідно ДСТУ Б В.2.7-187:2009 на гідравлічному пресі П50. Для визначення міцності згідно ДСТУ Б EN 196-1:2015 використовували механічний перехідник із площею пластини 16 см² (рис 2.6, в).

Власні деформації усадки та розширення ремонтних сумішей визначали на зразках-балочках 20x20x160 мм, із закладеними в торцях металевими анкерами за допомогою приладу УБ-40 з компаратором годинникового типу ІЧ 10 (ціна поділки 0,01 мм). Зразки-балочки під час проведення випробувань витримували у воді при температурі ($t_{\text{води}}=20,0 \pm 1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) протягом 7 діб; після цього виймали та витримували в повітряно-сухих умовах. Об'ємні деформації проводилися з використанням набірних металевих кілець (рис. 2.6, а) за допомогою компаратора з індикатором годинникового типу ІЧ 10 (ціна поділки 0,01 мм).

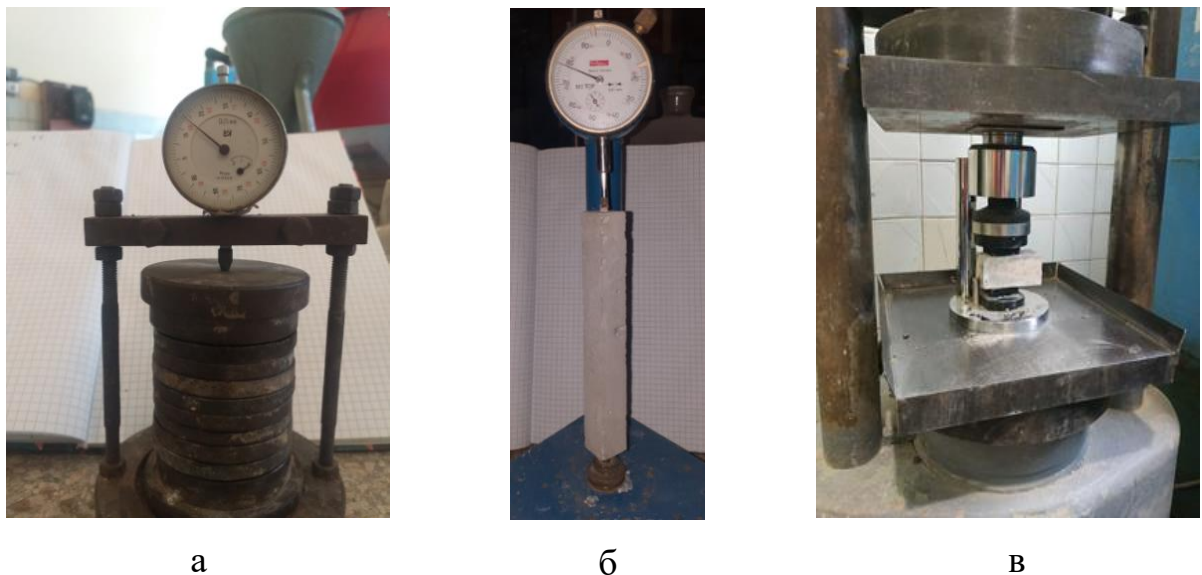


Рисунок 2.6 – Визначення деформацій (а, б) та випробування міцності при стиску згідно ДСТУ Б EN 196-1:2015 (в)

Міцність зчеплення з основою ремонтних сумішей визначали з використанням адгезиметра АЦ-1 (рис. 2.7, а) згідно ASTM D4541. Для дослідження на бетонну та цегляну поверхню було нанесено шар ремонтної

суміші товщиною 7 мм. Зразки зберігали 28 діб тверднення в нормальних умовах. Після цього на ремонтну суміш приклеювали металеві відривачі. Випробування проводилися шляхом відриву в напрямку перпендикулярно до поверхні (рис. 2.7, б).



Рисунок 2.7 - Адгезиметр механічний NOVOTEST АЦ-1 (а) та визначення міцності зчеплення з основою (б)

Рухливість розчинової суміші визначали за глибиною занурення еталонного конуса. Глибину осідання конуса округлювали до 1 см із метою визначення марки суміші згідно з ДСТУ Б В.2.7-239:2010. Середню густину ремонтної суміші визначала відношенням маси ущільненої суміші до об'єму. Водопоглинання визначали шляхом дискретного зважування попередньо висушених зразків у процесі їх водопоглинання згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Морозостійкість визначали за прискореною методикою в холодильній камері при температурі $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кількість циклів замороження визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-239:2010.

Дослідження водонепроникності ремонтної суміші проводили згідно з EN 12390-8 за максимальною глибиною проникнення води під тиском у зразок. Для дослідження готували зразки розміром 150x150x150 мм, що тверднули 28 діб в нормальних умовах. Дослідження проводили з використанням установки WUP 3 компанії «TESTING». Зразки досліджували

протягом 72 год при тиску води 8 бар. Тиск проникнення води визначали за формулою:

$$P = P_0 \sqrt{150/h}, \quad (2.1)$$

де P – розрахункове значення тиску проникнення води в зразок, МПа;

P_0 – фактичний тиск води, МПа;

h – глибина проникнення води в зразок, мм

2.3. Фізико-хімічні методи дослідження

Хімічний склад портландцементів та мінеральних добавок визначено з використанням рентгеноспектрометра ARL 9800 XP. Гранулометричний склад золи-винесення одержано з використанням аналізатора Mastersizer 3000 методом лазерної дифракції. Визначення фазового складу і мікроструктури лужних портландцементів, нанокомпозиту, розширної добавки проведено з використанням рентгенівської дифрактометрії та електронної мікроскопії. Для встановлення особливостей структури нанокомпозиту застосовано метод ІЧ-спектрального аналізу за коливальними спектрами. Вимірювання ІЧ-спектрів здійснювали з використанням спектрометра FT-IR-Nicolet 8700A. Визначення фазового складу зразків модифікованих лужних портландцементів, комплексної розширної добавки та цементуючої матриці ремонтної суміші виконано з використанням методу рентгенофазового аналізу на дифрактометрі ДРОН-3. Вивчення мікроструктури цементного каменю та модельних систем, було проведено з використання растрового електронного мікроскопу РЕМ-106И. Суть підготовки зразків полягає в нанесенні струмопровідного шару (золото, срібло, мідь) товщиною 500-1000 нм безпосередньо на свіжий скел цементного розчину.

РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ШТУЧНОГО КАМЕНЮ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ ЛУЖНИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ

3.1. Вплив лужних прискорювачів тверднення на властивості портландцементів різних типів

Розроблення інноваційних будівельних матеріалів є одним із пріоритетних завдань технологічного та економічного розвитку в галузі будівництва. На даний час висока швидкість будівництва, швидке виконання ремонтних робіт потребують застосування бетонів і будівельних розчинів із прискореним наростанням ранньої міцності. За останні роки у зв'язку із поглибленою спеціалізацією будівельних робіт зросли потреби ринку в хімічних добавках, що дозволяють забезпечити необхідний рівень властивостей цементних розчинів і бетонів спеціального призначення (швидкотверднучих, високоміцних, ремонтних і т. п.) [14, 17, 34, 35, 40, 54, 63, 68, 91, 105]. Із різних типів хімічних функціональних добавок слід виділити модифікатори, що регулюють процес тверднення цементних систем – прискорювачі тужавіння і тверднення.

На першому етапі досліджено вплив прискорювачів тверднення різних груп на фізико-механічні властивості портландцементу СЕМ І 42,5 R. Терміни тужавіння цементу визначали за стандартною методикою згідно з ДСТУ Б В.2.7-185:2009. Так, нормальна густина тіста СЕМ І 42,5 R складає НГТ=0,29. З рис. 3.1 видно, що початок тужавіння портландцементу становить 200 хв, а кінець – 240 хв. Введення 2,0 мас.% сульфату натрію скорочує терміни початку та кінця тужавіння портландцементу на 15,0 та 20,0 хв відповідно. При введенні до складу портландцементу 2,0 мас. % тетрагидроксиалюмінату натрію $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ водопотреба збільшилась до 0,34, а терміни початку та

кінця тужавіння зменшились в 3,4 рази до 30,0 та 70 хв, відповідно. Введення прискорювача нітрату кальцію $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ скорочує терміни початку та кінця тужавіння до 90 та 140 хв.

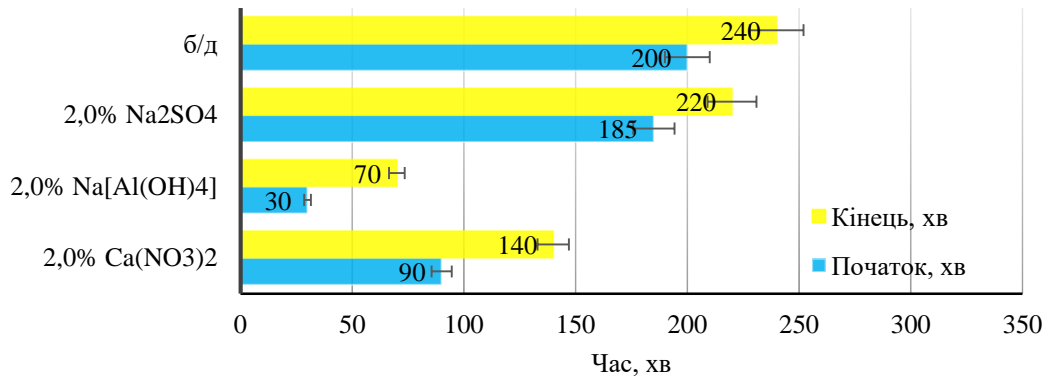


Рисунок 3.1 – Вплив прискорювачів різних груп на терміни тужавіння портландцементу СЕМ І 42,5 R

Досліджено вплив лужних прискорювачів на рухливість та міцність портландцементу СЕМ І 42,5 R. Дослідження проведено з використанням монофракційного піску. Як видно з рис. 3.2, розплив конуса для цементно-піщаного розчину на основі СЕМ І 42,5 R ($\text{Ц:П} = 1:3$, $\text{В/Ц} = 0,5$) становить 210 мм. Введення сульфату натрію (Na_2SO_4) не впливає на рухливість цементно-піщаного розчину. Форміат кальцію ($\text{Ca}(\text{HCOO})_2$) та тетрагідроксоалюмінат натрію ($\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$) зменшують рухливість цементно-піщаного розчину на 50 та 32 мм відповідно. Введення силікату натрію (Na_2SiO_3) дозволяє збільшити розплив конуса до 216 мм, а при введенні нітрату кальцію ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) рухливість зменшується до 194 мм.

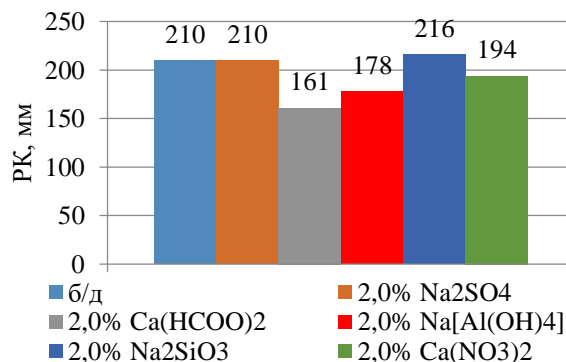


Рисунок 3.2 – Рухливість цементно-піщаного розчину на основі портландцементу СЕМ І 42,5 R з добавками прискорювачами

Дослідженнями встановлено, що для портландцементу СЕМ І 42,5 R (Ц:П = 1:3, В/Ц=0,5) міцність на стиск через 14 год становить 7,1 МПа, через 1 добу – 10,1 МПа, через 2 доби – 23,4 МПа, через 28 діб – 45,0 МПа (рис. 3.3, а). При введенні 2,0 мас.% Na_2SO_4 рання міцність через 14 год і 1 добу становить 7,4 та 11,0 МПа, через 2 та 28 діб – 11,0 та 46,0 МПа відповідно. При введенні 2,0 мас.% формиату кальцію ранню міцність через 14 год становить 7,6 МПа, через 1, 2 та 28 добу – 12,0, 25,0 та 47,0 МПа. При введенні 2,0 мас. % Na_2SiO_3 рання міцність на стиск становить 6,7 МПа, через 1 добу – 9,4 МПа, у віці 2 діб – 15,2 МПа, стандартна міцність через 28 діб становить 46,8 МПа. При введенні 2,0 мас.% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, через 14 год тверднення міцність складає 4,9 МПа, через 1 добу – 6,0 МПа, через 2 доби – 16,8 МПа, стандартна міцність на стиск складає 47,6 МПа. Встановлено, що найвищу особливо ранню міцність при стиску через 14 год показав склад (В/Ц=0,5) із вмістом 2,0 мас. $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ – 9,5 МПа. Така ж залежність спостерігається при визначенні міцності при згині. При введенні 2,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ міцність при згині через 14 год та 1 добу складає 3,2 та 5,5 МПа.

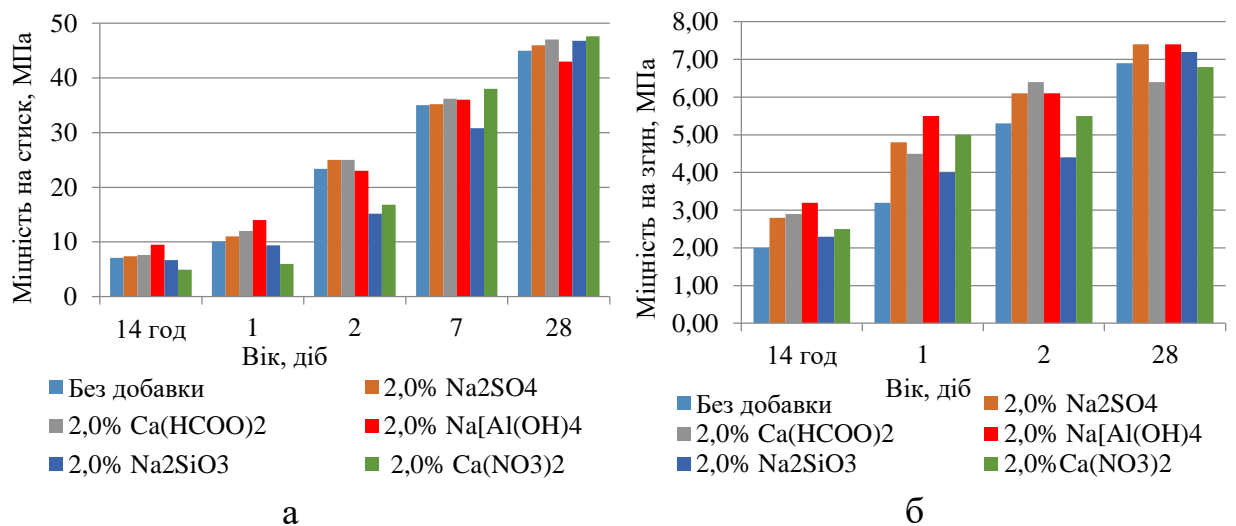


Рисунок 3.3 – Міцність при стиску (а) та міцність при згині (б) цементно-піщаного розчину на основі портландцементу СЕМ І 42,5 R з добавками прискорювачами тверднення

Вплив прискорювачів тверднення на водовідділення портландцементу СЕМ І 42,5 R досліджували згідно з ДСТУ Б В.2.7-186:2009. З рис 3.4, а, видно, що найбільшим водовідділенням $K_{06}=25,3$ % характеризується СЕМ І 42,5 R

без добавок. При введенні 2,0 мас.% Na_2SO_4 водовідділення знизилася до $K_{06}=10,5$ %. Показано, що введення прискорювачів тверднення зменшує водовідділення СЕМ І 42,5 R в 2 рази, що позитивно впливає на будівельно-технічні властивості розчинів. При введенні 2,0 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ водовідділення знизилася до $K_{06}=3,3$ %, що забезпечило зменшення розшарування і сприяло процесам раннього структуроутворення.

Досліджено вплив прискорювачів тверднення на водопоглинання портландцементу СЕМ І 42,5 R. Показано, що для портландцементу СЕМ І 42,5 R водопоглинання за масою становить 5,0 % (рис. 3.4, б). При введенні сульфату натрію Na_2SO_4 та формиату кальцію $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ до портландцементу СЕМ І 42,5 R водопоглинання складає 4,8 та 4,7 % відповідно. При використанні добавки Na_2SiO_3 водопоглинання зменшується до 3,9 %, а для портландцементу з добавкою $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ збільшується до 5,1 %. Встановлено, що при використанні лужного алюмінійвмісного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ показник водопоглинання знижується до 3,5%.

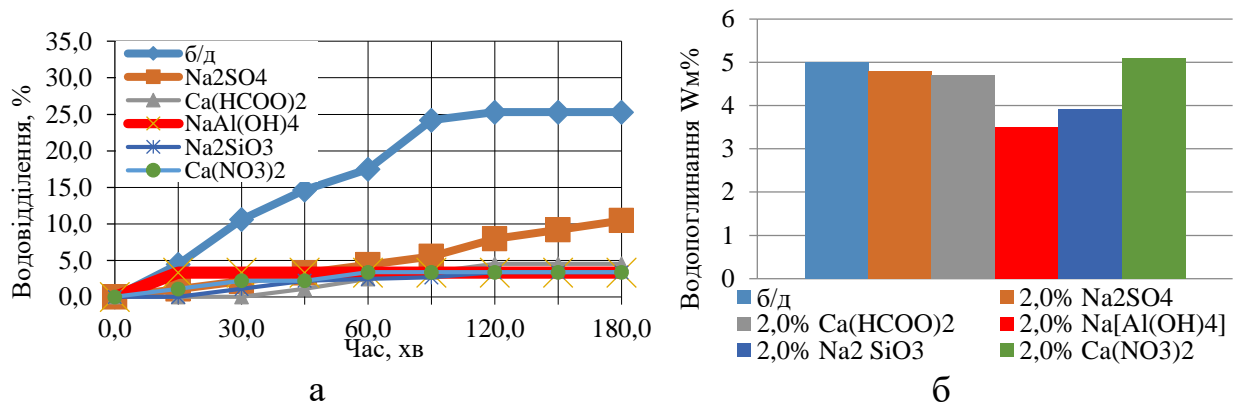


Рисунок 3.4 – Вплив лужних прискорювачів на водовідділення (а) та водопоглинання (б) портландцементу СЕМ І 42,5 R

Досліджено вплив прискорювачів тверднення на фізико-механічні властивості композиційного портландцементу СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R. Встановлено, що рухливість композиційного портландцементу СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R при В/Ц = 0,5 становить 185 мм (рис. 3.5). Введення сульфату натрію не має значного впливу на рухливість цементно-піщаного розчину. При введенні добавки формиату кальцію рухливість збільшується на 9,3 % до 204

мм, а застосування тетрагідроксоалюмінату натрію призводить до зменшення рухливості цементно-піщаного розчину на 13,4 % - до 163 мм. Показано, що силікат натрію та нітрат кальцію не впливають на рухливість портландцементу.

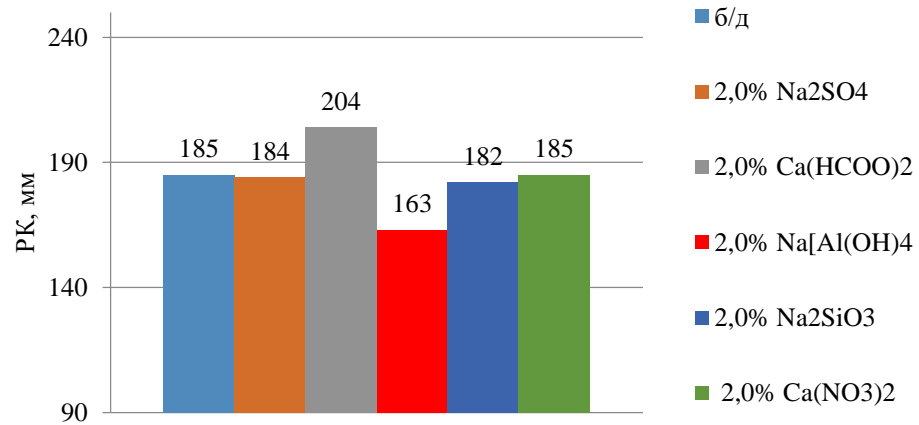


Рисунок 3.5 – Рухливість цементно-піщаного розчину з добавками прискорювачами на основі композиційного портландцементу СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R

Як видно з рис. 3.6, а, для композиційного портландцементу СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R рання міцність через 14 год складає 1,2 МПа, через 1 добу – 14,2 МПа, через 2 доби – 12,8 МПа, а через 28 діб становить 37,6 МПа. При додаванні 2,0 мас.% Na₂SO₄ рання міцність на стиск через 14 год, 1 та 2 доби – збільшується і становить 2,7; 5,6 та 14,0 МПа, через 28 діб складає 35,0 МПа. При введенні 2,0 мас.% формиату кальцію рання міцність через 14 год досягає 2,8 МПа, через 1 добу – 5,5 МПа, через 2 доби – 11,0 МПа, стандартна міцність на стиск складає 36,0 МПа. При введенні 2,0 мас. % Na₂SiO₃ міцність на стиск через 28 діб становить 36,8 МПа. При введенні 2,0 мас.% Ca(NO₃)₂ через 14 год міцність складає 3,2 МПа, через 1 добу – 4,8 МПа, через 2 доби – 11,6 МПа, через 28 діб складає 40,8 МПа. Слід відзначити, що найвищу ранню міцність при стиску у віці 14 год показав склад портландцементу композиційного з вмістом 2,0 мас. % Na[Al(OH)₄] – 5,0 МПа. При введенні 2,0 мас.% Na[Al(OH)₄] міцність при стиску через 1 добу становить 7,2 МПа, через 2 доби – 11,6 МПа,

у віці 28 діб – 32,0 МПа; міцність на згин через 14 год і 1 добу складає 2,1 та 3,3 МПа.

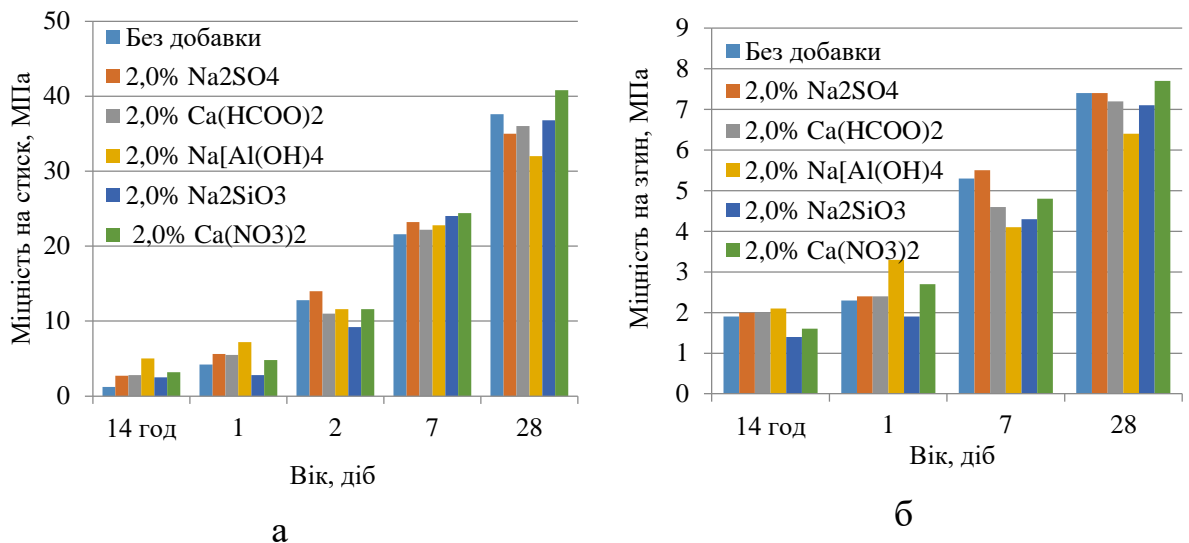


Рисунок 3.6 – Міцність при стиску (а) та згині (б) композиційного портландцементу SEM II/B-M(P-S-L) 32,5 R з добавками прискорювачами

В результаті проведених досліджень видно, що найбільший вплив на прискорення процесів тужавіння та ранню міцність портландцементів різних типів показав лужний алюмінійвмісний активатор тверднення Na[Al(OH)₄]. Тому в подальших дослідженнях для розроблення лужних портландцементів застосовано Na[Al(OH)₄]. В роботах [64, 82] показано, що при введенні алюмінійвмісних мінеральних добавок до складу цементів з карбонатним мікро наповнювачем призводить до прискореного тверднення цементуючої системи. Тому в подальшій роботі проведено дослідження впливу Na[Al(OH)₄] на властивості портландцементу з вапняком II типу SEM II/A-LL 42,5 R. Як видно з рис. 3.7, для цементно-піщаного розчину на основі портландцементу SEM II/A-LL 42,5 R (В/Ц = 0,50; Ц:П=1:3) терміни початку та кінця тужавіння становлять 240 хв та 280 хв. Показано, що введення 3,0 мас.% Na[Al(OH)₄] скорочує терміни початку тужавіння до 30 хв, а кінця – до 40 хв. Введення 5,0 мас. % Na[Al(OH)₄] скорочує терміни початку тужавіння до 20 хв, а кінець - до 30 хв.

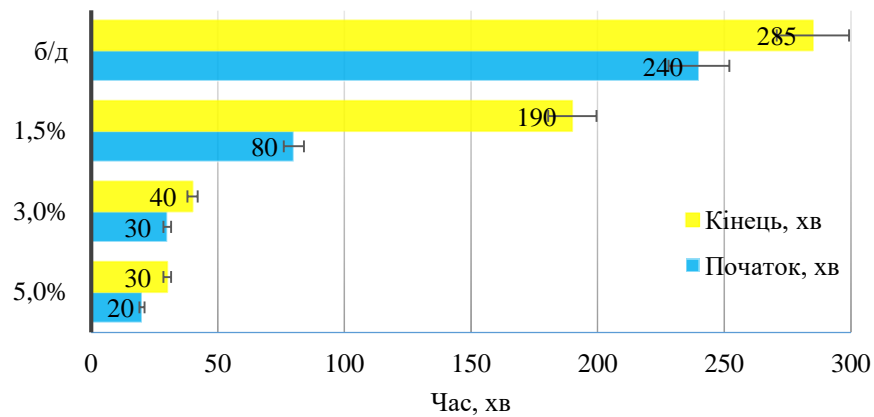


Рисунок 3.7 – Терміни тужавіння цементно-піщаного розчину на основі CEM II/A-LL 42,5 R з добавкою $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$

Результати впливу $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ на рухливість цементно-піщаного розчину на основі портландцементу CEM II/A-LL 42,5 R зображено на рис. 3.8, а. Встановлено, що при $\text{В/Ц} = 0,50$ для цементно-піщаного розчину на основі портландцементу CEM II/A-LL 42,5 R ($\text{Ц:П}=1:3$) розплив конуса становить 152 мм. При введенні 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ рухливість (РК) знизилася на 17,1% (до 126 мм), при введенні 3,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ спостерігається зниження пластичності на 27,6% (до 110 мм), введення 5,0 мас % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ призвело до зниження рухливості на 34,2% (до 105 мм). Показано, що при збільшенні кількості лужного прискорювача $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ до 5,0 мас. % зростає водопотреба цементно-піщаного розчину, а його рухливість – зменшується. Досліджено кінетику зміни рухливості цементно-піщаного розчину на основі CEM II/A-LL 42,5 R. Так, при введенні $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ в кількості 1,5 мас. % до портландцементу CEM II/A-LL 42,5 R спостерігається інтенсивне зниження рухливості в інтервалі від 15 до 45 хв (рис. 3.8, б). При збільшенні кількості лужного алюмінійвмісного активатора тверднення в портландцементі до 3,0 мас. % рухливість зменшується в інтервалі від 15 до 30 хв. Таким чином, збільшення вмісту добавки $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ до 5,0 мас. % призводить до інтенсивної втрати рухливості цементно-піщаного розчину вже через 20 хв.

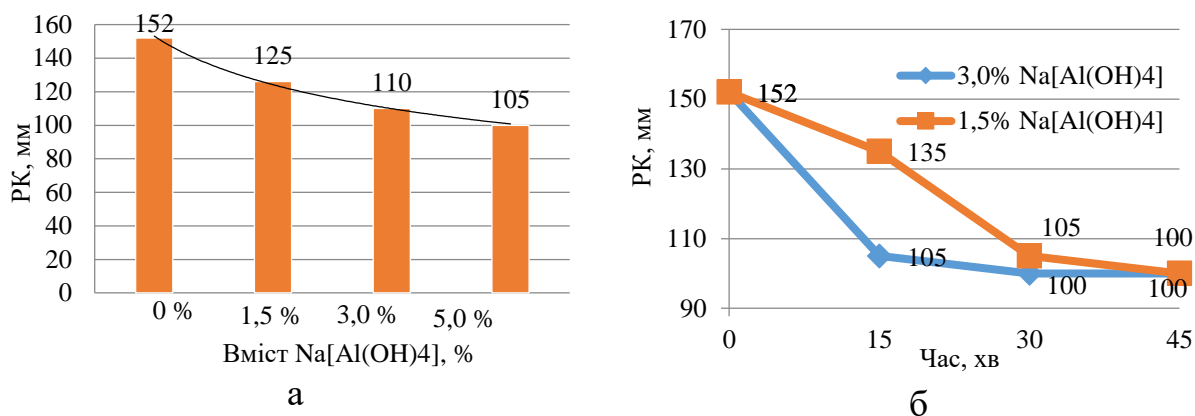


Рисунок 3.8 – Рухливість (а) та кінетика зміни рухливості (б) цементно-піщаного розчину на основі СЕМ II/A-LL 42,5 R

Як видно з рис. 3.9, а, для портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R міцність при стиску через 14 год становить 6,0 МПа. При введенні 1,5–3,0 мас.% Na[Al(OH)₄] міцність збільшується до 6,4 МПа, а при збільшенні кількості Na[Al(OH)₄] до 5,0 мас. % - зменшується до 3,6 МПа. Через 1 добу тверднення значних змін для даних складів не спостерігається. При цьому через 2 та 28 діб тверднення міцність знижується при введенні 1,5; 3,0 та 5,0 мас.% Na[Al(OH)₄] до 25,6; 21,3 та 15,6 МПа. В той же час, при введенні 1,5 мас.% Na[Al(OH)₄] призводить до зростання міцності при згині як через 14 год так і через 2 і 28 діб порівняно із складом без добавок (рис. 3.9, б).

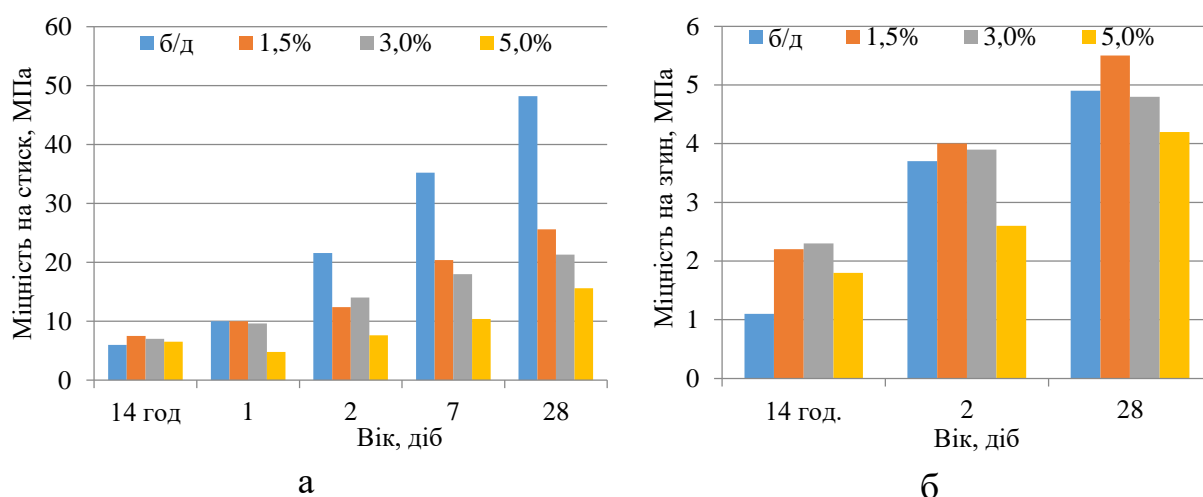


Рисунок 3.9 – Міцність при стиску (а) та міцність при згині (б) цементно-піщаного розчину на основі СЕМ II/A-LL 42,5 R з лужним активатором Na[Al(OH)₄]

Для зменшення негативної дії $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$, зокрема для зниження водопотреби та одержання цементно-піщаного розчину необхідної рухливості досліджено вплив полікарбоксилатного суперпластифікатора PCE на фізико-механічні властивості портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R з лужним активатором тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$. З рис 3.10 видно, що терміни початку та кінця тужавіння цементно-піщаного розчину на основі СЕМ II/A-LL 42,5 R (Ц:П=1:3) при введенні 1,0 мас. % PCE становлять 220 хв та 260 хв відповідно. При введенні 1,5 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 1,0 мас. % PCE терміни початку та кінця тужавіння зменшуються на 50 та 30 хв (до 170 та 230 хв), а введення 3,0 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 1,0 мас. % PCE та 5,0 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 1,0 мас. % PCE призводить до різкого скорочення початку тужавіння до 30-50 хв, а кінця – до 20-50 хв відповідно.

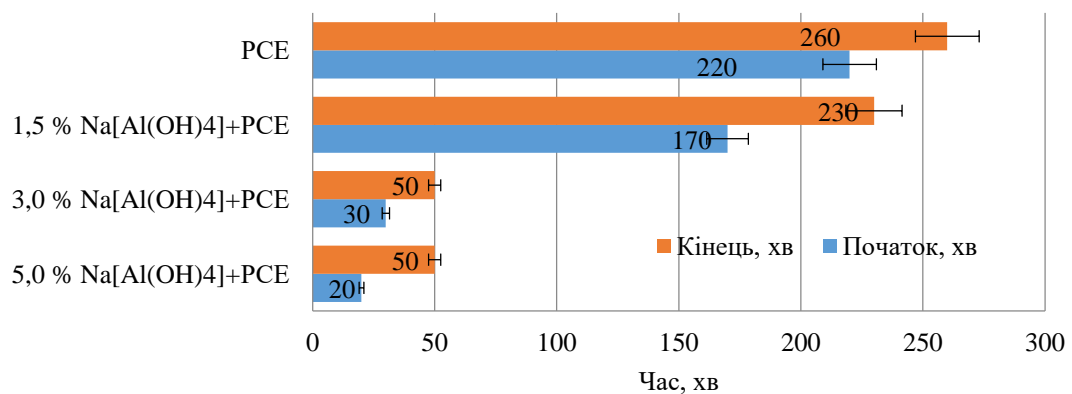


Рисунок 3.10 – Вплив $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та PCE на терміни тужавіння модифікованого цементно-піщаного розчину на основі СЕМ II/A-LL 42,5 R

Дослідженнями встановлено, що для портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R (Ц:П=1:3) при В/Ц = 0,50 рухливість становить 152 мм (рис. 3.11, а). При введенні 1,0 мас % PCE водопотреба знизилася на 24,0 % - до 0,38. При комплексному введенні 1,5 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 1,0 мас. % PCE водопотреба знизилася на 22,0 % від 0,50 до 0,39. Застосування 3,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ і 5,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ з 1,0 мас. % PCE дозволило знизити водопотребу на 17,0 і 8,0 % порівняно з складом без добавки.

Досліджено кінетику зміни рухливості модифікованого цементно-піщаного розчину (рис. 3.11, б). Показано, що при введенні $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ в кількості 1,5 мас.% + 1,0 мас. % PCE до портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R спостерігається зниження рухливості в інтервалі від 15 до 45 хв. При збільшенні кількості $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ до 3,0 мас. % + 1,0 мас. % PCE рухливість зменшується в інтервалі від 15 до 30 хв.

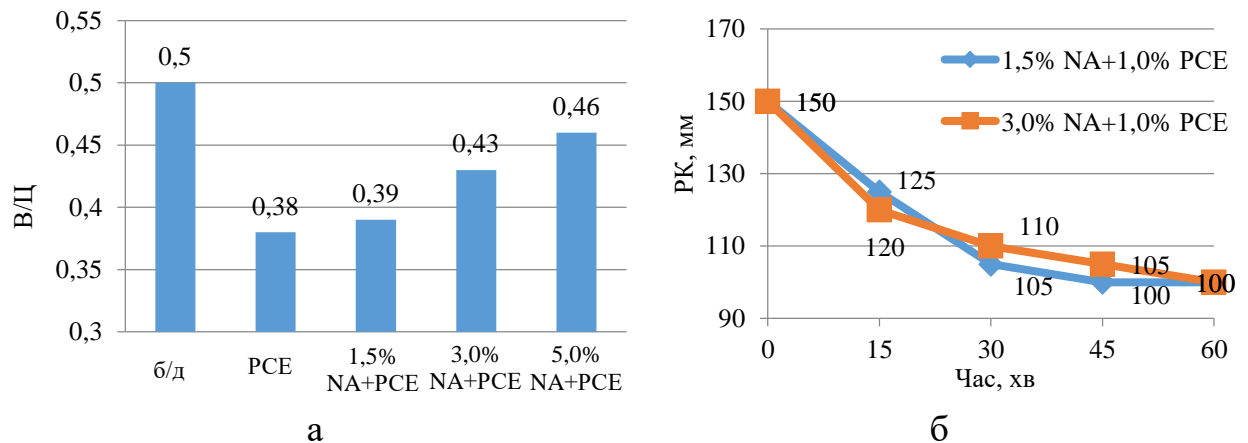


Рисунок 3.11 – Водо-цементне відношення (а) та кінетика зміни рухливості (б) модифікованого цементно-піщаного розчину на основі СЕМ II/A-LL 42,5

Досліджено вплив $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + PCE на міцність цементно-піщаного розчину на основі СЕМ II/A-LL 42,5 R (ПК=150-155 мм). Показано, що міцність на стиск через 14 год тверднення для СЕМ II/A-LL 42,5 R з вмістом 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 1,0 мас. % PCE становить 9,6 МПа (рис. 3.12, а). При збільшенні до 3,0 та 5,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ з 1,0 мас. % PCE міцність знижується до 7,2 та 5,6 МПа відповідно. Через 1 добу тверднення, міцність на стиск з вмістом 1,5, 3,0 та 5,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ складає 14,4; 10,0 та 6,8 МПа відповідно, а через 7 та 28 діб тверднення – 28,0; 20,4; 12,4 МПа та 46,0; 26,8; 22,1 МПа відповідно. Міцність при згині для портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R при введенні $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та PCE змінюється аналогічно (рис. 3.12, б). При проведенні порівняння складів без модифікатора (рис. 3.9, а) та з суперпластифікатором PCE (рис. 3.12, а), слід відзначити збільшення показників міцності на 44,0; 20,0 та 29,4 %.

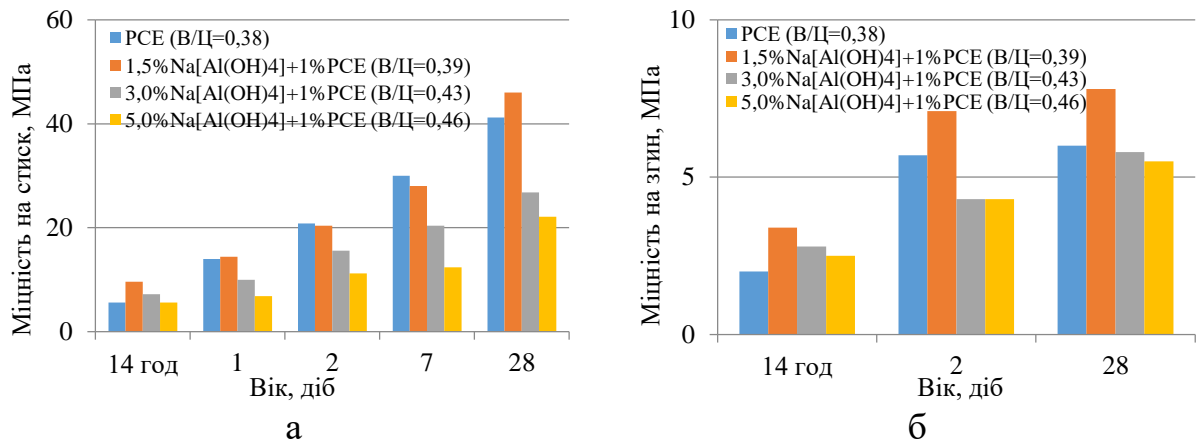


Рисунок 3.12 – Міцність при стиску (а) та міцність при згині (б) цементно-піщаного розчину на основі модифікованого портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R

Досліджено вплив $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + PCE на водовідділення та зміну температури гідратації портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R. З рис. 3.13, а, видно, що найбільшим водовідділенням характеризується портландцемент СЕМ II/A-LL 42,5 R – $K_{06} = 15,0\%$. Введення 5,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 1,0 мас. % PCE дозволяє знизити водовідділення до 1,0 %. В процесі гідратації встановлено (рис. 3.13, б), що найвищою температурою під час тверднення ($t = 83,4^\circ\text{C}$) характеризується портландцемент без добавок – 360 хв. Введення 5,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ призводить до зниження температури гідратації до $58,2^\circ\text{C}$ через 260 хв та прискоренням – на 120 хв. При введенні 5,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 1,0 мас. % PCE температура становить $58,2^\circ\text{C}$.

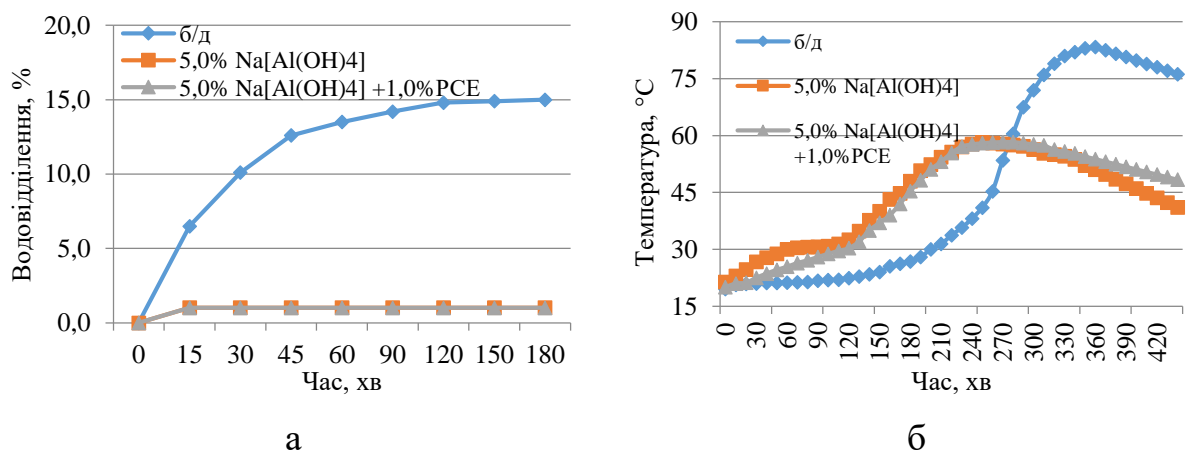


Рисунок 3.13 – Водовідділення (а) та зміна температури (б) портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R з добавками модифікаторами $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та PCE

Таким чином, модифікований портландцемент СЕМ II/A-LL 42,5 R з лужним прискорювачем тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та суперпластифікатором полікарбоксилатного типу PCE характеризується прискореним тепловиділенням та пониженим водовідділенням, що позитивно впливає на його будівельно-технічні властивості. Введення полікарбоксилатного суперпластифікатора дозволяє знизити водопотребу лужного портландцементу та дає можливість отримати більш щільну структуру каменю.

3.2. Оптимізація складів лужних портландцементів, модифікованих комплексною добавкою $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ – PCE

На першому етапі досліджено вплив активних мінеральних алюмінійвмісних добавок пуцоланової дії (зола-винесення (ЗВ), метакаолін), лужного активатора тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та PCE Master Glenium ACE 430 на фізико-механічні властивості портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5R. Визначення впливу активних мінеральних добавок на водо-цементне відношення портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5R здійснювалося за допомогою розпливу стандартного конуса. Згідно ДСТУ Б EN 196-1 визначення показників міцності портландцементу проведено з використанням поліфракційного піску СЕН. Як видно з рис. 3.14, а, для СЕМ II/A-LL 42,5 R при В/Ц = 0,50 розплив стандартного конуса становить РК=170 мм. При введенні 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ розплив конуса зменшується до 160 мм, а при сумісному введенні 5,0 мас. % метакаоліну + 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ розплив конуса знижує до 167 мм. При введенні 5,0 мас. % ЗВ + 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ розплив конуса становить 170 мм. При введенні 5,0 мас. % ЗВ + 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 1,0 мас. % PCE В/Ц зменшилося до 0,35, для забезпечення рухливості 170 мм (рис. 3.14, б).

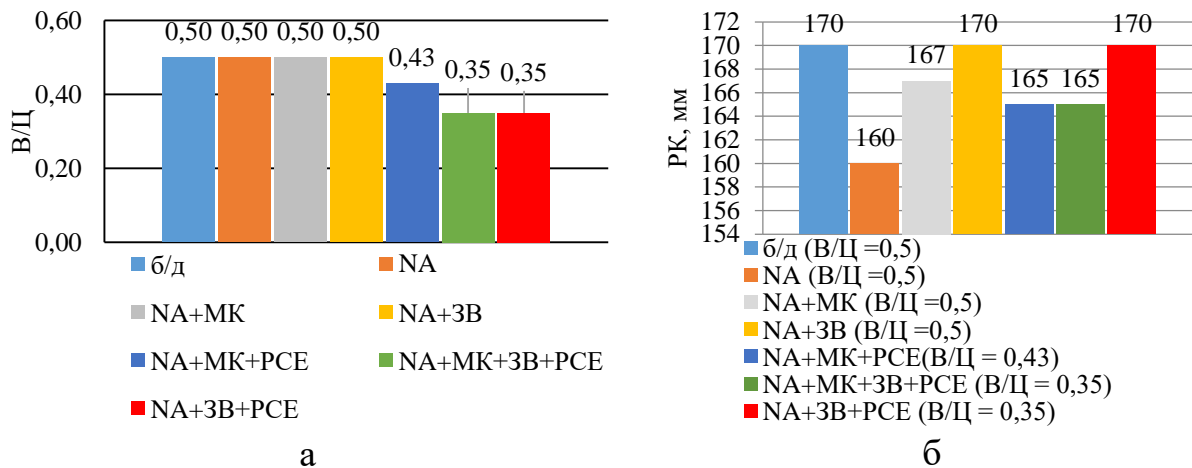


Рисунок 3.14 – Водо-цементне відношення (а) та розплив конуса (б) модифікованого лужного портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R

Показники міцності визначали згідно з ДСТУ Б EN 196-1:2015. З рис. 3.15, а, видно, що портландцемент з вапняком СЕМ II/A-LL 42,5 R при В/Ц=0,50 характеризується ранньою міцністю через 12 год, 1 та 2 доби – 4,3; 15,0 та 28,1 МПа відповідно. Через 28 діб тверднення міцність портландцементу досягнула 61,0 МПа. При введенні 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ до складу СЕМ II/A-LL 42,5 R міцність через 12 год, 1 та 2 доби збільшилася до 6,9; 17,5 та 28,7 МПа; через 28 діб міцність складає 57,8 МПа. При введення 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 5,0 мас. % метаксаоліну в портландцемент міцність через 12 год, 1 та 2 доби становить 5,6; 16,3 та 31,2 МПа; через 28 діб міцність збільшилася до 68,1 МПа. При введенні 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 5,0 мас. % ЗВ рання міцність через 12 год, 1 та 2 доби становить 6,3; 15,6 та 28,1 МПа, а через 28 діб – 54,6 МПа. При введенні 1,0 мас. % PCE + 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 5,0 мас. % метаксаолін міцність на стиск через 12 год; 1 та 2 доби досягнула 9,4, 20,6 та 40,0 МПа, що на 22,0 % більше в порівнянні із складом без PCE. Зменшення В/Ц до 0,35 для портландцементу із вмістом комплексної органо-мінеральної добавки 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 5,0 мас. % ЗВ + 5,0 мас. % метаксаоліну дозволило збільшити ранню міцність – через 12 год до 6,25 МПа; при цьому стандартна міцність складає 69,3 МПа. В той же час, введення комплексної органо-мінеральної добавки ЗВ + $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + PCE забезпечило найвищі показники міцності на стиск у всі терміни тверднення. Так, через 12

год міцність збільшилась в 4,2 рази і досягнула 19,3 МПа, через 1 добу – в 2,2 рази (35,0 МПа), через 2 доби в 1,8 рази (51,2 МПа), через 28 діб – в 1,2 рази (73,7 МПа) порівняно з портландцементом без добавки. Результати міцності при згині збільшуються також у всі терміни тверднення. Найвищий показник ранньої міцності при згині через 12 год становить 5,4 МПа для даного складу (рис. 3.15, б).

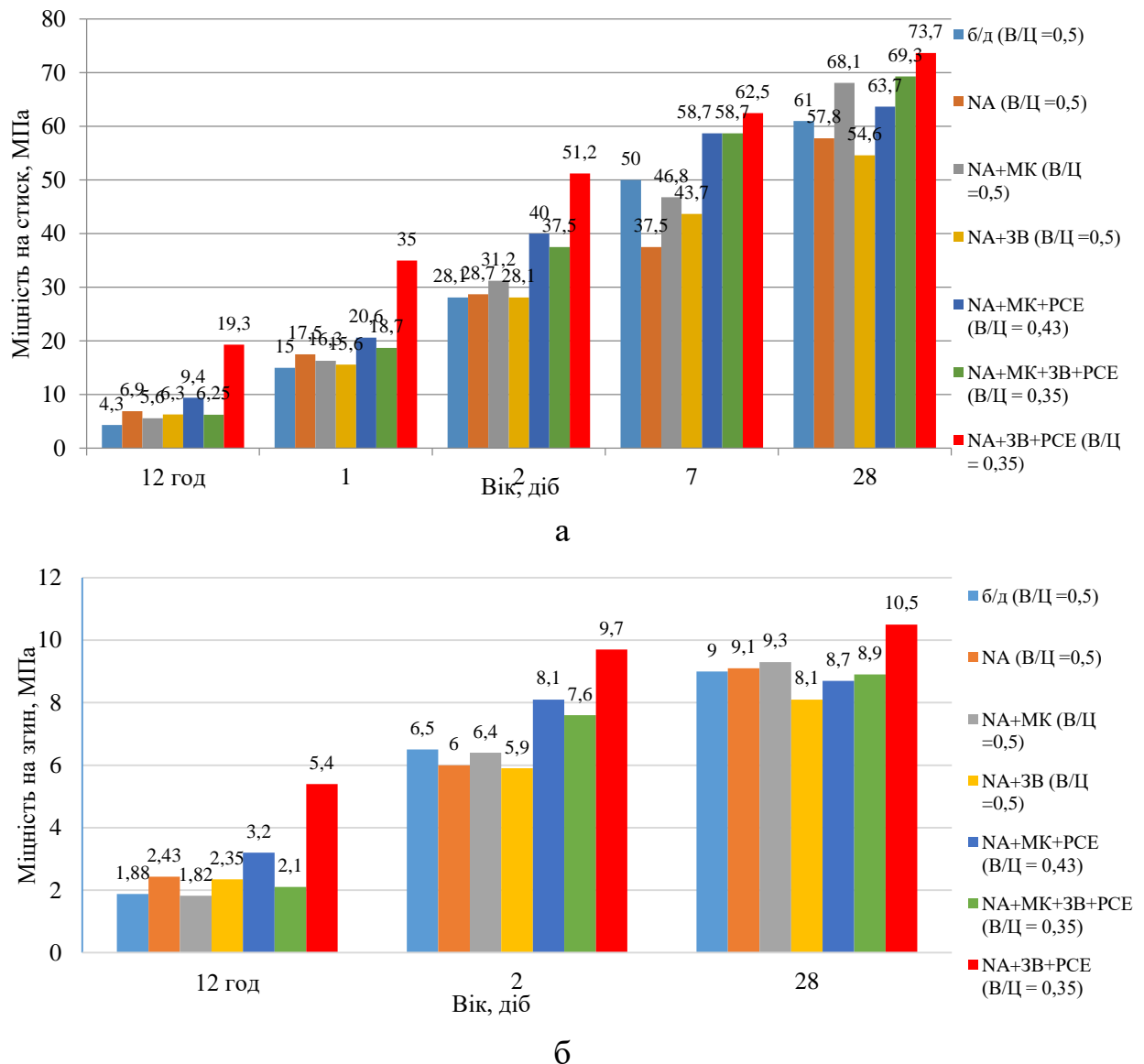


Рисунок 3.15 – Міцність на стиск (а) та згин (б) модифікованих лужних портландцементів на основі СЕМ ІІ/А-LL 42,5R

Отже, введення полікарбонатного суперпластифікатора забезпечує необхідну рухливість та високу щільність модифікованої лужноактивованої

цементуючої матриці. Синергетичне поєднання активних мінеральних алюмінійвмісних добавок, лужного алюмінійвмісного активатора та РСЕ дозволяє збільшити як технологічний ефект, так і технічний ефекти. Введення органо-мінеральної добавки забезпечує водоредукуючий ефект на рівні $\Delta B/C=30,0\%$. Рання міцність через 12 год та стандартна міцність лужного портландцементу на основі СЕМ II/A-LL 42,5R складає відповідно 19,3 МПа та 73,7 МПа. Таким чином, високий технічний ефект ($\Delta R_{Rc12год}=78,0\%$, $\Delta R_{Rc1}=57,0\%$) дозволяє одержати швидкотверднучий модифікований лужний портландцемент з високою ранньою міцністю ($\Delta R_{Rc1}/R_{Rc28}=47,5\%$, $\Delta R_{Rc2}/R_{Rc28}=69,4\%$).

Досліджено вплив модифікаторів на властивості композиційного портландцементу СЕМ II/B-M(P-S-L) 32,5 R з пониженим клінкер-фактором $K_f=0,65$, який у своєму компонентному складі уже містить мінеральні добавки гранульованого доменного шлаку, цеоліту та вапняку. Для досліджень застосовано лігносульфонати технічні (ЛСТ). З рис. 3.16, а, видно, що для композиційного портландцементу СЕМ II/B-M(P-S-L) 32,5 R (Ц:П=1:3) водоцементне відношення становить 0,45 для забезпечення розпливу конуса 115 мм. При введенні $Na[Al(OH)_4]$ в кількості 1,5 мас. % В/Ц збільшилося до 0,47 (РК=114 мм). При модифікуванні цементно-піщаного розчину 0,75 мас. % ЛСТ водопотреба зменшується на 15,5 % В/Ц=0,38.

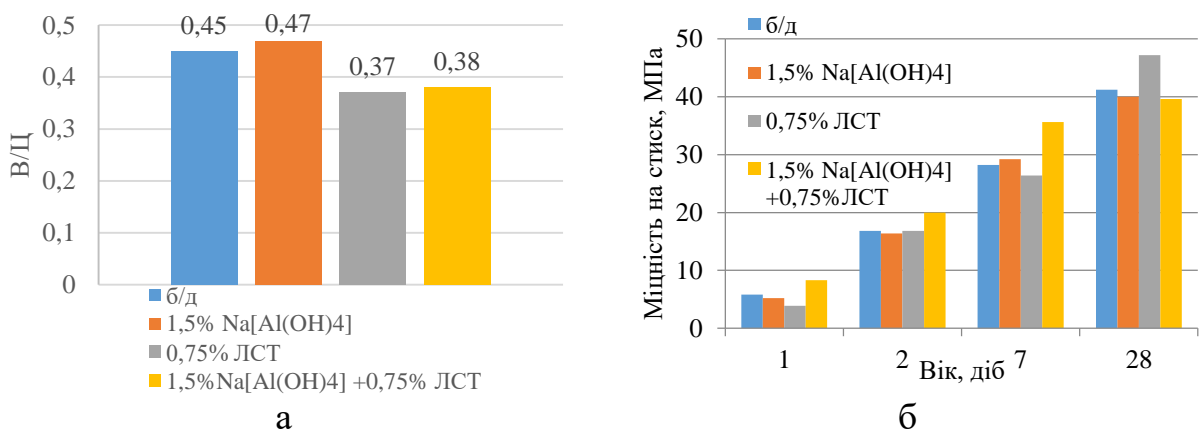


Рисунок 3.16 – Вплив хімічних модифікаторів на фізико-механічні властивості композиційного портландцементу СЕМ II/B-M(P-S-L) 32,5 R:

а – водо-цементне відношення; б – міцність при стиску

Як видно з рис. 3.16, б, для композиційного портландцементу СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R міцність на стиск через 1 добу становить 5,8 МПа, через 2, 7 та 28 діб складає 16,8, 28,2 та 41,2 МПа відповідно. При введенні 1,5 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ міцність знижується до 5,2 МПа, у віці 7 та 28 доби міцність складає 29,2 та 40,0 МПа відповідно. При цьому введення 0,75 мас. % ЛСТ дозволило збільшити міцність цементно-піщаного розчину через 28 діб до 47,2 МПа.

Проведено дослідження впливу лужного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та полікарбоксилатного суперпластифікатора PCE Master Glenium 430 на властивості СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R. Дослідження впливу добавки $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та PCE на властивості СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R (Ц:П=1:3, РК=113-115 мм) проведено методом математичного планування експерименту. Визначення міцності композиційного портландцементу із використанням добавки $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та PCE проводили згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-187:2009. В якості змінних факторів оптимізації було вибрано вміст $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ ($X_1=0; 1,5; 3,0$ мас.%) та полікарбоксилатного суперпластифікатора PCE ($X_2=0; 1,0; 2,0$ мас.%) у портландцементі композиційному (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Характеристика плану експерименту

Характеристика	Параметри планування	
	$\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$, мас.% (X_1)	PCE, мас.% (X_2)
Головний рівень «0»	1,5	1,0
Нижній рівень «-1»	0	0
Верхній рівень «+1»	3,0	2,0
Інтервал варіювання	1,5	1,0

Функціями відгуку прийнято міцність при стиску через 1, 2 та 28 діб (Y_{Rc1} , Y_{Rbt1} , Y_{Rc2} , Y_{Rbt2} , Y_{Rc28} , Y_{Rbt28} МПа) в нормальних умовах тверднення. Матриця планування та результати двофакторного експерименту представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Матриця планування та результати двофакторного експерименту
із використанням добавок $Na[Al(OH)_4]$ та РСЕ

№ з/П	Матриця планування		В/Ц	Границя міцності зразків на згин, МПа, у віці, діб			Границя міцності зразків на стиск, МПа, у віці, діб		
	X_1	X_2		1	2	28	1	2	28
1.	+1	+1	0,35	3,2	4,1	6,8	11,3	23,2	40,3
2.	+1	-1	0,45	1,3	1,6	2,6	4,2	12,4	21,5
3.	-1	+1	0,30	3,5	4,5	7,4	12,3	25,2	43,8
4.	-1	-1	0,40	1,5	3,8	6,4	5,8	16,8	29,2
5.	+1	0	0,35	3,6	4,6	7,6	12,6	25,8	44,8
6.	-1	0	0,34	2,9	3,8	6,3	9,2	30,8	53,5
7.	0	+1	0,30	3,4	4,1	6,8	11,8	24,2	42,0
8.	0	-1	0,42	1,5	3,9	6,4	5,2	16,8	29,2
9.	0	0	0,41	4,7	5,7	9,4	15,9	32,0	55,6

В результаті проведення двофакторного експерименту отримана математична модель у вигляді рівняння регресії:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (3.1)$$

де b_0 , b_i , b_{ik} , b_{ij} – коефіцієнти регресії

$$Y_{Rc1} = 13,72 + 0,133X_1 + 3,367X_2 - 1,733 X_{11} - 4,133X_{22} + 0,15X_1X_2 \quad (3.2)$$

$$Y_{Rbt1} = 4,06 + 0,033X_1 + 0,97X_2 - 0,50 X_{11} - 1,34X_{22} - 0,018X_1X_2 \quad (3.3)$$

$$Y_{Rc2} = 30,84 - 1,90X_1 + 4,43X_2 - 1,96 X_{11} - 9,76X_{22} - 0,60X_1X_2 \quad (3.4)$$

$$Y_{Rbt2} = 5,25 - 0,307X_1 + 0,562X_2 - 0,83 X_{11} - 1,015X_{22} + 0,475X_1X_2 \quad (3.5)$$

$$Y_{Rc28} = 53,98 - 3,33X_1 + 7,76X_2 - 3,46 X_{11} - 17,1X_{22} + 1,05X_1X_2 \quad (3.6)$$

$$Y_{Rbt28} = 8,67 - 0,517X_1 - 0,933X_2 - 1350X_{11} - 1,70 X_{22} + 0,800X_1X_2 \quad (3.7)$$

Проведеним аналізом математичної моделі встановлено, що введення лужного алюмінійвмісного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ (фактор X_1) призводить до збільшення В/Ц від 0,35 до 0,42 та зниження міцності при стиску. При введенні суперпластифікатора РСЕ (фактор X_2) міцність зростає на 46,0 % з 21,5 до 40,3 МПа. При збільшенні вмісту $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ міцність знижується пропорційно, через високу пористість та підвищене водо-цементне відношення. Найнижчими показниками міцності через 1 добу характеризується склад із вмістом 3,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ без РСЕ, що складає 4,2 МПа, а через 28 діб – 21,5 МПа. Суперпластифікатор РСЕ дозволяє зменшити негативний вплив $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ шляхом зниження водопотреби та ущільнення цементуючої матриці. При введенні 2,0 мас. % РСЕ в суміш без лужного алюмінійвмісного активатора рання міцність на стиск через 1 добу складає 12,3 МПа, а через 28 діб складає 43,8 МПа. Найвищим показниками міцності характеризується склад із вмістом 1,0 мас. % РСЕ + 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ через 1 добу – 15,9 МПа, а через 28 діб – 55,6 МПа.

За отриманими рівняннями регресії побудовано поверхні відгуку зміни міцності при згині та стиску модифіковано лужного композиційного портландцементу через 1, 2 та 28 діб (рис. 3.17, а-е). Графічна інтерпретація даних експериментально-статистичного моделювання свідчить, що оптимальний вміст 1,5 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ + 1,0 мас.%. РСЕ забезпечує одержання модифікованого лужного композиційного портландцементу з високою ранньою та стандартною міцностями. Отже, за рахунок синергетичного ефекту взаємодії активних мінеральних добавок в складі модифікованого лужного композиційного портландцементу, лужного алюмінійвмісного активатора тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та полікарбоксилатного суперпластифікатора забезпечується підвищена рання та стандартна міцності [25].

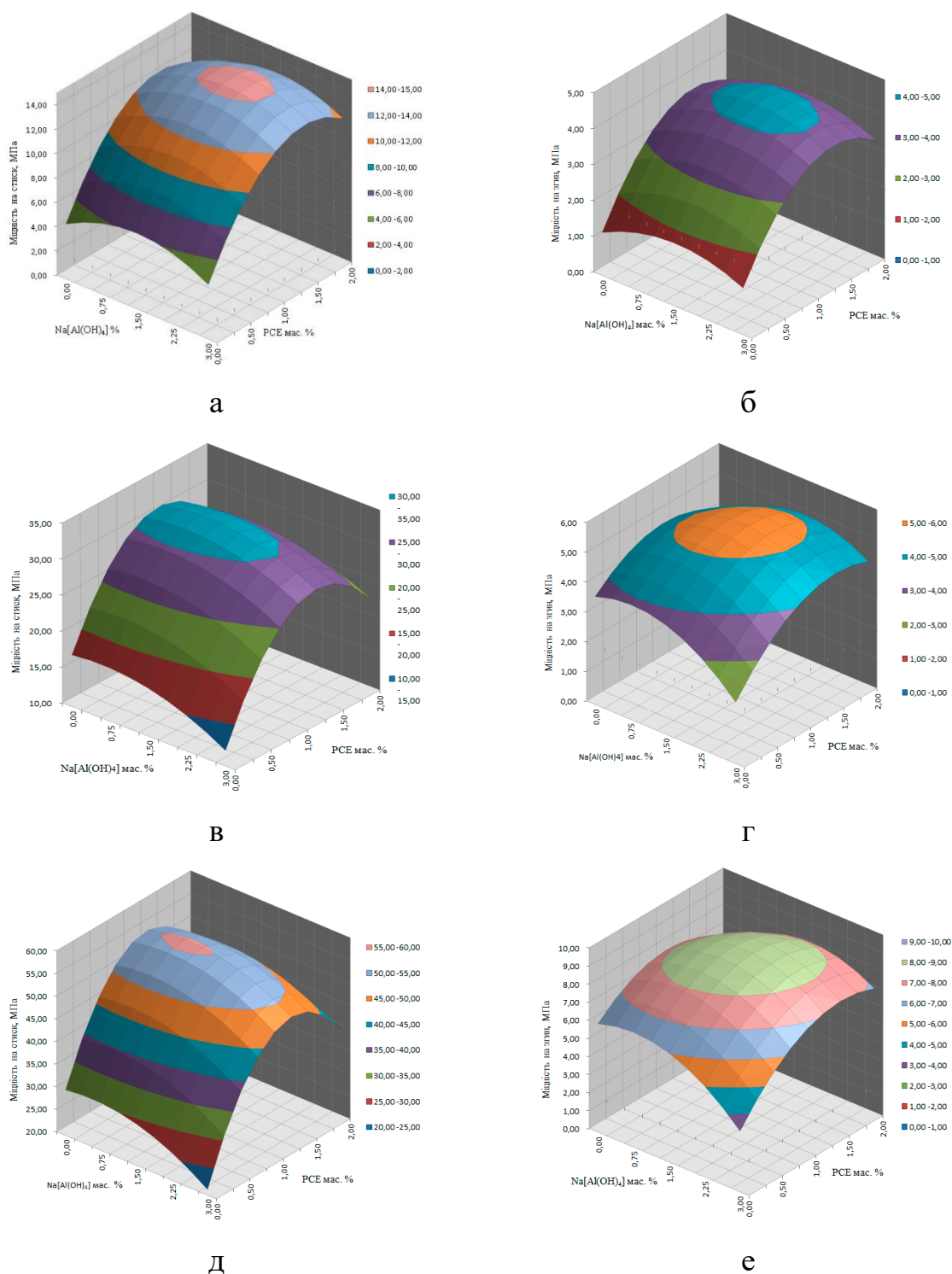


Рисунок 3.17 – Ізопараметричні поверхні відгуку зміни міцності при стиску (а, в, д) та при згині (б, г, е) через 1, 2 та 28 діб тверднення модифікованого лужного композиційного портландцементу

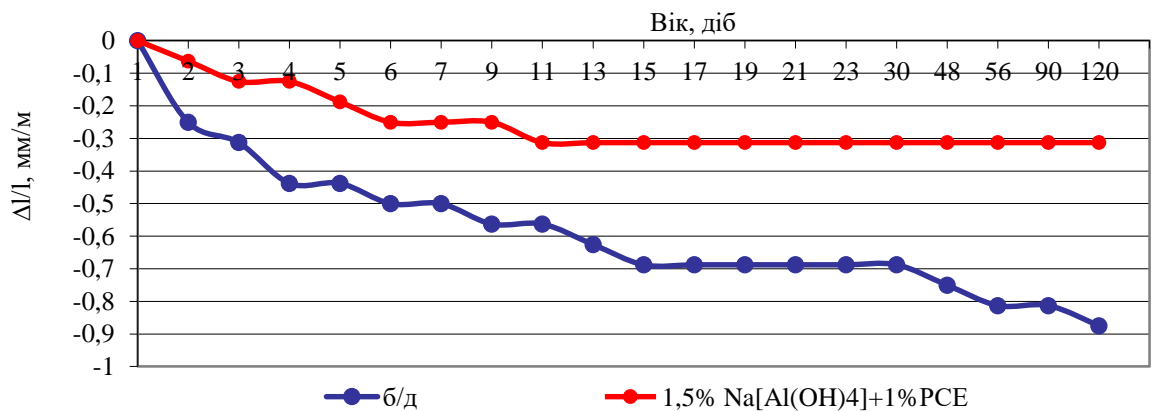
Модифікований лужний композиційний портландцемент з високою ранньою міцністю та класу міцності 42,5 R можна одержати за «бетонною» технологією [33] шляхом сумісного змішування композиційного портландцементу СЕМ II/В-М(S-P-L), лужного алюмінійвмістного прискорювача $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та РСЕ. Випробуваннями модифікованого лужного композиційного портландцементу згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009 встановлено, що при В/Ц=0,39 досягається РК=114 мм. За ранньою і стандартною міцностями модифікований лужний композиційний портландцемент відповідає марці 500, згідно ДСТУ Б EN 197-1 класу міцності 42,5R (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

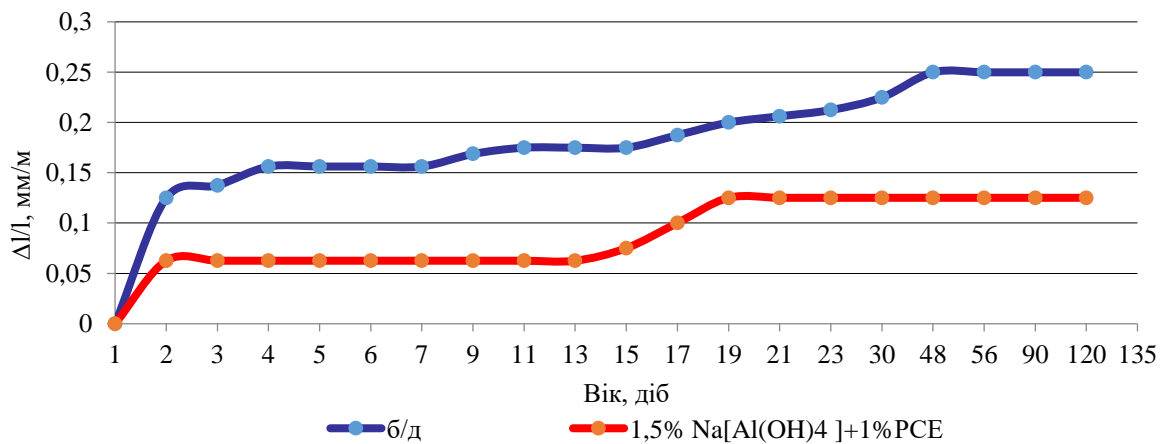
Фізико-механічні властивості модифікованого лужного композиційного портландцементу

Показник		Вимоги EN 197-1 (ДСТУ Б В.2.7-46)	Значення
Вміст добавок, %		21-35	35,0
Питома поверхня (за Блейном), м ² /кг		–	410
Нормальна густина тіста, %		–	29,0
Терміни тужавлення, хв	початок	≥60	120
	кінець	–	180
Розплив конуса, мм		–	175 (114)
Водовідділення, %		–	10,4
Міцність на стиск, МПа	1 доба	–	17,0
	2 доби	≥ 20,0 (20,0)	26,0 (33,5)
	28 діб	≥ 42,5 ≤ 62,5 (50)	54,0 (62,4)

Досліджено деформації усадки лужного композиційного портландцементу класу міцності 42,5 в повітряно сухих умовах та у воді при $t = 20^{\circ}\text{C}$. Як видно з рис. 3.18, а, для портландцементу СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R деформації усадки через 2; 28 і 120 діб складають відповідно 0,25; 0,68 і 0,87 мм/м. В той же час, для модифікованого лужного композиційного портландцементу деформації зменшуються через 2 доби в 4 раз, 28 діб – в 2,2 раз і через 120 діб – в 2,8 раз і складають відповідно 0,06; 0,31 і 0,31 мм/м.



а



б

Рисунок 3.18 – Деформації лужного композиційного портландцементу: а – у повітряно-сухих умовах, б - у воді

При дослідженні лужного композиційного портландцементу у воді (рис. 3.18, б) встановлено, що спостерігаються деформації розширення. Так, для композиційного портландцементу СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R деформації розширення через 2; 28 і 120 діб складають відповідно 0,12; 0,21 і 0,25 мм/м.

В той же час, для модифікованого лужного композиційного портландцементу деформації зменшуються через 2 доби в 2 рази, через 28 діб – в 1,7 раз і через 120 діб – в 2 рази і складають відповідно 0,06; 0,12 і 0,12 мм/м.

Дослідженнями згідно ДСТУ Б В.2.7-186:2009 показано, що найбільшим водовідділенням $K_{06}=25\%$ характеризується композиційний портландцемент без добавок (рис. 3.19, а). Введення 2,0 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ дозволяє знизити водовідділення до $K_{06}=5,0\%$, а введення $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{PCE}$ – до $K_{06}=8,0 - 10,0\%$. Досліджено зміну температури гідратації лужних композиційних портландцементів. Встановлено (рис. 3.19, б), що найвища температура гідратації ($t=74,5\text{ }^\circ\text{C}$) досягається через 360 хв для складу без добавок. Введення 5,0 мас. % $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ призводить до прискорення гідратації на 110 хв, при цьому температура знижується до $58,2\text{ }^\circ\text{C}$. Для лужного портландцементу із використанням 2,0 мас. % $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{PCE}$ досягається температура гідратації $65,2\text{ }^\circ\text{C}$ за 340 хв.

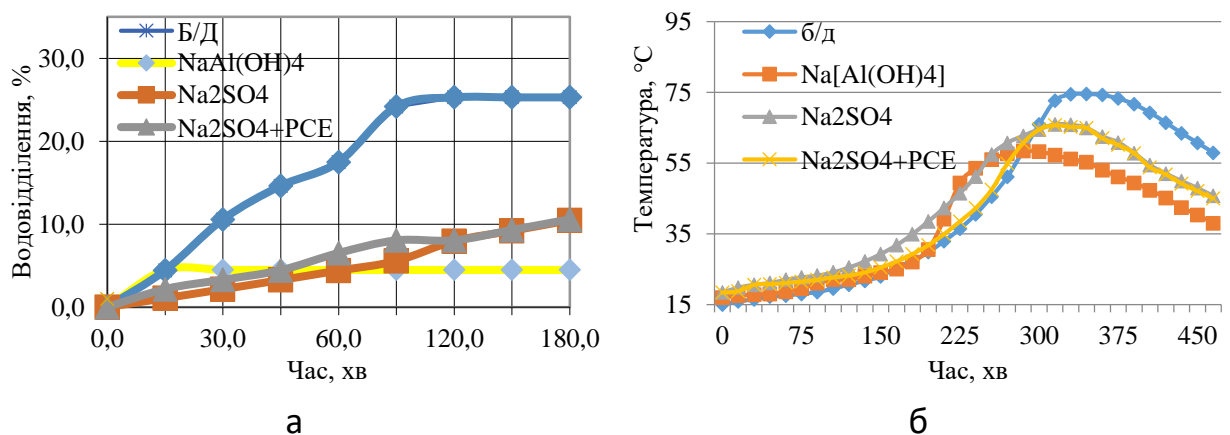


Рисунок 3.19 – Вплив лужних прискорювачів та PCE на властивості лужного портландцементу : а – водовідділення; б – зміна температури гідратації

Для виявлення процесів раннього структуроутворення проведено дослідження сумісного впливу добавок $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{PCE}$ та $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{PCE}$ на властивості лужного композиційного портландцементу. З рис. 3.20, а, видно, що при комплексному введенні $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{PCE}$ до композиційного портландцементу для забезпечення НГТ (тісто 1:0) водопотреба складає 31,0 %. При введенні

добавки $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{PCE}$ НГТ досягається при меншій водопотребі – 27%. Як видно з рис. 3.20, б, термін початку тужавіння лужного композиційного портландцементу з вмістом $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{PCE}$ складає 260 хв, а кінець – 360 хв. При введенні $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{PCE}$ спостерігається прискорення термінів початку тужавіння до 165 хв (на 36,0 %), а кінця тужавіння – до 300 хв.

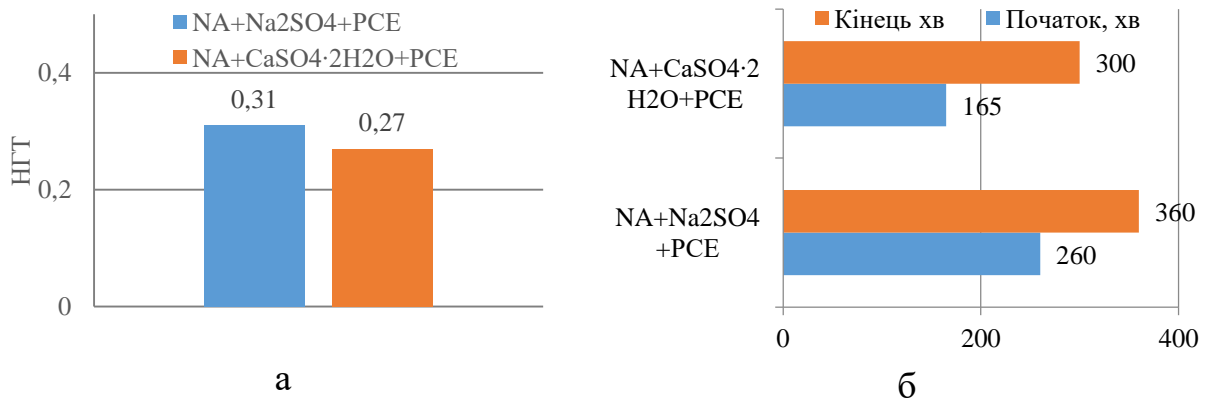


Рисунок 3.20 – Нормальна густина тіста (а) та терміни тужавіння (б) модифікованого лужного портландцементу

Дослідженнями встановлено, що комплексне введення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{PCE}$ до цементно-піщаного розчину на основі модифікованого лужного портландцементу (Ц:П=1:3) при В/Ц=0,41 дозволяє отримати РК=115 мм. При введенні добавки $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{PCE}$ розплив конуса становить 115 мм, що забезпечується при меншій водопотребі (В/Ц=0,36). Результатами експериментів показано, що при введенні $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{PCE}$ до складу СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) рання міцність через 1 добу складає 13,2 МПа, тоді як введення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{PCE}$ призводить до зниження міцності на 36,3 % і складає 8,4 МПа. При цьому через 2 доби міцність лужного композиційного портландцементу з добавками $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{PCE}$ вже перевищує попередній склад і складає 23,0 МПа, що на 13,0 % більше порівняно з сульфатом натрію (рис. 3.21, а). Через 7 та 28 діб міцність на стиск лужного композиційного портландцементу із сульфатом натрію складає 27,4 та 36,0 МПа відповідно, тоді як при заміні

Na_2SO_4 на $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ міцність збільшується на 23,0 % та 30,0 % до 35,6 МПа та 51,6 МПа. Міцність на згин в даних складах за кінетикою її набирання подібна (рис. 3.21, б).

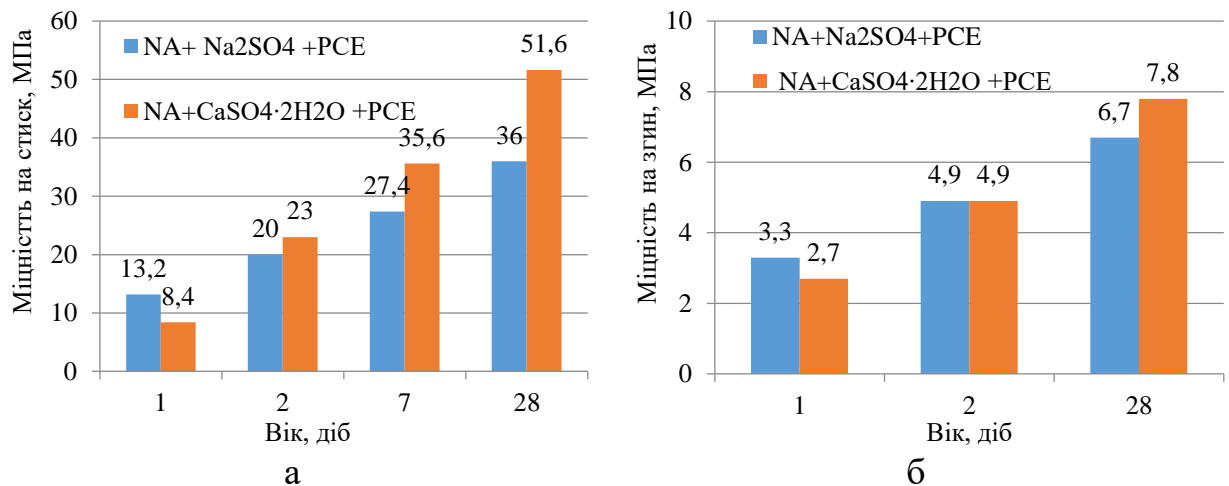


Рисунок 3.21 – Вплив Na_2SO_4 та $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ на властивості лужного портландцементу: а – міцність при стиску; б – міцність при згині

Таким чином, оптимізовані склади модифікованих лужних портландцементів характеризуються високими фізико-механічними та будівельно-технічними властивостями і являються інноваційними в'язучими для виготовлення ремонтних смішей. Для обґрунтування процесів структуроутворення необхідно провести дослідження їх фазового складу і мікроструктури.

3.3. Фазовий склад та мікроструктура каменю на основі лужного портландцементу з добавкою $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$

Незважаючи на дедалі більші обсяги застосування лужних прискорювачів тверднення [35, 102, 105, 125, 129, 132], механізм їх дії вивчений недостатньо. Науково-дослідним інститутом будівельного матеріалознавства імені Ф.А. Фінгера у Веймарі, Німеччина, проведені

дослідження механізму дії прискорювачів на гідратацію цементу [80, 132, 133]. В той же час, уточнення хімічного механізму дії лужного алюмінатного прискорювача тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ на ранніх стадіях гідратації портландцементу, а також його моделювання і опис кінетики процесу структуроутворення визначають доцільність подальшого розвитку досліджень у цьому напрямку.

Визначення показника рН в суспензії ($V/T=10$) дозволяє проаналізувати особливості хімічних процесів у ранній період тверднення в'язучих. З табл. 3.4 видно, що для портландцементу СЕМ ІІ/А-LL 42,5R через 5 хв рН суспензії складає 12,45; в часі рН зростає і через 1 добу досягає 12,70. При введенні 2,0 мас. % золи-винесення в суспензію на основі СЕМ ІІ/А-LL 42,5R через 5 хв рН зростає до 12,84, а через 1 добу рН збільшується до 13,02. Для портландцементу СЕМ ІІ/А-LL 42,5R з додаванням 2,0 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ рН складає 12,97, через 1 добу рН не змінюється і становить 12,97. При введенні в портландцемент $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ золи-винесення рН становить 12,63, а через 1 добу рН збільшується до 12,82. Введення ЗВ та РСЕ в портландцемент знижує рН до 12,30, через 1 добу рН зростає до 12,79. Для суспензії із використанням $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ +ЗВ+РСЕ значення рН зростає від 12,90 (через 5 хв) до 13,05 (через 1 добу).

Таблиця 3.4

Вплив добавок на рН систем на основі СЕМ ІІ/ А-LL 42,5R

Система	Значення, рН		
	5 хв	30 хв	1 доба
СЕМ ІІ/А-LL	12,45	12,64	12,70
СЕМ ІІ/А-LL+ЗВ	12,84	12,99	13,02
СЕМ ІІ/А-LL+ $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$	12,97	12,99	12,97
СЕМ ІІ/А-LL+ ЗВ+ $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$	12,63	12,7	12,82
СЕМ ІІ/А-LL+ЗВ+РСЕ	12,30	12,60	12,79
СЕМ ІІ/А-LL+ $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ +ЗВ+РСЕ	12,90	12,97	13,05

Дослідженнями процесів структуроутворення встановлено, що для композиційного портландцементу СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R при НГТ = 29,5 %, початок тужавіння складає 230 хв. Дослідженнями впливу $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ на процеси структуроутворення показано, що під час введення 1,0–2,0 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ початок тужавіння прискорюється на 50-60 хв, при цьому спостерігається зростання водопотреби цементного тіста до 31,6 % для досягнення нормальної густоти (табл. 3.8). Встановлено, що введення лужного прискорювача тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ в кількості 1,0-2,0 мас. % призводить до збільшення водопотреби в'язучого, в той же час терміни початку тужавіння прискорюються відповідно до 180-160 хв. Слід відзначити, що при цьому процеси особливо раннього структуроутворення інтенсифікуються, що підтверджується збільшенням міцності через 14 год. Так, введення 1,0-2,0 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ дозволяє збільшити особливо ранню міцність у 2-3 рази. В той же час, як видно з табл. 3.5, спостерігається зниження міцності у всі подальші терміни тверднення.

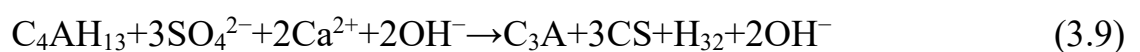
Таблиця 3.5

Вплив лужного прискорювача $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ на властивості портландцементу композиційного СЕМ ІІ/В-М(Р-С-Л) 32,5 R (тісто 1:0)

Кількість добавки $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$, мас. %	НГТ	Терміни тужавіння, хв		Міцність на стиск, МПа, у віці, діб				
		початок	кінець	14 год	1	3	7	28
-	0,29	230	350	3,2	15,0	32,5	41,6	52,3
1,0	0,30	180	320	6,4	15,5	31,5	40,4	51,2
1,5	0,31	170	280	8,9	14,3	27,5	38,2	46,3
2,0	0,32	160	280	10,0	9,5	20,0	25,6	32,2

Тужавіння цементного тіста регулюється типом і кількістю нових з'єднань та швидкістю їх утворення. Зв'язування води також відіграє певну роль, оскільки утворення продуктів гідратації поглинає частину води при замішуванні. Короткі призматичні кристали еtringіту утворюються на

початковій стадії в цементному тісті без прискорювача під час нормального тужавіння. Вони формуються на поверхні частинок цементу, але занадто малі, щоб зв'язати цементні зерна між собою. Плівкоподібні фази С-А-Н утворюються в системі «цемент-прискорювач $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ » відразу після змішування з водою. Фази С-А-Н мають більшу площу поверхні, ніж первинний еtringіт і займають не тільки поверхні частинок цементу, але також і проміжки простору. Осадження фаз С-А-Н перешкоджає переміщенню частинок цементу у воді при замішуванні, тому проходить швидке структуроутворення в цементному тісті з добавкою лужного прискорювача $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$. Ця утворена мікроструктура також сприяє швидкому зростанню ранньої міцності цементного каменю з прискорювачем [133]. Так, згідно Qi Xu, J. Stark [132], два основних активних компоненти, а саме: NaOH і $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ мають різний вплив на сульфатний компонент: NaOH збільшує розчинність CaSO_4 і знижує розчинність $\text{Ca}(\text{OH})_2$, в той час як $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ має уповільнену реакцію з CaSO_4 з утворенням еtringіту. Однак, реакційні перетворення залежать більшою мірою від кількості добавки прискорювача. Вміст лугу в розчині збільшується у міру збільшення добавки прискорювача. Через рівновагу розчину концентрація $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в розчині падає при збільшенні концентрації Na^+ з одночасною реакцією з $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ з утворенням фаз С-А-Н, які осідають на непрогідратованих зернах цементу. Встановлено, що при збільшенні концентрації OH^- в розчині зростає швидкість розчинення CaSO_4 . Концентрація SO_4^{2-} швидко знижується через реакцію з фазами С-А-Н з утворенням еtringіту, який почав синтезуватися приблизно через 30 хв. Послідовності перетворень показані схематично рівняннями реакцій [132]:



Типи гідратних фаз визначалися за допомогою рентгенівської дифрактометрії та мікроскопічного аналізу. Методом електронної мікроскопії через 24 год гідратації були виявлені тонкі пластиноподібні кристали портландиту в системі «цемент-прискорювач». Також фіксуються дрібні кристали еtringіту (рис. 3.22).

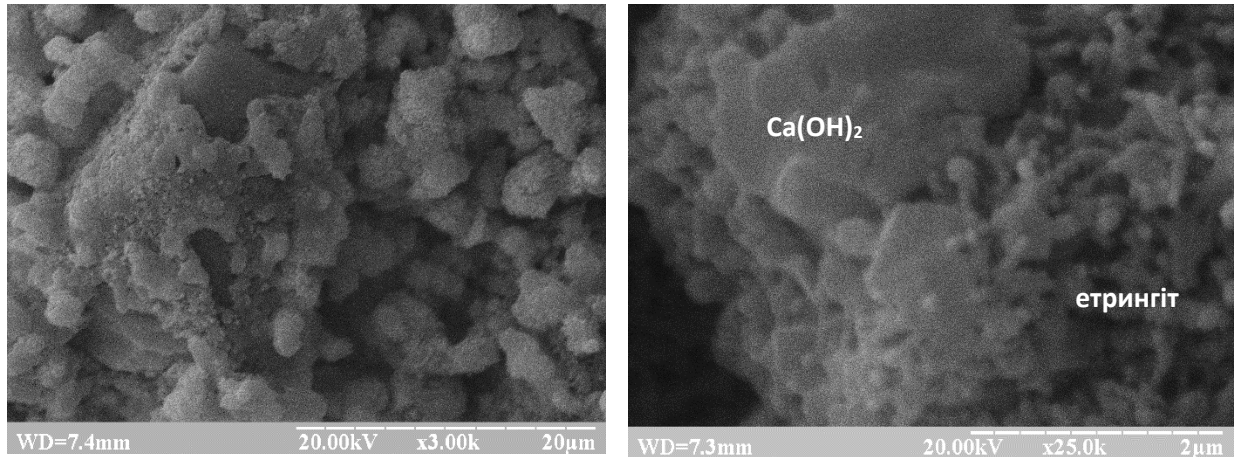


Рисунок 3.22 – Мікрофотографії лужного портландцементу з прискорювачем $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ через 24 год гідратації

Згідно даних рентгенофазового аналізу (рис. 3.23) показано, що фіксується лінія портландиту малої інтенсивності, також наявні лінії еtringіту. У зразку з наявністю прискорювача гіпс практично не виявляється. Це означає, що сульфатний компонент цементу в системі «цемент-прискорювач» поглинається більш швидко, ніж в цементній системі без прискорювача.

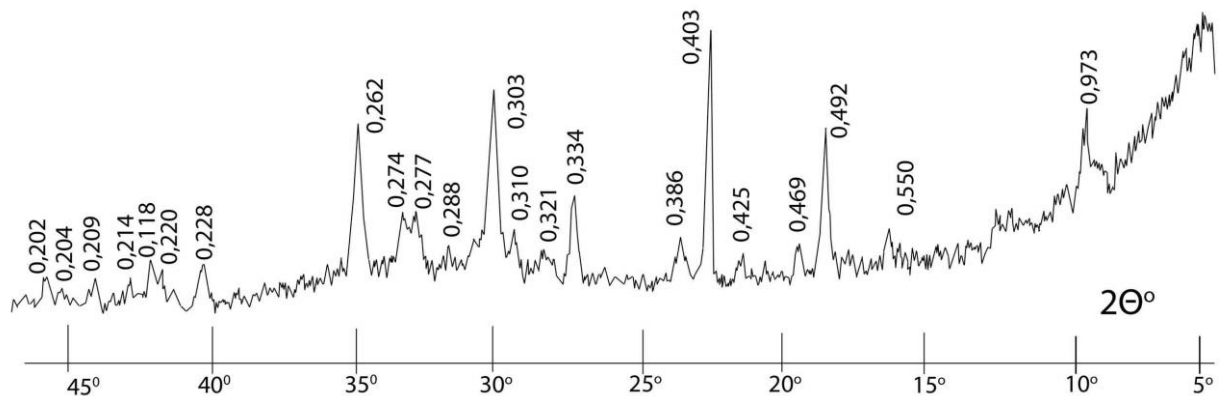


Рисунок 3.23 – Дифрактограма лужного портландцементу з прискорювачами $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та Na_2SO_4 через 28 діб гідратації

Згідно досліджень Qi Xu, J. Stark [132], з добавкою 5 мас.% лужного прискорювача в розчин вводиться приблизно 550 ммол/л іонів Na^+ , що майже в 11 раз перевищує концентрацію Na^+ в зразку без добавки. Прискорювач збільшує концентрацію $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ в розчині цементного тіста. Це означає, що значна частина алюмінію, що надходить з прискорювача, повинна бути поглинена в самий ранній період гідратації. Це також відповідає зменшенню вмісту портландиту. Збільшення надходження лугів з добавкою прискорювача призводить до збільшення показника рН розчину цементного тіста. Внаслідок реакції з $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ викликається різке зменшення концентрації Ca^{2+} в розчині. Добавка прискорювача має значний вплив також і на концентрацію SO_4^{2-} у ранні терміни тверднення. При цьому подальше зниження концентрації SO_4^{2-} може бути пояснено утворенням еtringіту вже через 1 год гідратації - реакції сульфату з фазами С-А-Н, що утворилися на початковому етапі. Це підтверджується мікрофотографіями (рис. 3.24, а, б), отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопа.

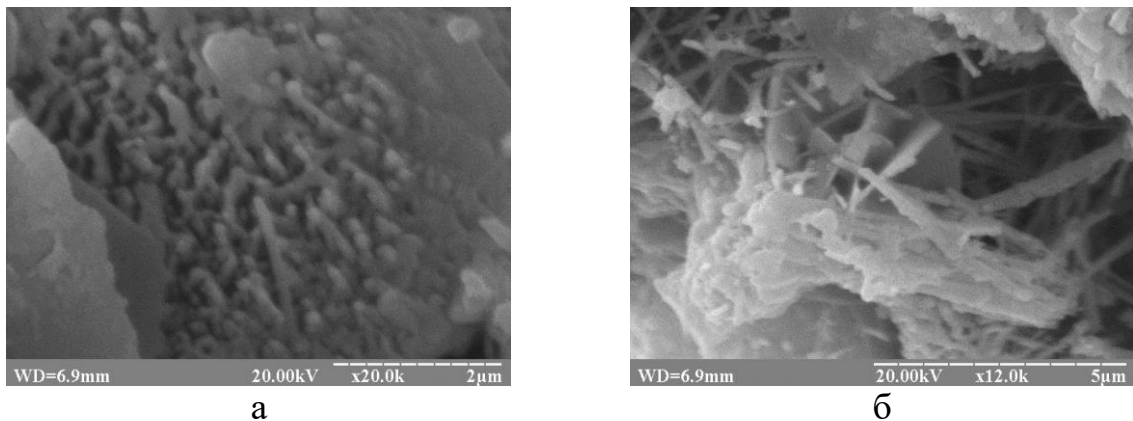


Рисунок 3.24 – Мікрофотографії лужного портландцементу з прискорювачами Na_2SO_4 (а) та $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ (б) через 1 добу тверднення

Кристали еtringіту в системі «цемент-прискорювач», на відміну від цементної системи без прискорювача утворюються не короткопризматичні (приблизно 500 нм), а волокнисті ($D < 150$ нм). Така морфологія еtringіту пояснюється підвищеною кількістю алюмінату при введенні добавки прискорювача. Кількість Al_2O_3 , доступного для реакції в цей період,

приблизно в три рази більша в системі «цемент-прискорювач» в порівнянні з контрольною системою. Співвідношення $Al_2O_3/CaSO_4$ сприяє росту кристалів еtringіту в напрямку (001) поверхні, що дає збільшення тонких, волокнистих кристалів еtringіту в системі «цемент-прискорювач». При цьому не фіксуються такі гідратні фази, як сингеніт та двоводний гіпс.

Таким чином, введення лужного активатора $Na[Al(OH)_4]$ збільшує концентрацію Na^+ в рідкій фазі портландцементного тіста. В результаті показник рН розчину при 5 мас.% $Na[Al(OH)_4]$ збільшується приблизно з 13,0 до 13,8. Збільшення рН і реакції алюмінату викликають зниження концентрації Ca^{2+} . У зв'язку з інтенсивним утворенням еtringіту концентрація SO_4^{2-} нижча в системі «цемент-прискорювач», ніж в цементній системі без добавок. Тому процеси раннього структуроутворення системи «цемент-прискорювач» значно відрізняються від процесів у цементній системі без добавок, так як плівкоподібні фази С-А-Н є основними продуктами гідратації на початковій стадії замість еtringіту. Метастабільні фази С-А-Н починають перетворюватися в еtringіт після гідратації протягом близько 30 хвилин. В пізніший період гідратації фази С-А-Н повністю замінюються еtringітом або моноссульфатом.

Методом термічного аналізу досліджено фазовий склад лужноактивованого цементного каменю з добавками $Na[Al(OH)_4]$ та Na_2SO_4 . З рис. 3.25, видно, що на дериватограмі фіксуються ендотермічні ефекти при температурі $105,6\text{ }^{\circ}C$ (внаслідок виділення фізично-зв'язаної води з гідросилікатів), $435,8\text{ }^{\circ}C$ (розкладання портландиту) та $630,8\text{ }^{\circ}C$ (проявляються гідрокарбоалюмінати); кількість $Ca(OH)_2$ складає 8,2%. В ранній період гідратації в цементуючій системі з добавкою прискорювача утворюється пластинчастий гексагональний моноссульфат. В той же час, фази С-S-Н і портландит утворюються тільки після початку періоду прискорення процесу гідратації.

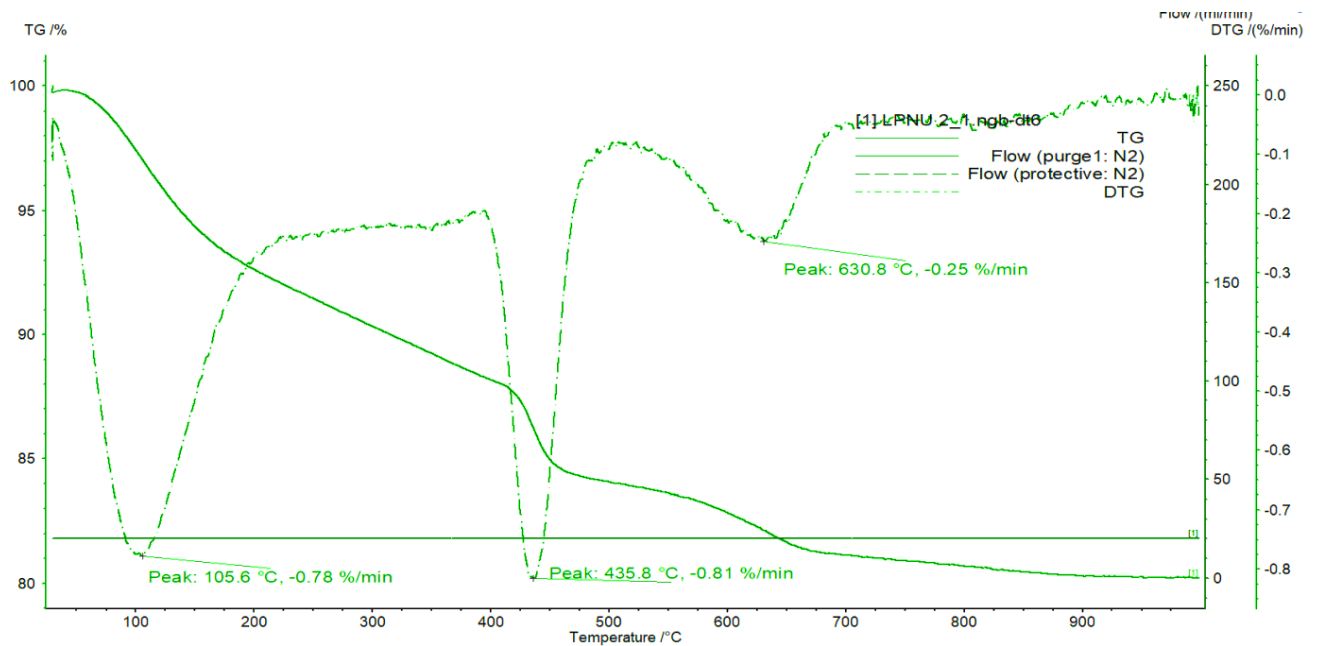


Рисунок 3.25 - Дереватограма лужноактивованого цементного каменю

Підвищений вміст фаз С-С-Н можна очікувати в мікроструктурі системи «цемент-прискорювач» через тенденцію до незначного збільшення ступеня гідратації C_3S . Однак, при цьому осідає менше портландиту ($M_{Ca(OH)}=8,2\%$), порівняно з гідратацією цементуючої системи без добавок. Внаслідок реакції прискорювача $Na[Al(OH)_4]$ поглинається $Ca(OH)_2$ з утворенням фаз С-А-Н. При цьому плівкові фази С-А-Н, які відразу утворюються у великих кількостях, викликають швидке тужавіння і швидке зростання міцності в ранні терміни системи «цемент-прискорювач». Підвищене лужне середовище за рахунок реакції в системі з прискорювачем $Na[Al(OH)_4]$ та утворення $NaOH$ дозволяє збільшити розчинність сульфатного компонента і призводить до збільшення концентрації SO_4^{2-} в розчині та швидкому осадженню $Ca(OH)_2$. На першій стадії $Al(OH)_4^-$ взаємодіє з $Ca(OH)_2$ з утворенням фаз С-А-Н. Утворення еtringіту сповільнюється на цій ранній стадії. Присутність прискорювача в системі забезпечує формування пластинчастого моносульфату.

Таким чином, в цементуючій системі за рахунок реакції з прискорювачем $Na[Al(OH)_4]$ проходить інтенсивне утворення фаз С-А-Н, що призводить до підвищення водопотреби цементу. Тому в дослідженнях виникає необхідність

застосування як високоефективного суперпластифікатора полікарбоксилатного типу РСЕ, так і лужного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$.

3.4. Принципи створення нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ як високоефективного прискорювача тверднення портландцементних систем

Сучасним напрямком будівельного матеріалознавства для підвищення експлуатаційних характеристик будівельних композитів є застосування принципів наномодифікування. Для одержання безусадочних ремонтних сумішей з підвищеними експлуатаційними властивостями, зокрема водонепроникністю, адгезійною міцністю, морозостійкістю та ін. в роботі проведено розроблення лужного алюмінійвмісного нанокompозиту з використанням методу «золь-гель» технології [35, 99]. Для синтезу нанокompозиту використано лужний алюмінійвмісний активатор $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та нітрат кальцію $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Методом золь-гель технології внаслідок реакції у рідкій фазі $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ та $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ синтезовано алюмінатний нанокompозит гідронітроалюмінат кальцію $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (С-А-Н-Н), що відноситься до класу подвійних кальцієво-алюмінатних гідроксидів типу (Ca_2Al LDH) шаруватої будови, які можуть бути підкладкою для молекул етерів полікарбоксилатів і сприяють утворенню нанокompозитів на основі органічних добавок і матеріалів шаруватої структури С-А-Н-Н – РСЕ.

З використанням методів фізико-хімічного аналізу досліджено зразки синтезованих нанокompозитів: С-А-Н-Н (зразок 1) та С-А-Н-Н – РСЕ (зразок 2). Для дослідження методом ІЧ спектроскопії в діапазоні $3800\text{-}300\text{ см}^{-1}$ зразки у вигляді колоїдного гелю були нанесені на пластини з CaF_2 та KRS-5 (йодид-бром у талію) у вигляді сухої плівки. Для компенсації поглинання цих матеріалів такі ж пластини ставилися в канали порівняння приладу «Спекорд М-30». Як видно з рис. 3.26, досліджувані зразки (1 і 2) мають смуги

поглинання в ІЧ спектрі, характерні для наступного фрагменту – нітрат кальцію $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - 3472(3464), 1635, 1447, 1390, 1360, 1050, 872 та 832 cm^{-1} . Слабке поглинання при 1780 cm^{-1} свідчить про незначну кількість вільних іонів NO_3 . Інтенсивне поглинання при 2940-2800 cm^{-1} , 1460 (1480–1420) cm^{-1} , середнє та слабке поглинання відноситься до карбонатної фази. При цьому видно, що поглинання інтенсивніше у зразку (2) з добавкою РСЕ. Окрім цього у зразку (2) спостерігається значне розширення спектру поглинання в області 1600–1200 cm^{-1} , де звичайно спостерігаються різні іони, зокрема карбонати, карбоксилати - CO_2^- 1560–1630 cm^{-1} та COO^- 1350–1420 cm^{-1} , некоординовані карбонатні групи при 1450–1420 cm^{-1} . Нижче (до 1020 cm^{-1}) поглинають монодент та ідентичні карбонати.

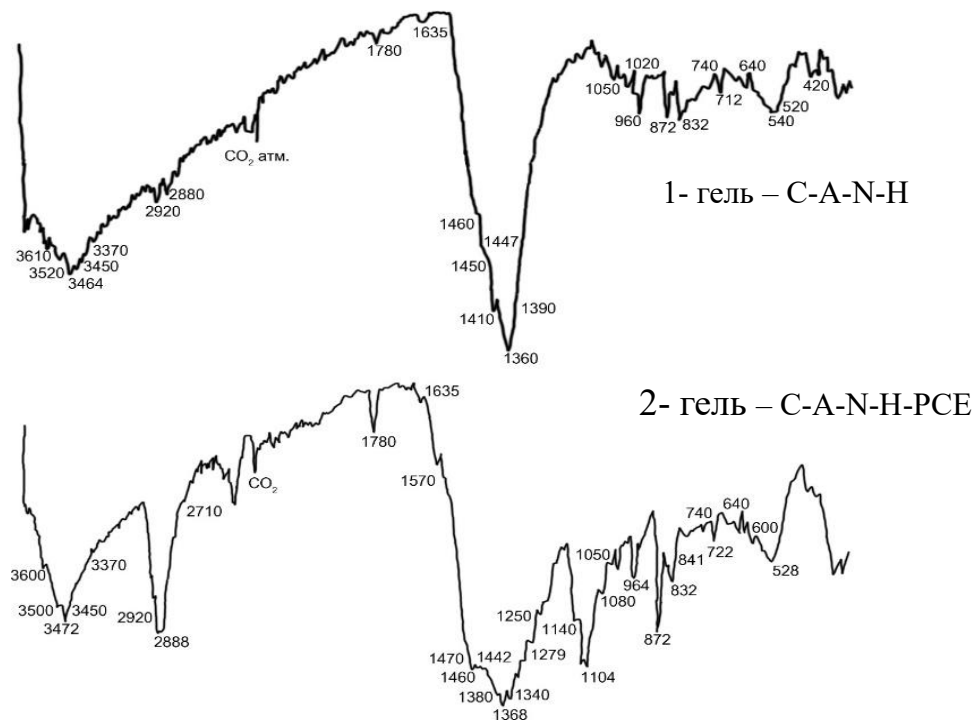
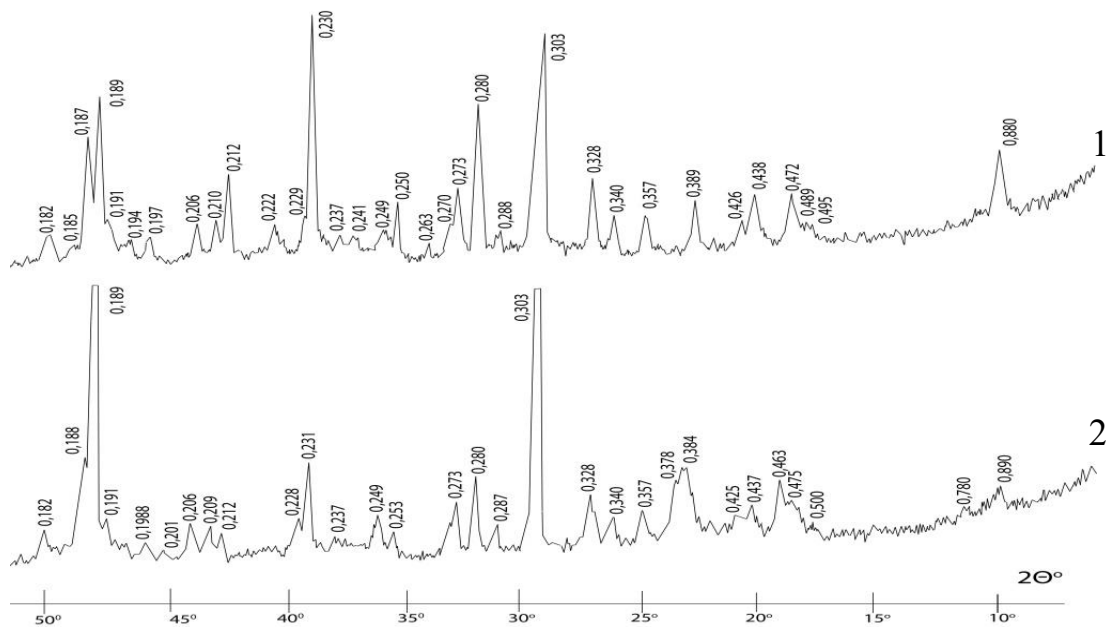


Рисунок 3.26 – ІЧ спектри синтезованого лужного алюмінатного нанокompозиту

У зразку (2) інтенсивні смуги 2880, 1460, 872 cm^{-1} вказують на значне перевищення вмісту карбонатного фрагменту над кальцієвим (селітра). Пластифікатор на основі полікарбоксилату (РСЕ) характеризується такими смугами в ІЧ спектрі: 1570, 1460, 1340, 1279, 1240, 1140, 1104, 1060, 964, 841

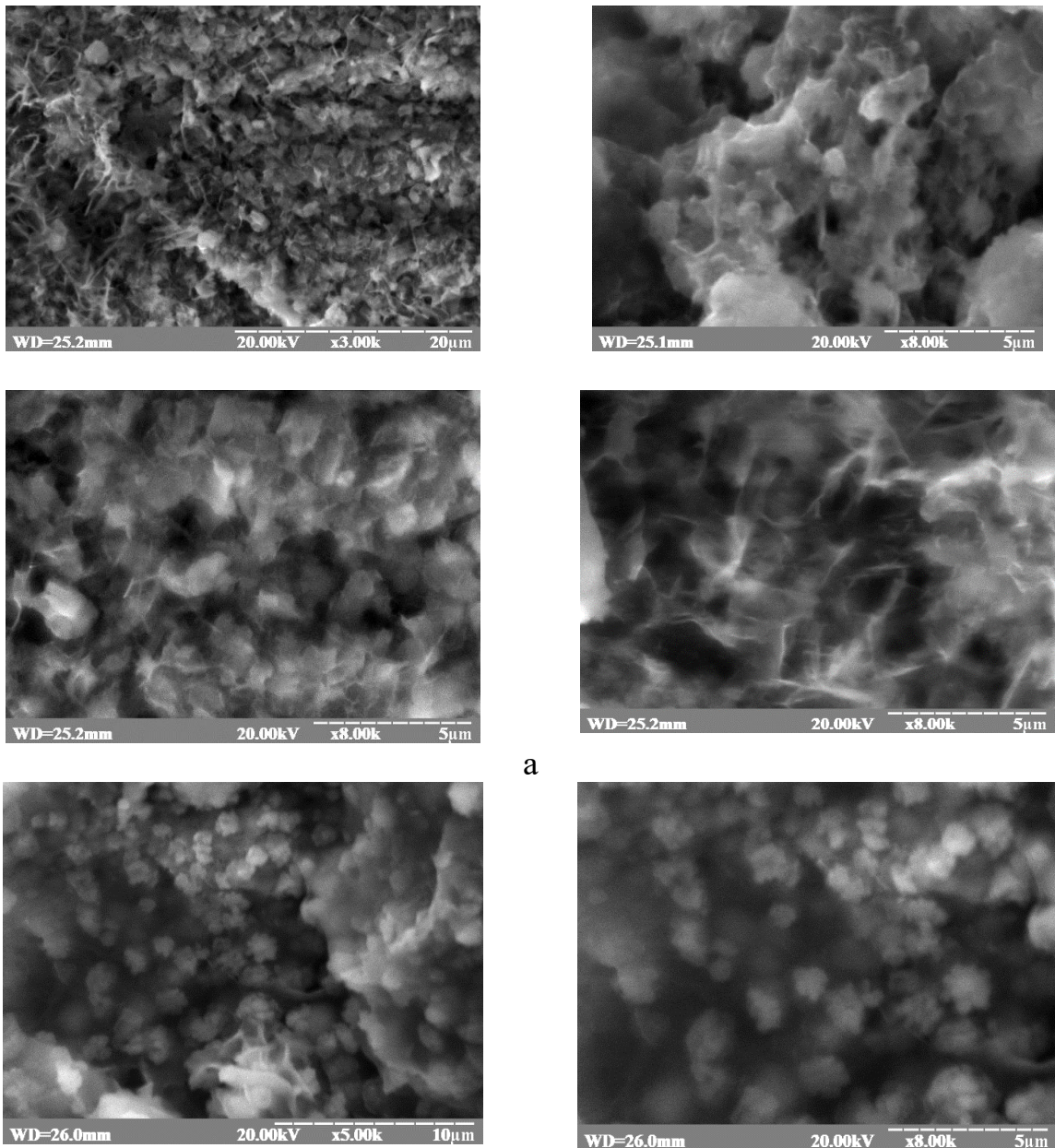
см⁻¹. Смуга – 1570 см⁻¹ може вказувати на поглинання C_–O_{Na}⁻. Також в області 1530–1450 см⁻¹ може проявлятися поглинання Ca(OH)₂. Про наявність гідроксиду кальцію також свідчать смуги 842, 1475, 1420 см⁻¹ (коливання пов’язані з валентними та деформаційними коливаннями груп CO₃²⁻, HCO₃⁻ - 3640–3400 см⁻¹ валентне OH⁻ гідроксиду кальцію, гідроксид алюмінію має смуги 3600, 3520, 3464(3472), 3370 см⁻¹ – валентні коливання 1020 та 965 см⁻¹ деформаційні коливання. Інші коливання в діапазоні 3600 – 330 см⁻¹ та 1670 см⁻¹ належать OH-групам молекулярної води (валентні та деформаційні коливання відповідно). У синтезованих зразках фіксуються гідроалюмінати кальцію, на що вказує наявність смуги 520 см⁻¹ при валентному коливанні ν_{Al-O} . Згідно даних рентгенофазового аналізу встановлено, що на дифрактограмах (рис. 3.27) фіксуються лінії гідрокарбоалюмінату кальцію (d/n=280 нм), гексагонального гідронітроалюмінату кальцію [Ca₂Al(OH)₆]₂(NO₃)₂·6H₂O (d/n=0,89 нм) та незначні лінії гідроксиду кальцію (d/n=0,493; 0,260 нм).



1 – C-A-H, 2 – C-A-N-H-PCE

Рисунок 3.27 – Дифрактограма синтезованого лужного алюмінатного нанокompозиту

Мікроструктура синтезованого алюмінатного нанокompозиту характеризується значною кількістю центрів кристалізації – пластиноподібних новоутворень (рис. 3.28, а). При використанні етерів полікарбоксилатів при синтезі нанокompозиту С-А-Н-РСЕ проходить наномодифікування кристалів з утворенням затравок розміром 50-80 нм, які сприяють підвищенню як ранньої так і стандартної міцностей цементуючої матриці ремонтних сумішей (рис. 3. 28, б).



а

б

Рисунок 3.28 – Мікрофотографії синтезованого алюмінатного нанокompозиту: а – С-А-Н; б – С-А-Н-РСЕ

Для встановлення процесів структуроутворення наномодифікованих лужних портландцементів проведено дослідження впливу нанокompозитів на міцність та мікроструктуру цементного каменю на основі портландцементів СЕМ ІІ/А-Р 42,5 R та СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R. Встановлено, що для цементного каменю на основі СЕМ ІІ/А-Р 42,5 R з добавкою нанокompозиту 3,0 мас. % С-А-Н-Н терміни початку та кінця тужавіння становлять 155 та 200 хв при НГТ=0,35 (тісто 1:0), при цьому міцність через 1, 2 та 28 діб складає 5,0; 21,2 та 37,5 МПа (табл. 3.6). При введенні 4,0 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ НГТ тіста знизилася до 0,31, при цьому міцність через 1 добу зростає в 2,7 рази до 13,7 МПа, а через 28 діб в 1,9 рази до 71,2 МПа. При введенні 4,5 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ НГТ знизилася до 0,28, а терміни початку та кінця тужавіння скоротилися до 55 та 125 хв. При цьому міцність зростає у всі терміни тверднення порівняно з наномодифікованим каменем без РСЕ. Так, через 1 добу міцність складає 31,2 МПа, а через 28 діб міцність становить 87,5 МПа, що в 2,3 рази вище порівняно сумішшю без РСЕ. Введення 5,0 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ в тісто призвело також до зниження міцності у всі терміни тверднення порівняно з наномодифікованим каменем з вмістом 4,5 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ.

Таблиця 3.6

Вплив лужного нанокompозиту на терміни тужавіння та міцність цементного каменю на основі портландцементу СЕМ ІІ/А-Р 42,5 R (Тісто 1:0)

Добавка (мас.%)	НГТ	Терміни тужавіння, хв		Міцність на стиск, МПа			
		Поч.	Кін.	1	2	7	28
С-А-Н-Н (3,0)	0,35	155	200	5,0	21,2	25,6	37,5
С-А-Н-Н-РСЕ (4,0)	0,31	115	145	13,7	46,2	62,5	71,2
С-А-Н-Н-РСЕ (4,5)	0,28	55	125	31,2	34,4	47,5	87,5
С-А-Н-Н-РСЕ (5,0)	0,27	40	120	25,0	28,1	33,9	42,0

Експериментальними дослідженнями встановлено, що для цементного каменю на основі портландцементу СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R (тісто 1:0, НГТ=0,35) рання міцність через 12 год становить 4,3 МПа, через 1, 2 та 28 діб складає 11,2; 30,0 та 62,5 МПа (рис. 3.29, а). Введення композиту С-А-Н-Н дозволяє збільшити ранню міцність на 14,0 % до 5 МПа, а через 1 добу на 44,0 % до 20 МПа. Через 28 діб міцність досягла 68,2 МПа, що на 8,0 % більше порівняно із портландцементом без добавок. Введення алюмінійвмісного нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ та 5,0 мас. % золи виносення дозволило зменшити водо-в`яжуче відношення В/В до 0,25. При цьому спостерігається значне збільшення ранньої міцності, через 12 год – в 4,3 рази (18,7 МПа), через 1 добу – в 3,8 рази (42,5 МПа) та міцності через 28 діб – в 1,6 рази до 101,5 МПа (рис. 3.29, б). Це свідчить про значну інтенсифікацію процесів структуроутворення наномодифікованого цементного каменю на основі портландцементу з вапняком СЕМ ІІ/А-LL, золи-виносення та нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ у всі терміни тверднення, зокрема на самому ранньому етапі (через 12 год).

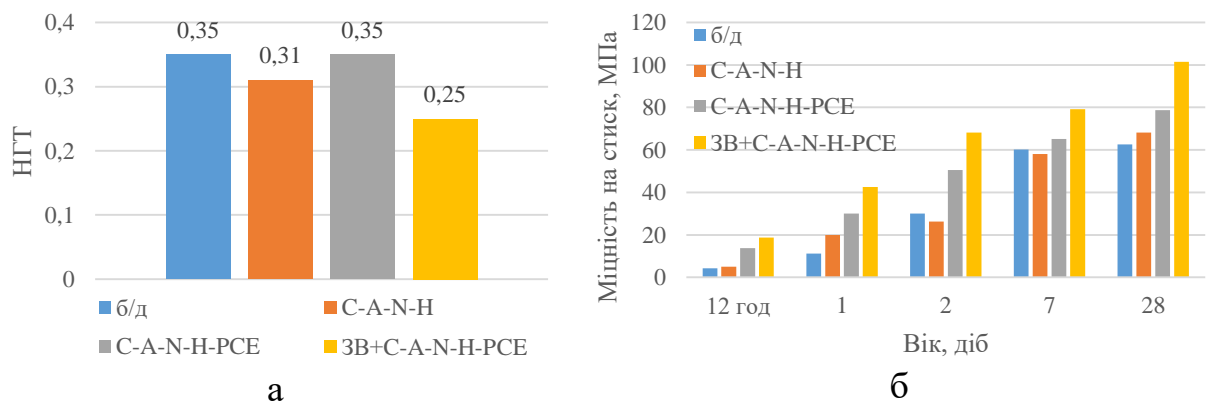
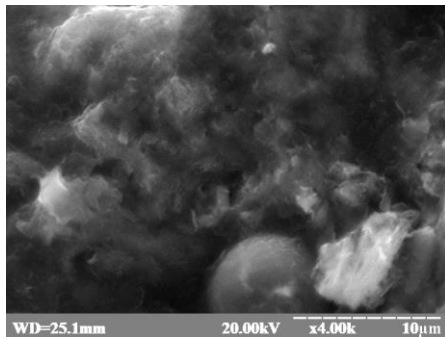


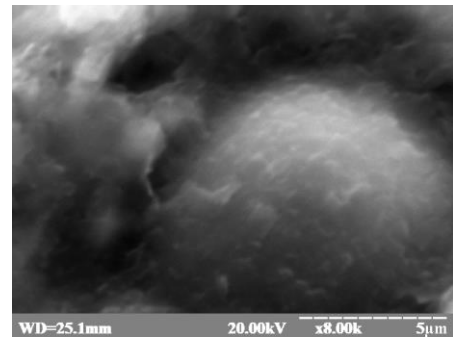
Рисунок 3.29 – Нормальна густина тіста (а) та міцність (б)

наномодифікованого цементного каменю на основі на основі СЕМ ІІ/А-LL

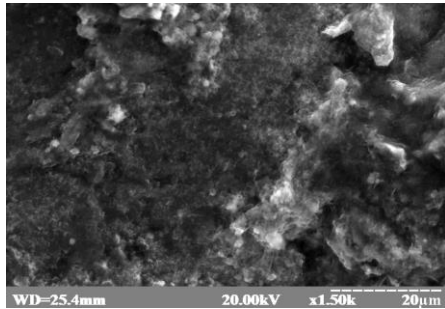
Методом електронної мікроскопії показано, що для цементного каменю на основі наномодифікованого лужного портландцементу з вапняком (тісто 1:0, В/В=0,25) через 1 добу тверднення спостерігається утворення кристалів портландиту, а також фіксуються дрібнодисперсні кристали еtringіту (рис. 3.30).



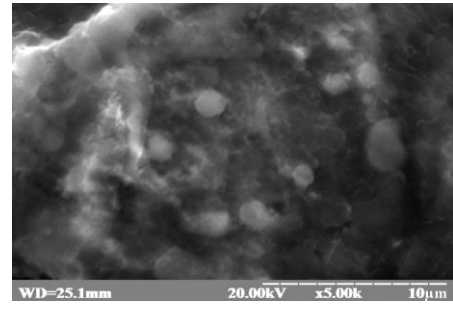
а



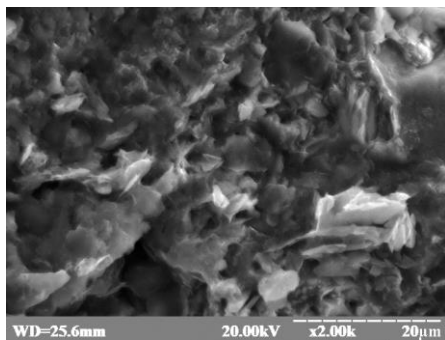
б



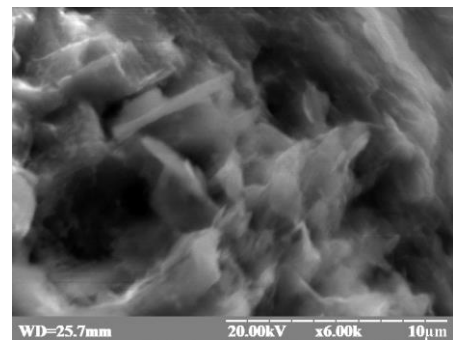
в



г



д



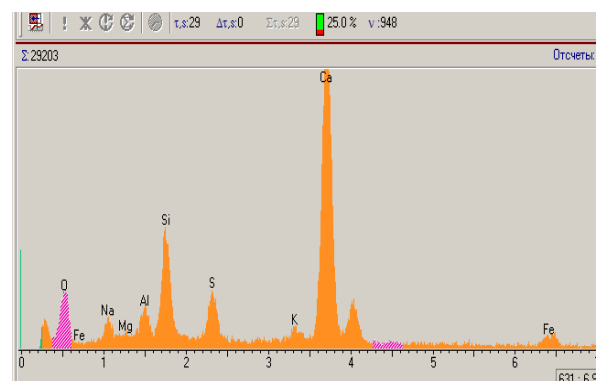
е

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма формульных коэффициентов: 100
Сумма %: 85.97

Элемент	Инт.	C %	Атом. %	Кэфф.
O	0	0.00	50.042	58.211
Na ₂ O	K 4452	0.00	0.000	0.000
Na ₂ O	K 2365	3.57	2.759	3.209
MgO	K 998	1.26	0.750	0.872
Al ₂ O ₃	K 3708	4.47	2.103	2.446
SiO ₂	K 13392	16.60	6.626	7.707
SO ₃	K 5504	13.51	4.048	4.709
K ₂ O	K 1205	1.08	0.552	0.642
CaO	K 38791	41.67	17.821	20.730
CaO	L -263	0.00	0.000	0.000
FeO	K 1710	3.80	1.267	1.474
FeO	L -495	0.00	0.000	0.000

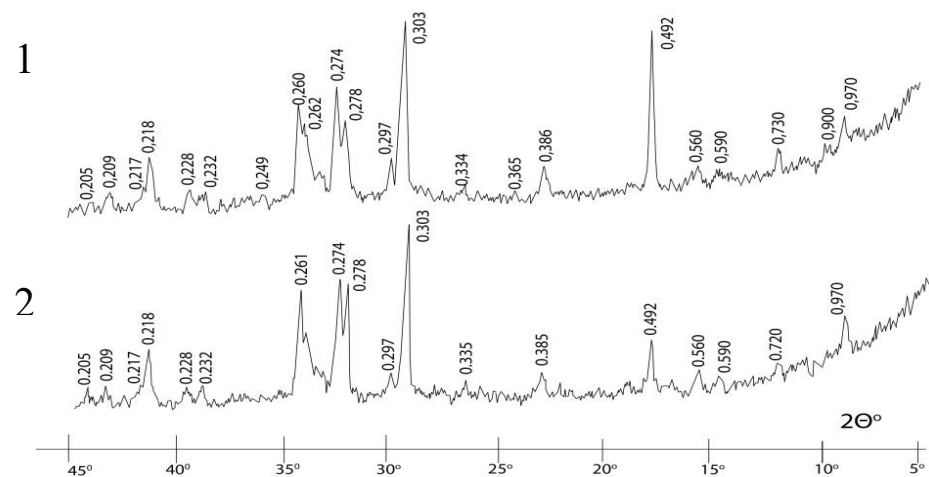
ж



з

Рисунок 3.30 – Мікрофотографії (а - е), елементний склад (ж) та спектри рентгенівського характеристичного випромінювання (з) наномодифікованого цементного каменю через 1 добу гідратації

Мікроструктура наномодифікованого цементного каменю є більш щільною, а також кольматується дрібнодисперсними (0,2-1,8 мкм) кристалами еtringіту. Методом рентгенофазового аналізу встановлено особливості гідратації наномодифікованого лужного портландцементу з вапняком через 1 добу тверднення. На рис. 3.31 показано, що для лужного портландцементу фіксуються лінії кальцію гідроксиду ($d/n=0,263; 0,492$ нм) та кристалічних гідратних фаз еtringіту ($d/n=0,973; 0,560$ нм). При введенні нанокompозиту С-А-Н-РСЕ та золи-винесення спостерігається зменшення лінії портландиту в 2,7 рази, що свідчить про інтенсивне проходження пуцоланової реакції у наномодифікованому цементному камені.

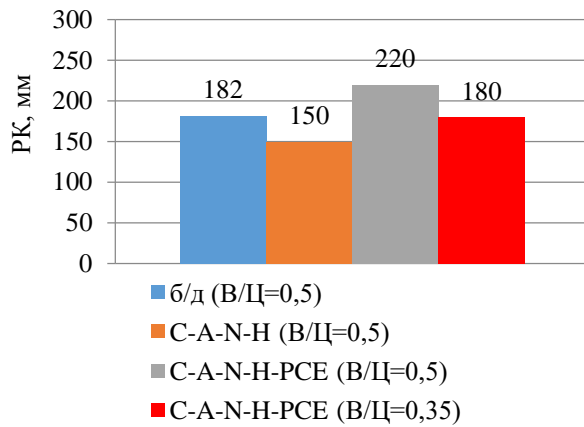


1 – СЕМ II/A-LL;

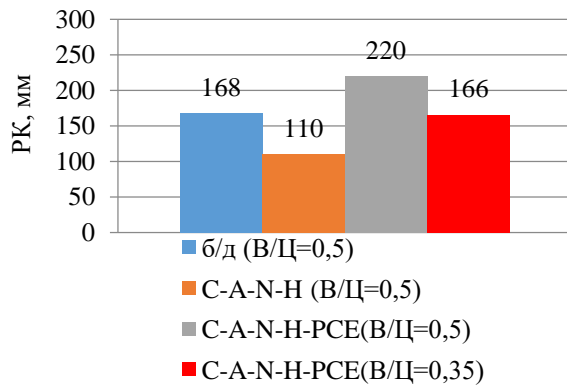
2 – СЕМ II/A-LL + С-А-Н-Н-РСЕ

Рисунок 3.31 – Дифрактограма цементного каменю на основі лужного портландцементу

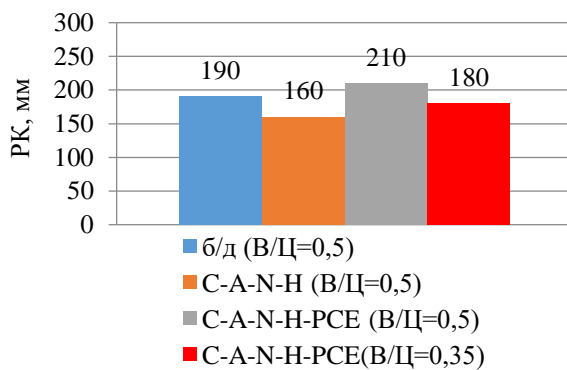
Досліджено вплив нанокompозиту типів С-А-Н-Н та С-А-Н-Н-РСЕ на фізико-механічні властивості портландцементів СЕМ I 42,5 R, СЕМ II/A-P 42,5 R, СЕМ II/A-LL 42,5 R за стандартними методами згідно з EN 196-1. Встановлено, що рухливість (РК) цементно-піщаного розчину на основі СЕМ I 42,5 R (Ц:П = 1:3) при В/Ц = 0,5 становить 182 мм (рис. 3.32, а).



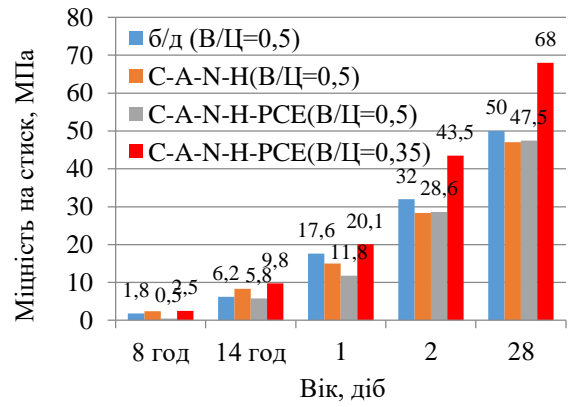
а



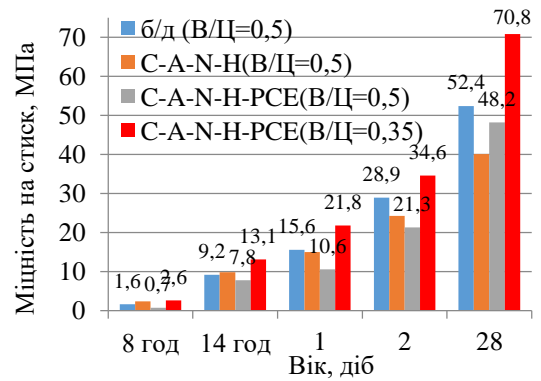
в



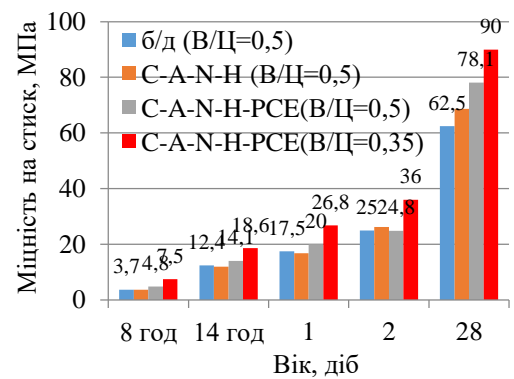
д



б



г



е

Рисунок 3.32 – Рухливість (а, в, д) та міцність при стиску (б, г, д) наномодифікованих лужних портландцементів на основі: а, б - СЕМ І 42,5 R, в, г - СЕМ ІІ/А-Р 42,5 R, д, е - СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R

При введенні С-А-Н-Н розплив конуса зменшується до 150 мм. Використання нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ дозволяє збільшити РК до 220 мм при $B/C = 0,5$, а за рахунок водоредуруючого ефекту РК зменшується до 0,35. Як видно з рис. 3.32, б, при цьому міцність на стиск у всі терміни різко зростає

і через 8 год складає 2,5 МПа, через 14 год - 9,8 МПа, через 1 та 2 доби становить 20,1 та 43,5 МПа, через 28 діб – 68,0 МПа. Як видно з рис. 3.32, б, така ж тенденція спостерігається для портландцементу з пуцоланою СЕМ II/A-P 42,5 R, при цьому приріст міцності є менший на 4,0 % (рис. 3.28, г). В той же час, найвищими показниками як ранньої так і стандартної міцностей характеризується наномодифікований лужний портландцемент з вапняком. Встановлено, що для СЕМ II/A-LL 42,5 R при В/Ц = 0,5 РК становить 190 мм (рис. 3.32, д). При введенні С-А-Н-Н розплив цементно-піщаного розчину зменшується до 160 мм. Використання нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ при В/Ц = 0,5 призводить до збільшення РК до 210 мм. За рахунок водоредуруючого ефекту В/Ц зменшилось до 0,35, а рухливість досягнула 180 мм. Міцність на стиск для СЕМ II/A-LL 42,5 R через 8 год складає 3,7 МПа, а при введенні С-А-Н-Н-РСЕ збільшилась в 2 рази і досягнула 7,5 МПа. Через 14 год міцність на стиск для складу із С-А-Н-Н-РСЕ складає 18,6 МПа, через 1 та 2 доби - 26,8 та 36,0 МПа відповідно. Стандартна міцність через 28 діб досягає 90,0 МПа. Таким чином, найвищою міцністю у всі терміни тверднення характеризується склад наномодифікованого лужного портландцементу з вапняком. Тому в подальших дослідженнях для розроблення швидкотверднучих ремонтних безусадочних сумішей з покращеними експлуатаційними властивостями застосовують лужні портландцементи з високою ранньою міцністю.

Висновки по розділу

1. Досліджено вплив прискорювачів тверднення на властивості портландцементів різних типів: СЕМ I 42,5 R, СЕМ II/A-LL 42,5 R, СЕМ II/B-M(P-S-L) 32,5 R. Встановлено, що вплив лужного алюмінійвмісного активатора тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ суттєво скорочує терміни тужавіння (до 3,5-4,0 рази). Показано, що найбільший приріст ранньої міцності забезпечує введення лужного алюмінійвмісного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$. Дослідженнями згідно ДСТУ Б EN 196-1 встановлено, що збільшення кількості $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ в

межах 1,5-3,0 мас.% призводить до різкого зменшення рухливості цементно-піщаного розчину ($V/C=0,50$) від 152 до 105 мм, що обумовлено утворенням значної кількості плівкоподібних гідроалюмінатних фаз C_4AH_{19} . Показано, що при введенні 1,0 мас. % PCE + 1,5 мас.% $Na[Al(OH)_4]$ при РК = 150-160 мм за рахунок водоредукуючого ефекту при $\Delta V/C=30$ % відбувається зростання особливо ранньої міцності - через 14 год до 9,6 МПа.

2. Розроблено лужні портландцементи з високою ранньою міцністю різних типів. Так, при введенні 1,5 мас. % лужного алюмінійвмісного активатора та 5,0 мас. % золи-винесення в портландцемент типу СЕМ II/A-LL 42,5 R рання міцність через 12 та 24 год тверднення складає 6,3 та 15,6 МПа, стандартна – 54,6 МПа. Введення 1,0 мас.% PCE за рахунок водоредукуючого ефекту $\Delta V/C=30,0\%$ при РК = 170 мм забезпечує збільшення міцності – через 12 год в 4,5 рази (19,3 МПа), 24 год в 2 рази (35,0 МПа), 2 доби в 1,8 рази (51,2 МПа), 28 діб - у 1,2 рази (73,7 МПа). Таким чином, високий технічний ефект ($\Delta R_{Rc12год}=78,0\%$, $\Delta R_{Rc1}=57,0\%$) дозволяє одержати швидкотверднучий модифікований лужний портландцемент з високою ранньою міцністю ($\Delta R_{Rc1}/R_{Rc28}=47,5\%$, $\Delta R_{Rc2}/R_{Rc28}=69,4$ %).

3. Методом математичного планування експерименту розроблено модифікований лужний композиційний портландцемент. Показано, що введення 1,5 мас. % $Na[Al(OH)_4]$ та 1,0 мас. % PCE до СЕМ II/B-M(P-S-L) 32,5 R забезпечує одержання лужного композиційного портландцементу з високою ранньою міцністю ($R_{ct2}=32,0$ МПа, $R_{ct28}=55,6$ МПа). Встановлено, що лужний портландцемент характеризується пониженою температурою гідратації (від 83 до 59 °C), а температурний пік досягається на 130 хв швидше, порівняно із звичайним портландцементом. Модифікований лужний композиційний портландцемент з високою ранньою міцністю та класу міцності 42,5 R можна одержати за «бетонною» технологією шляхом сумісного змішування композиційного портландцементу СЕМ II/B-M(S-P-L), лужного алюмінійвмісного прискорювача $Na[Al(OH)_4]$ та PCE. Модифікований лужний

композиційний портландцемент відповідає марці 500, згідно ДСТУ Б EN 197-1 класу міцності 42,5R.

4. Комплексом фізико-хімічних методів аналізу встановлено особливості формування фазового складу та мікроструктури цементного каменю на основі лужного портландцементу. Уточнено хімічний механізм дії лужного алюмінатного прискорювача тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ на ранніх стадіях гідратації лужного портландцементу. Методом рентгенофазового аналізу та електронної мікроскопії встановлено, що через 1 добу тверднення фіксуються лінії еtringіту та незначний вміст кальцію гідроксиду. Встановлено, що введення PCE забезпечує швидке накопичення дрібнодисперсних стабільних кристалів еtringіту, які за рахунок явища «самоармування» забезпечують збільшення щільності та водонепроникності модифікованого лужного цементного каменю.

5. Синтезовано алюмінатний наноккомпозит гідронітро-алюмінат кальцію $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ за методом золь-гель технології, що відноситься до класу подвійних кальцієво-алюмінатних гідроксидів типу (Ca_2Al LDH) шаруватої будови, які можуть бути підкладкою для молекул етерів полікарбоксилатів. Показано, що введення алюмінатного наноккомпозиту C-A-N-H-PCE в цементну систему на основі СЕМ II/A-LL 42,5 забезпечує високу ранню (через 12 год - 20,8 МПа) та стандартну (через 28 діб - 90,0 МПа) міцності. Розроблені наноккомпозити (C_2A LDH) – PCE відносяться до нового класу інженерних матеріалів, які забезпечують можливість контролювати кінетику процесів взаємодії при гідратації лужної портландцементної системи в ранній період структуроутворення для направленою формування щільної мікроструктури в неклінкерній частині цементуючої матриці та сприяють покращенню будівельно-технічних властивостей лужного портландцементу.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗУСАДОЧНИХ ТА РОЗШИРНИХ РЕМОНТНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ ЛУЖНИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ

4.1. Дослідження засобів регулювання властивостей ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу

Проектування ремонтних безусадочних сумішей здійснюється з урахуванням походження та якості матеріалів, технології виробництва та особливостей структуроутворення цементуючої матриці розчинів. Покращені експлуатаційні властивості (підвищена рання міцність, необхідні терміни тужавіння, висока міцність зчеплення з основою, водонепроникність, морозо- та корозійна стійкість) досягаються підібраним співвідношенням між складовими суміші, зокрема зернового складу заповнювача, формуванням необхідної мезоструктури розчинів, виду портландцементу, мінеральних добавок та наповнювачів, а також типу модифікатора.

На показники якості ремонтних сумішей у значній мірі впливає розмір та зерновий склад піску, вміст пиловидних, глинистих часток, органічних домішок, характер поверхні зерен дрібного заповнювача. Для забезпечення максимально щільної цементуючої матриці проведено оптимізацію зернового складу піску. При цьому використано піски наступних груп: крупний монофракційний пісок з модулем крупності 2,76 та дуже дрібний пісок з модулем крупності 1,25. Пустотність таких пісків становить 46,5 та 47,5 % відповідно, а вміст глинистих та пилових часток не перевищує 1,5 мас. % зокрема для дрібного піску з $M_k=1,25$. Дослідження з визначення насипної густини та пустотності проводили при зміні співвідношення між дрібним заповнювачем з кроком 25 %. Так, при змішуванні 25 мас. % піску з модулем крупності $M_k=2,76$ та 75 мас. % піску з $M_k=1,25$ модуль крупності такої суміші

зростає від 1,25 до 1,57, а пористість зменшується на 10,7%. Для суміші дрібного заповнювача - 50 мас. % піску з $M_k=2,76$ та 50 мас. % $M_k=1,25$, модуль крупності збільшується в 1,2 рази, зокрема від $M_k=1,25$ до $M_k=1,85$, пористість зменшується на 8,3 %, а насипна густина збільшується від 1410 до 1522 кг/м^3 . При подальшій заміні піску на 75 мас. % з $M_k=2,76$ та 25 мас. % з $M_k=1,25$ модуль крупності збільшується до 1,87. Характеристики оптимізованих зернових складів пісків наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Характеристики оптимізованих зернових складів пісків

Співвідношення пісків ($M_{k2,76}:M_{k1,25}$)		Модуль крупності (M_k)	Насипна густина, $\rho_n, \text{кг/м}^3$	Пористість, $V_{mp}, \%$
75	25	1,87	1533	42,2
50	50	1,85	1522	41,5
25	75	1,57	1479	43,1

Побудовано криві розсіювання пісків, з яких видно, що крива піску з $M_k=1,25$ знаходиться в області дуже дрібних пісків. Частина кривої розсіювання монофракційного піску знаходиться в області крупного піску (рис. 4.1).

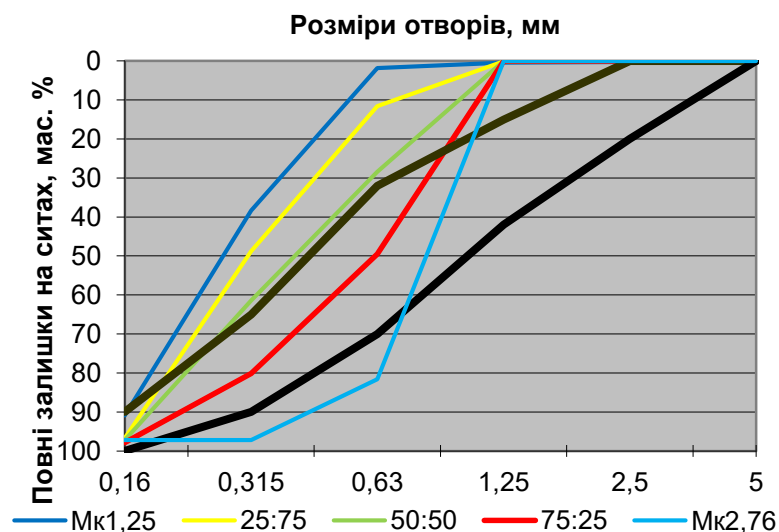


Рисунок 4.1 – Криві розсіювання пісків різних складів

Показано, що крива розсіювання складу $M_{к2,76}:M_{к1,25}=75:25$ найбільше входить в область оптимальних значень для одержання необхідної мезоструктури ремонтної суміші. Дослідженнями встановлено, що насипна густина суміші піску з $M_{к}=2,76$ та $M_{к}=1,25$ складає 1463 та 1410 $\text{кг}/\text{м}^3$, в ущільненому стані – 1673 та 1600 $\text{кг}/\text{м}^3$ відповідно (рис. 4.2, а). Для суміші пісків у співвідношенні $M_{к2,76}:M_{к1,25} = 75:25, 50:50, 25:75$ в насипному стані густина складає $1533, 1522, 1479$ $\text{кг}/\text{м}^3$, при ущільненні зростає до 1690 $\text{кг}/\text{м}^3$, 1673 $\text{кг}/\text{м}^3$, 1655 $\text{кг}/\text{м}^3$. При цьому найменшою пустотністю як в насипному так і ущільненому станах характеризується пісок $M_{к2,76}:M_{к1,25} = 75:25$ – пустотність складає $42,2; 36,2$ %. (рис. 4.2, б).

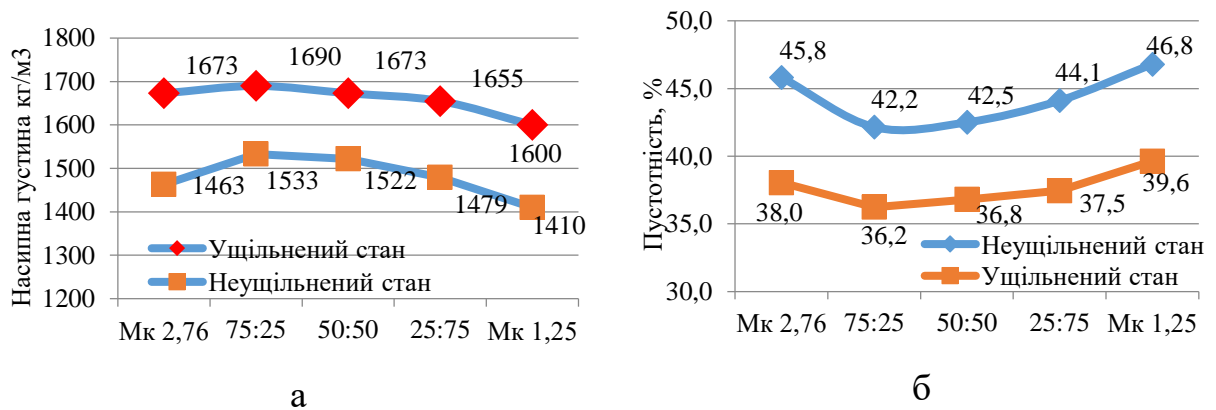


Рисунок 4.2. – Насипна густина (а) та пустотність (б) суміші пісків в ущільненому та неущільненому станах

Експериментальними дослідженнями встановлено, що оптимальний склад піску є в співвідношенні 25 мас. % піску з $M_{к}=1,25$ та 75,0 мас. % з $M_{к}=2,76$. Модуль крупності оптимізованої суміші пуску складає $M_{к}=1,87$. Наступним етапом було проведення дослідження впливу золи-винесення на характеристики оптимізованого складу піску з $M_{к}=1,87$. Так, для складу у співвідношенні $M_{к1,87}:ЗВ=75:25$ насипна густина складає 1683 $\text{кг}/\text{м}^3$, в ущільненому стані – 1840 $\text{кг}/\text{м}^3$. Для складу із вмістом 75 мас. % золи-винесення насипна густина зменшується до 1150 $\text{кг}/\text{м}^3$, в ущільненому стані – до 1371 $\text{кг}/\text{м}^3$ (рис. 4.3, а). Показано, що збільшення кількості золи-винесення призводить до зниження насипної густини. Як видно з рис. 4.3, б, пустотність

суміші $M_{к1,87}:ЗВ=75:25$ при заміні 25,0 мас. % ЗВ зменшується до 35,3 %, а при заміні на 75,0 мас. % ЗВ збільшується до 52,1 %.

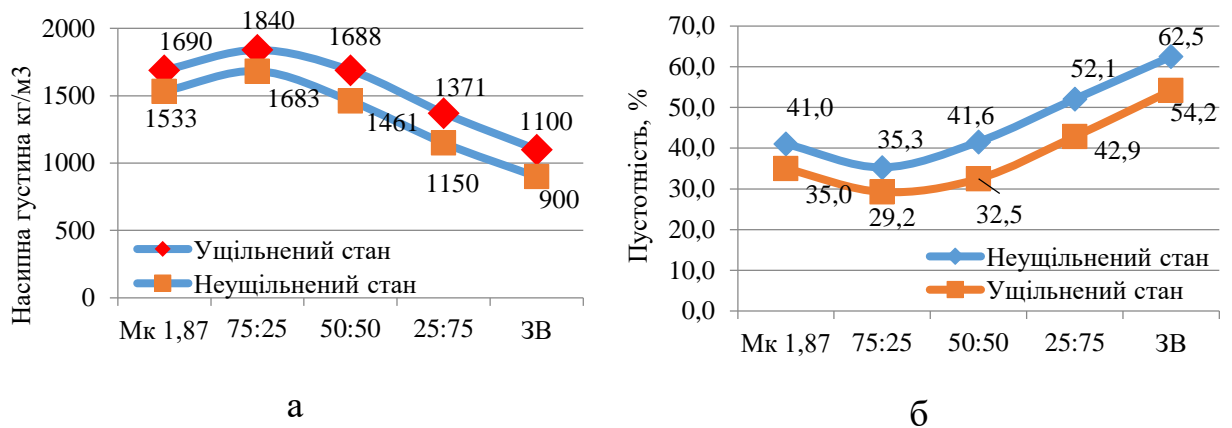


Рисунок 4.3 – Насипна густина (а) та пористість (б) суміші оптимізованого зернового складу «пісок $M_{к1,87}:ЗВ=75:25$ »

Як видно з рис. 4.4, а, при використанні кварцового піску з модулем крупності 1,25 ($M_{к2,76}:M_{к1,25}=0:100$) коефіцієнт щільності становить 0,56 при застосуванні кварцового піску з модулем крупності 2,76 ($M_{к2,76}:M_{к1,25}=100:0$) коефіцієнт щільності складає 0,55. Для суміші піску $M_{к2,76}:M_{к1,25}=75:25$ коефіцієнт щільності зростає до 0,59. Як видно з рис. 4.4, б, при заміні 25,0 мас. % оптимізованого складу піску з $M_{к}=1,87$ на золу-винесення ($M_{к1,87}:ЗВ = 75:25$) коефіцієнт щільності зростає до 0,65.

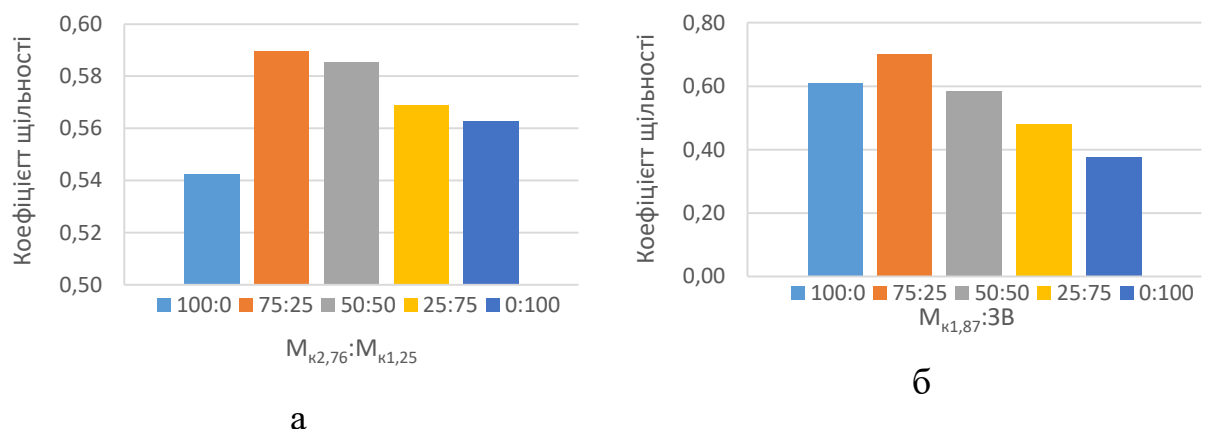


Рисунок 4.4 – Коефіцієнт щільності зернового складу суміші: а – піску $M_{к2,76}:M_{к1,25}$; б – піску:золи винесення $M_{к}=1,87-ЗВ$ »

Фракційний склад піску в значній мірі впливає на фізико-механічні властивості ремонтних сумішей та розчинів на їх основі. Як видно з табл. 4.2, при використанні піску з $M_k=1,25$ для досягнення рухомості розчинової суміші 6-7 см В/Ц складає 0,45. При цьому границя міцності на стиск через 28 діб тверднення становить 51,3 МПа. В той же час, використання піску з $M_k=2,76$ призводить до зменшення водопотреби на 13,2 % та збільшення міцності на стиск через 28 діб тверднення на 11,8 %. При використанні в розчинах оптимального зернового складу піску ($M_{k2,76}:M_{k1,25}=75:25$) водопотреба зменшується на 9,0 %, а міцність на стиск через 28 діб збільшується на 14,0 % порівняно з ремонтною сумішшю з використанням дуже дрібного піску ($M_k=1,25$).

Таблиця 4.2

Вплив кварцового піску різних фракцій на фізико-механічні властивості ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу

Кварцовий пісок ($M_{k2,76}:M_{k1,25}$)	В/Ц	РК, мм	Границя міцності на стиск, МПа, у віці, діб	
			2	28
0:100	0,45	160	14,2	51,3
25:75	0,43	152	15,1	55,3
75:25	0,41	150	16,4	60,0
100:0	0,39	156	15,8	58,2

Таким чином, зерновий склад піску дозволяє впливати на мезоструктуру розчинів та сприяє покращенню технологічних і міцнісних властивостей ремонтних сумішей.

4.2. Проектування складів ремонтних безусадочних сумішей на основі лужних портландцементів

Для одержання швидкотверднучих ремонтних безусадочних сумішей проведено проектування їх складу з використанням портландцементу з вапняком СЕМ П/А-LL 42,5 R, золи-винесення і алюмінійвмісного нанокompозиту з полікарбосилатним суперпластифікатором (С-А-Н-Н-РСЕ). Зола-винесення була використана, як активна мінеральна добавка пуцоланічної дії та наповнювач, що володіє пластифікуючими властивостями. В якості дрібного заповнювача використано оптимізований склад кварцового піску з $M_k = 1,87$. Для визначення впливу С-А-Н-Н-РСЕ та золи-винесення на фізико-механічні властивості ремонтної суміші (Ц:П=1:2, марка за рухливістю П8) проведено експериментальні дослідження у відповідності з планом трирівневого, двофакторного експерименту (табл. 4.3). В якості змінних факторів прийнято вміст золи-винесення (0-20,0 мас. %) (X_1) та алюмінійвмісного нанокompозиту (С-А-Н-Н-РСЕ) (0-5,0 мас.%) (X_2). Складу ремонтної суміші без добавок був прийнятий як еталонний для порівняння показників термінів тужавіння і міцності

Таблиця 4.3

Характеристика плану експерименту

Характеристика	Параметри планування	
	ЗВ, мас.% (X_1)	С-А-Н-Н-РСЕ, мас.% (X_2)
Головний рівень «0»	10	2,5
Нижній рівень «-1»	0	0
Верхній рівень «+1»	20	5,0
Інтервал варіювання	10	2,5

При плануванні було вибрано наступні параметри:

$Y_{\text{поч}}$ – початок тужавіння, хв;

$Y_{\text{кін}}$ – кінець тужавіння, хв;

Y_{Rc14} – міцність при стиску через 14 год, МПа;

Y_{Rbt14} – міцність при згині через 14 год, МПа;

Y_{Rc1} – міцність при стиску через 1 добу, МПа;

Y_{Rbt1} – міцність при згині через 1 добу, МПа;

Y_{Rc2} – міцність при стиску через 2 доби, МПа;

Y_{Rbt2} – міцність при згині через 2 доби, МПа;

Y_{Rc7} – міцність при стиску через 7 діб, МПа;

Y_{Rbt7} – міцність при згині через 7 діб, МПа;

Y_{Rc28} – міцність при стиску через 28 діб, МПа;

$Y_{\text{Rc28-5+5}}$ – міцність при стиску через 28 діб при змінних умовах тверднення (-5...+5 °С), МПа.

Матриця планування та результати повного двофакторного експерименту наведено в табл. 4.4. Аналіз математичних залежностей та результати двофакторного експерименту дозволяють підібрати оптимальне співвідношення між складовими ремонтної суміші.

В результаті проведеного експерименту отримана математична залежність у вигляді рівняння регресії:

$$Y_{\text{поч}} = 127,78 - 69,17X_1 - 6,67X_2 + 15,83X_{11} + 18,33X_{22} - 15,0X_1X_2; \quad (4.1)$$

$$Y_{\text{кін}} = 202,78 - 55,83X_1 - 19,17X_2 + 15,83X_{11} + 5,83X_{22} + 7,75X_1X_2; \quad (4.2)$$

$$Y_{\text{Rc14}} = 9,63 + 2,68X_1 - 0,35X_2 - 3,05X_{11} - 1,55X_{22} - 0,075X_1X_2; \quad (4.3)$$

$$Y_{\text{Rbt14}} = 3,33 + 0,43X_1 - 0,18X_2 - 0,90X_{11} - 0,35X_{22} - 0,10X_1X_2; \quad (4.4)$$

$$Y_{\text{Rc1}} = 22,93 - 1,91X_1 + 0,45X_2 - 1,15X_{11} - 4,75X_{22} - 1,0X_1X_2; \quad (4.5)$$

$$Y_{\text{Rbt1}} = 5,63 - 0,2X_1 + 0,13X_2 + 0,7X_{11} - 0,6X_{22} - 0,4X_1X_2; \quad (4.6)$$

$$Y_{\text{Rc2}} = 43,7 - 2,2X_1 - 1,43X_2 - 3,5X_{11} - 11,2X_{22} - 1,7X_1X_2; \quad (4.7)$$

$$Y_{\text{Rbt2}} = 7,59 - 0,63X_1 - 0,48X_2 - 1,33X_{11} - 0,68X_{22} + 0,75X_1X_2; \quad (4.8)$$

$$Y_{\text{Rc7}} = 58,0 - 1,76X_1 - 4,03X_2 - 2,76X_{11} - 12,6X_{22} + 2,8X_1X_2; \quad (4.9)$$

$$Y_{\text{Rbt7}} = 9,52 - 0,50X_1 - 0,23X_2 - 1,03X_{11} - 0,93X_{22} + 0,07X_1X_2; \quad (4.10)$$

$$Y_{\text{Rc28}} = 71,9 - 2,33X_1 - 1,22X_2 - 6,00X_{11} - 9,95X_{22} - 0,25X_1X_2; \quad (4.11)$$

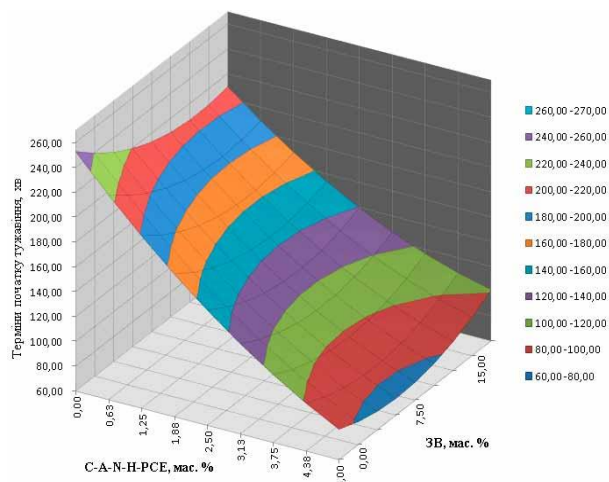
$$Y_{\text{Rc28(-5...+5)}} = 62,73 - 1,12X_1 - 0,98X_2 - 7,95X_{11} - 6,35X_{22} - 1,2X_1X_2. \quad (4.12)$$

Таблиця 4.4

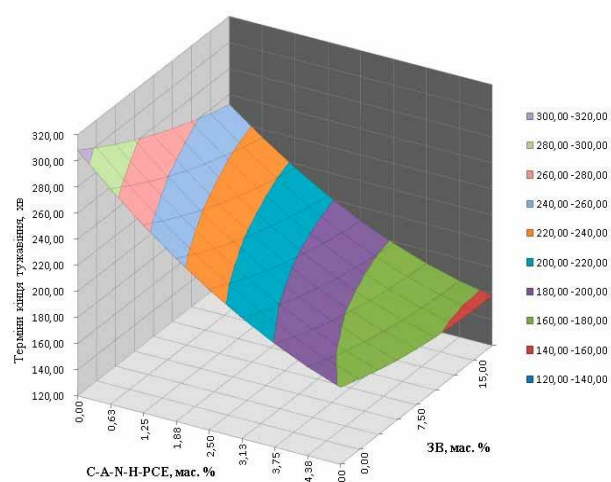
Матриця планування та результати двофакторного експерименту

№	X ₁	X ₂	С-А-Н-Н-РСЕ, мас. %	ЗВ, мас. %	В/Ц	РК, мм	ρ _{сер} кг/м ³	Термін тужавіння, хв		Міцність на згин МПа, у віці, діб				Міцність на стиск МПа, у віці, діб					
								Поч.	Кін.	14	1	2	7	14	1	2	7	28	28 (-5+5 °С)
1	-1	-1	0	0	0,38	155	1981	240	285	1,8	4,3	6,4	8,4	3,5	16,4	30,8	50,8	60,0	52,0
2	0	-1	2,5	0	0,40	146	2038	160	230	2,9	4,9	6,9	8,6	7,8	18,9	34,2	52,0	63,7	54,2
3	+1	-1	5,0	0	0,43	153	1984	90	200	3,0	4,9	6,2	7,4	7,9	14,8	29,8	40,2	54,0	57,0
4	-1	0	0	10	0,36	156	2132	235	320	2,1	5,3	7,4	9,2	3,0	24,4	42,0	56,0	67,0	52,1
5	0	0	2,5	10	0,39	143	2123	120	200	3,4	5,7	7,6	9,4	9,8	22,0	44,5	57,2	70,9	54,0
6	+1	0	5,0	10	0,41	150	2051	60	120	3,7	4,5	5,1	7,9	10,0	19,7	37,6	55,4	66,0	54,2
7	-1	+1	0	20	0,34	157	2162	200	230	1,4	4,6	5,5	7,5	2,1	20,0	32,0	39,2	58,0	50,9
8	0	+1	2,5	20	0,36	151	2084	140	190	3,0	5,1	6,9	8,7	8,2	18,4	30,0	39,8	61,4	55,3
9	+1	+1	5,0	20	0,39	149	2063	110	180	2,2	3,6	4,2	6,8	6,8	14,4	24,2	39,8	51,0	44,1

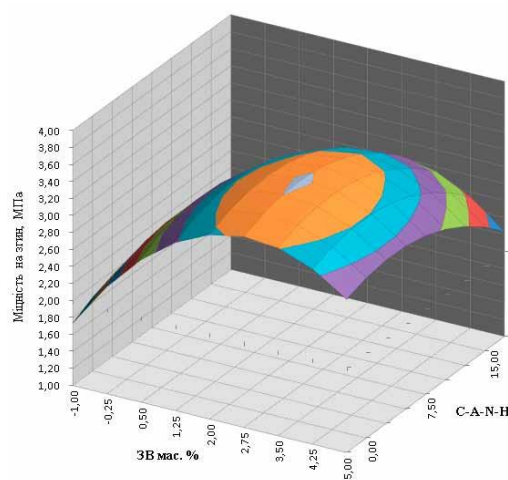
Проведеним аналізом математичних моделей встановлено, що для суміші без добавок терміни початку та кінця тужавіння складають 240 та 285 хв відповідно. Показано, що при введенні 2,5 мас.% С-А-Н-Н-РСЕ (X_2) призводить до збільшення водопотреби ремонтної суміші від 0,38 до 0,40. При цьому рання міцність через 14 год тверднення зростає від 1,8 до 2,9-3,0 МПа, через 1, 2 та 28 діб становить 18,9, 34,2 та 63,7 МПа. Збільшення С-А-Н-Н-РСЕ до 5,0 мас. % призводить до скорочення термінів тужавіння до 90 хв. При цьому міцність знижується на 12 % у віці першої доби та на 5,0 % через 28 діб тверднення у нормальних умовах. Введення в суміш 10 мас.% золи-винесення, що визначає фактор (X_1) нівелює негативний вплив за рахунок пластифікуючого ефекту, що в залежності від вмісту призводить до зниження В/Ц з 0,43 до 0,41, при цьому початок тужавіння складає 235 хв. Так введення 10,0 мас. % золи-винесення та 5,0 мас.% С-А-Н-Н-РСЕ дозволяє отримати пришвидшені терміни тужавіння – 70 хв (початок) та 140 хв (кінець), та високу особливо ранню міцність на згин і стиск – 3,7 МПа та 10,0 МПа відповідно. Найбільшою стандартною міцністю (70 МПа) характеризується суміш з добавками 2,5 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ та 10,0 мас. % золи-винесення. Показано, що збільшення вмісту золи-винесення до 20,0 мас.% призводить до сповільнення термінів тужавіння і зниження міцності. Зменшення вмісту золи-винесення до 5,0-7,0 мас.% в суміші з одночасним введенням з 5,0 мас.% нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ дозволить пришвидшити терміни тужавіння до 30-40 хв та одержати необхідні показники міцності. Проведено дослідження міцності суміші на стиск зразків, що витримували у змінних умовах при температурі -5 ... +5 °С. Встановлено, що для сумішей з добавкою 2,5 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ через 28 діб тверднення при змінних умовах тверднення міцність на стиск становить 56,0 МПа. В умовах при понижених додатних та від'ємних температур найбільшою міцністю (57,0 МПа) характеризується суміш з вмістом лужного нанокompозиту 5,0 мас. %.



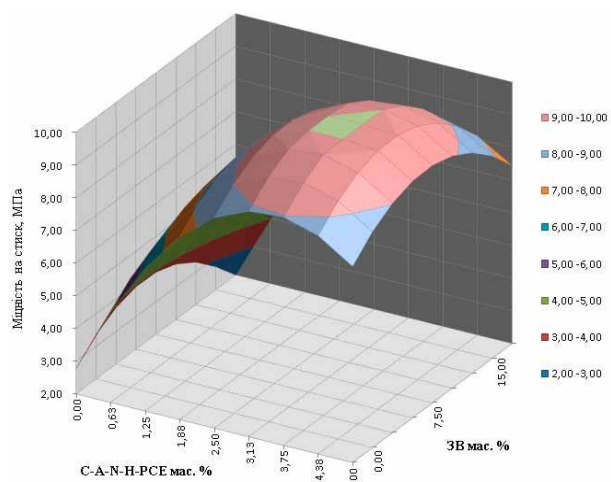
а



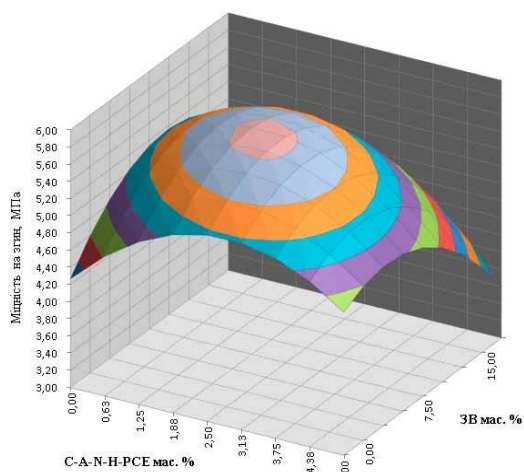
б



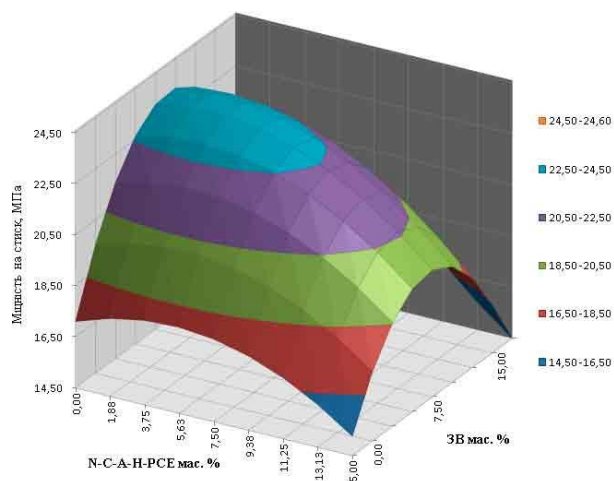
в



г



е



є

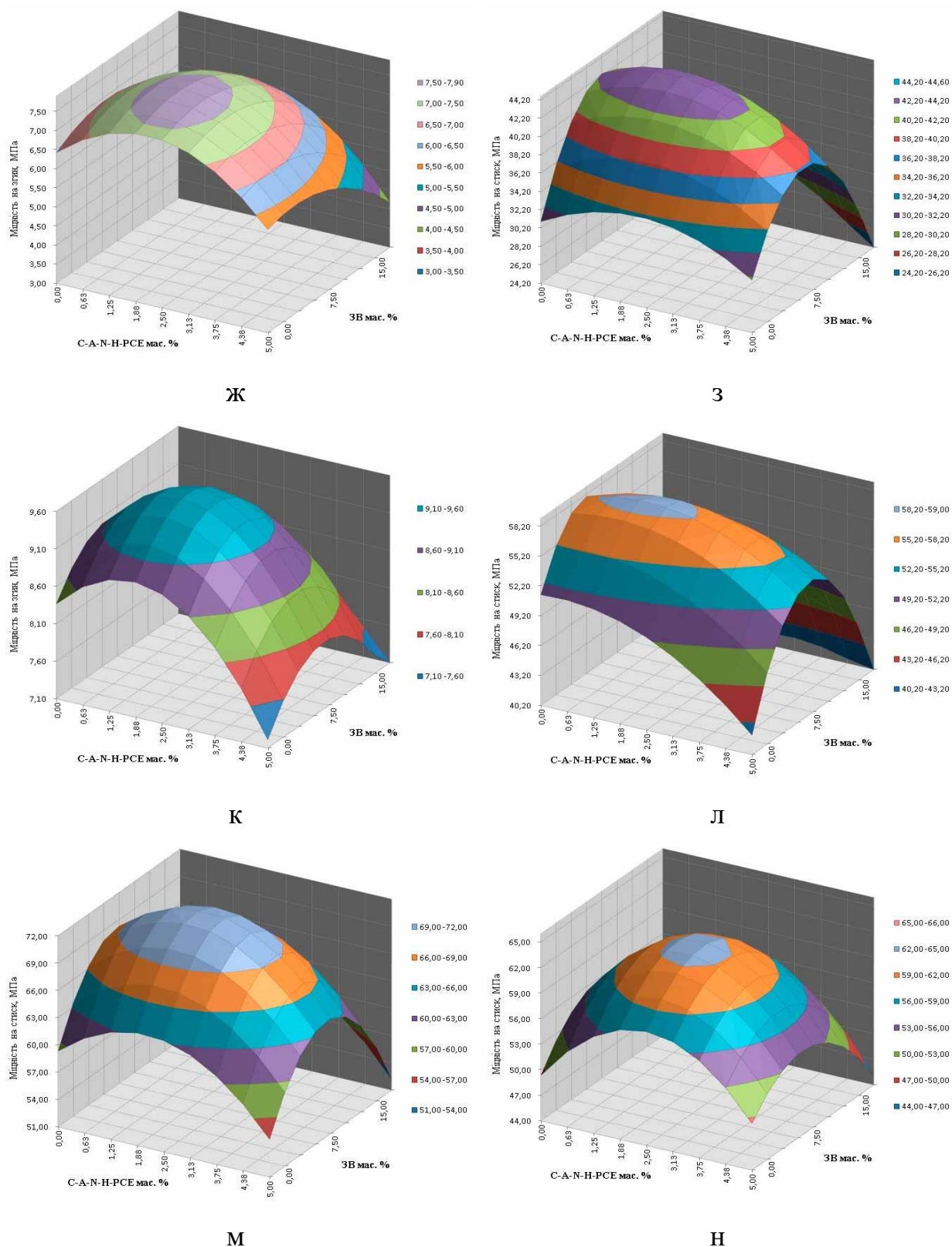


Рисунок 4.5 – Ізопараметричні поверхні відгуку зміни термінів початку (а) та кінця (б) тужавіння, міцності на стиск та згин через 14 год (в, г); через 1 добу (е, є); через 2 доби (ж, з); через 7 діб (к, л); при стиску через 28 діб (м) та 28 діб при $t=-5...+5$ °С (н) тверднення

Аналіз експериментальних даних математичного моделювання в заданому інтервалі зміни співвідношення складу свідчить, що при введенні оптимальної кількості С-А-Н-Н-РСЕ – 2,5 – 5,0 мас.% та золи-винесення – 10,0 мас.% в склад модифікованої ремонтної суміші на основі лужного портландцементу та оптимального складу кварцового піску ($M_{к2,76}:M_{к1,25}=75:25$) забезпечується марочна міцність при стиску 66,0 – 70,9 МПа (рис. 4.5). Встановлено, що найвищий технічний ефект при одержанні ремонтної суміші досягається через 14 год ($\Delta R_{c14год} = 64,0 \%$). Таким чином, розроблений оптимальний склад ремонтної безусадочної суміші (2,5 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ та 10,0 мас. % золи-винесення) можна віднести до швидкотверднучої ($R_{c1}/R_{c28} = 31,0 \%$; $R_{c2}/R_{c28} = 63,0 \%$, $R_{c28} = 70,9$ МПа).

Досліджено вплив двоводного сульфату кальцію на властивості ремонтних безусадочних сумішей, модифікованих нанокompозитом С-А-Н-Н-РСЕ. Було введено двоводний сульфат кальцію в кількості 3,0 мас.%. Досліджено міцність при стиску та згині ремонтних сумішей з двоводним сульфатом кальцію при консистенції за плунжером 24 мм. Рання міцність для суміші з добавками 2,5 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ та 10,0 мас. % ЗВ при В/Ц=0,39 у віці 1 доби складає 22,0 МПа (рис. 4.6, а). У віці 2 діб міцність складає 44,5 МПа, а через 7 та 28 діб – 57,2 та 70,9 МПа. При введенні 3,0 мас.% двоводного сульфату кальцію В/Ц збільшилось до 0,42, при цьому сповільнюються терміни тужавіння з 180 до 240 – 300 хв. Рання міцність через 1 добу склала 24,2 МПа, що на 9,0 % більше для складу без двоводного сульфату кальцію. У віці 2,7 та 28 діб міцність складає 48,7; 61,3 та 72,3 МПа відповідно. Склад із вмістом 5,0 мас.% С-А-Н-Н-РСЕ+10,0 мас.% ЗВ + 3,0 мас. % двоводного сульфату кальцію показав міцність через 1 добу – 20,5 МПа, у віці 2; 7 та 28 діб - 33,3; 44,5 та 68,2 МПа. При збільшенні кількості РСЕ до 1,0 мас. % міцність тверднення через 28 діб вища на 7,2 % порівняно із складом з 5,0 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ+10,0 мас. % ЗВ + 3,0 мас. %, де РСЕ 0,8 мас. %. Кінетика зміни міцності при згині є подібна. Так, через 28 діб тверднення всі суміші показали міцність при згині в межах 10,5 – 11,0 МПа (рис. 4.6, б). Таким чином,

введення двоводного сульфату кальцію дозволяє збільшити швидкість набирання ранньої міцності.

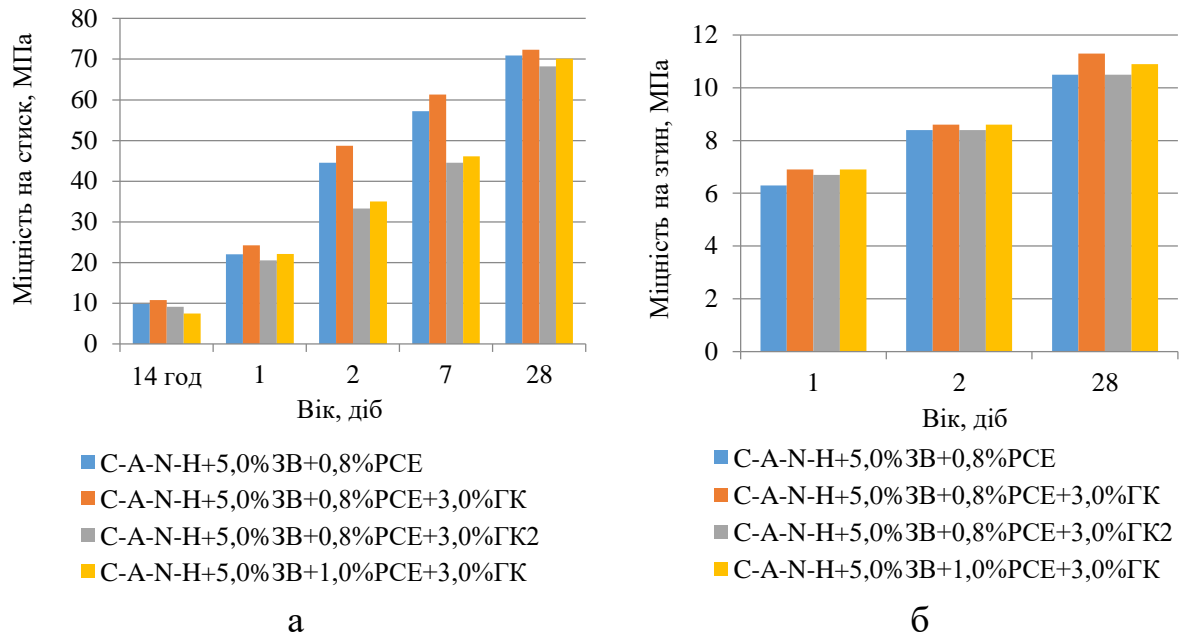


Рисунок 4.6 – Міцність при стиску (а) та міцність при згині (б) ремонтної суміші з добавкою двоводного сульфату кальцію

Отже, розроблені ремонтні суміші на основі лужного портландцементу з добавкою алюмінійвмісного нанокompозиту можна віднести до швидкотверднучих.

4.3. Будівельно-технічні властивості модифікованих ремонтних безсадочних сумішей на основі лужних портландцементів

Технології будівництва вимагають скорочення термінів виконання будівельних робіт, що потребує високих технічних та експлуатаційних характеристик ремонтних сумішей. Фізико-хімічне модифікування властивостей суміші шляхом використання мінеральних та хімічних добавок різного походження стає основним напрямком дослідження при розробленні ремонтних будівельних сумішей.

4.3.1. Рухливість, консистенція

Досліджено рухомість ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу згідно ДСТУ Б В.2.7-239:2010 та консистенцію сумішей згідно EN 413-2. Склади швидкотверднучих ремонтних сумішей ШРБС та показники рухливості наведено в табл. 4.5. Встановлено, що суміші характеризуються зануренням еталонного конуса в межах 7,0-8,0 см, відповідає марці за рухомістю П8. Відзначено, що рухомість 7,0 см для суміші ШРБС-1 з вмістом 5,0 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ досягається при В/Ц = 0,43, при цьому плунжер проникнув в суміш на 21 мм. Для модифікованої ремонтної суміші ШРБС-2 з вмістом 2,5 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ та 10 мас. % ЗВ рухливість становить 6,0 см, при цьому плунжер проникнув в суміш на 20,0 мм. При збільшенні вмісту С-А-Н-Н-РСЕ до 5,0 мас. % водопотреба суміші ШРБС-3 складає 0,41, при цьому рухливість суміші становить 7,0 см, плунжер проникнув в суміш на 22,0 мм. При збільшенні кількості ЗВ до 20,0 мас. % в ремонтній суміші ШРБС-4, що містить 2,5 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ В/Ц зменшилось до 0,36 при осадці еталонного конуса 8,0 см, плунжер проникнув в суміш на 23 мм.

Таблиця 4.5

Рухомість модифікованих швидкотверднучих ремонтних сумішей

№ з/п	Кількість добавок, мас.%		В/Ц	Рухомість	
	С-А-Н-Н-РСЕ	ЗВ		Занурення конуса, см	Проникнення плунжера, мм
ШРБС-1	5,0	0	0,43	7	21
ШРБС-2	2,5	10,0	0,39	6	20
ШРБС-3	5,0	10,0	0,41	7	22
ШРБС-4	2,5	20,0	0,36	8	23

Ремонтні суміші з маркою за рухливістю П8 наносять на поверхню для ремонту шарами від 50 до 100 мм.

4.3.2. Деформації усадки-розширення

Досліджено деформації усадки-розширення ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу із використанням золи-винесення та алюмінатного нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ. Визначення деформацій ремонтних розчинів здійснювалися на зразках балочках 20x20x160 мм, які зберігалися у воді протягом 7 діб тверднення, після цього зразки тверднули в повітряно-сухих умовах (рис. 4.7). Показано, що протягом 7 діб тверднення у воді наявні деформації розширення для всіх складів, які змінюються від 0,10% (0,06 мм/м) до 0,15% (0,25 мм/м). Найбільшими деформації усадки (0,81 мм/м через 56 діб тверднення) характеризується склад без добавок. Найменші лінійні деформації показав склад ШРБС-1 з вмістом 5,0 мас % С-А-Н-Н-РСЕ.

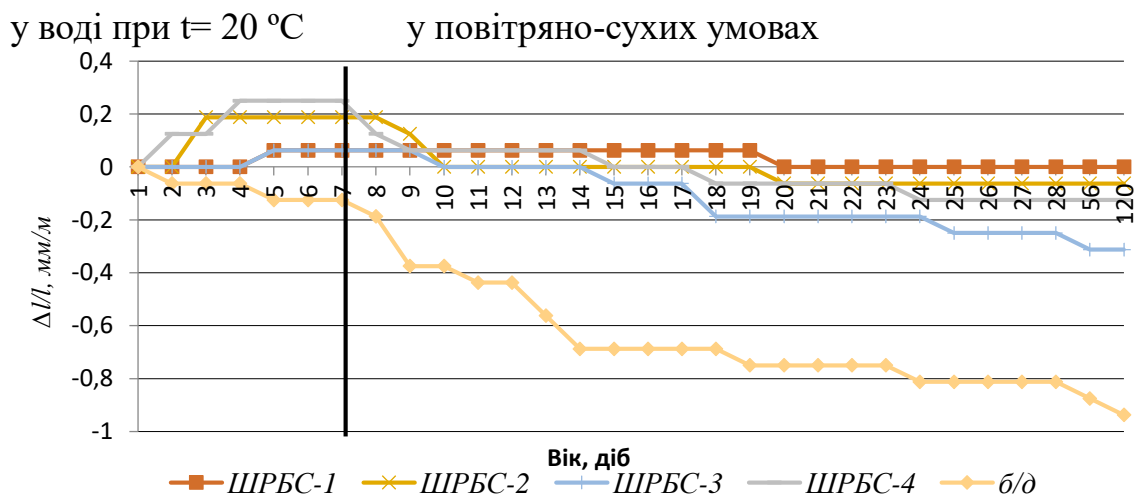


Рисунок 4.7 – Деформації швидкотверднучих ремонтних сумішей

Втрата маси в ремонтних безусадочних сумішах відбувалася в період перших 17 діб тверднення. Показано, що протягом перших 7 діб спостерігається збільшення маси зразків до 3,5 мас. %, після цього спостерігалася втрата маси в інтервалі від 10 до 23 діб в межах від 1,0 до 3,5 мас. %. Найбільші втрати маси спостерігалися в складі без добавок і досягли 4,0 мас. %. В подальшому показники маси не змінювалися (рис. 4.8).

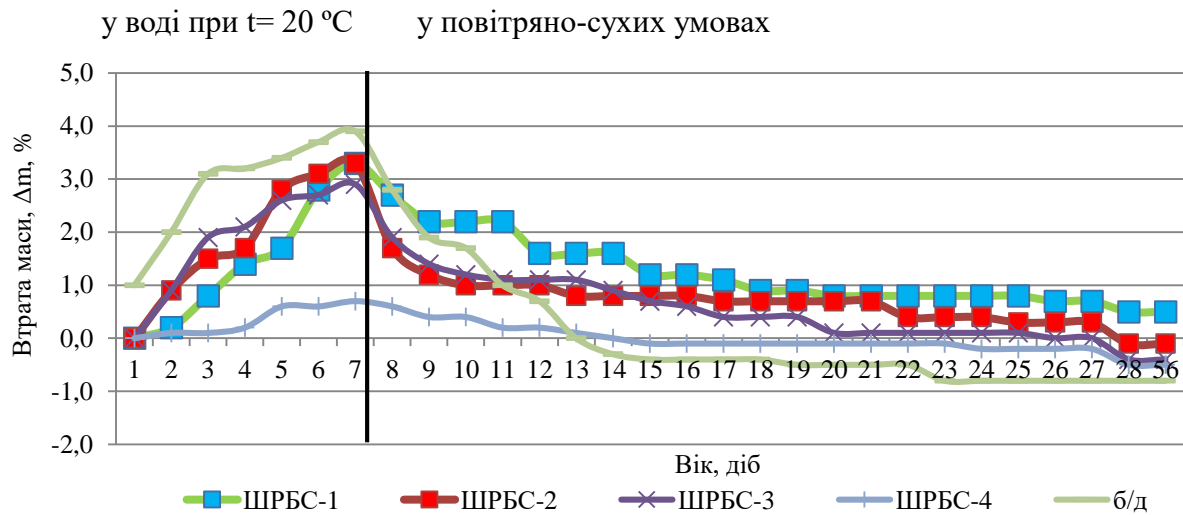


Рисунок 4.8 – Втрати маси швидкотверднучих ремонтних сумішей

Досліджено вплив двоводного сульфату кальцію на деформації усадки модифікованих ремонтних сумішей. Як видно з рис. 4.9, на початку тверднення у воді протягом 5-7 діб наявні деформації розширення (до 0,5%) в складах сумішей з двоводним сульфатом кальцію. В таких ремонтних сумішах деформації усадки стабілізуються через 17 діб. Показано, що через 120 діб тверднення власні деформації усадки складають 0,3 мм/м.

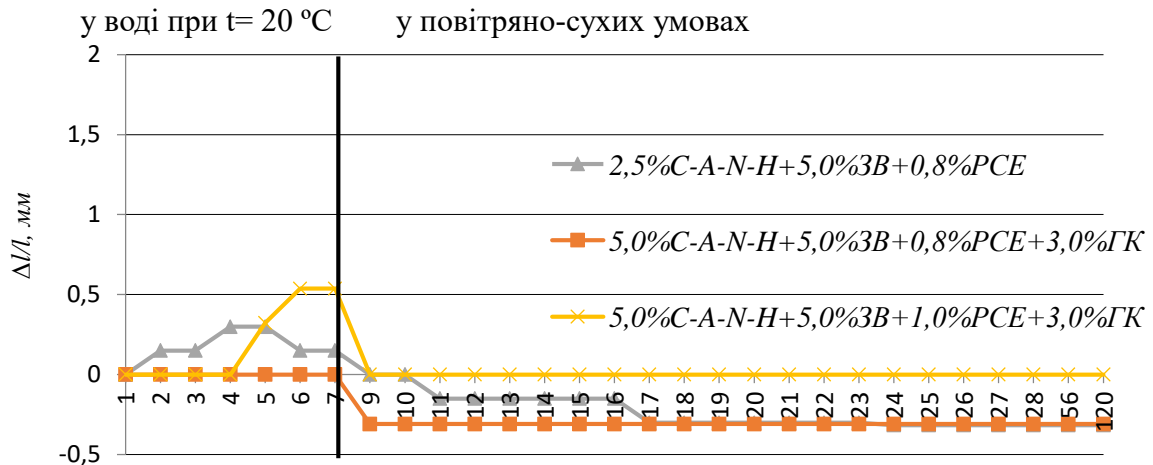


Рисунок 4.9 – Деформації ремонтних сумішей з двоводним сульфатом кальцію

4.3.3. Показники деформативності, модуль пружності. Відновлені конструкції знаходяться в умовах складного напруженого стану по всій площі

поперечного перерізу. Стандартні способи розрахунку складів розчинів забезпечують показники міцності та рухливості, але не враховують стабільності при довготривалій експлуатації. Тому проведено дослідження призмової міцності, модуля пружності та визначено коефіцієнт Пуассона згідно ДСТУ Б В.2.7-217:2009 (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Визначення показників деформативності ремонтної безусадочної суміші (а, б); визначення призмової міцності (в)

В результаті випробування призм розміром 100x100x400 мм ремонтної безусадочної суміші із вмістом 3,0 мас. % двоводного сульфату кальцію визначено модуль пружності при навантаженні, що склало 30 % від руйнівного. В табл. 4.6 наведені показники приладів вимірювання деформацій. Призмova міцність через 28 діб тверднення становить 41,4 МПа, модуль пружності - 51,7 ГПа. Як видно з табл. 4.7, для ремонтної суміші ШРБС-2 з добавкою С-А-Н-Н-РСЕ + ЗВ призмova міцність через 28 діб становить 45,3 МПа, розрахункове значення модуля пружності 54,7 ГПа. При введенні золи-виносення в кількості 20,0 % призмova міцність знижується до 41,4 МПа, модуль пружності складає 49,5 ГПа, що свідчить про підвищення тріщиностійкості розчинів.

Таблиця 4.6

Показники приладів вимірювання деформацій

Номер ступеня навантаження	Час додавання хв	Навантаження на зразок, МПа	Показники приладів вимірювання деформацій $\Delta l \cdot 10^3 \text{мм}$								Середнє збільшення $\Delta l \cdot 10^3 \text{мм}$	
			1	2	3	4	5	6	7	8		
			відлік	відлік	відлік	відлік	відлік	відлік	відлік	відлік	відлік	відлік
0	0	0	0190	0127	0190	0127	0263	0231	0048	0235	-	-
1	5	2,5	0207	0167	0207	0167	0262	0229	0054	0235	25,5	0,75
2	10	5,0	0215	0204	0215	0204	0261	0227	0055	0236	51,00	0,50
3	15	7,5	0222	0235	0222	0235	0260	0227	0043	0236	70,00	-3,25
4	20	10,0	0229	0243	0224	0243	0259	0224	0042	0236	75,13	-3,72
5	25	12,5	0236	0266	0229	0266	0258	0222	0041	0235	89,00	-5,00

Для ремонтних безусадочних сумішей визначено коефіцієнт тріщиностійкості. Границю тріщиностійкості визначали за критичними значеннями умовного коефіцієнта тріщиностійкості K_c при максимальних навантаженнях стиску та згину через 28 діб тверднення. Так, показник тріщиностійкості для ремонтних безусадочних сумішей становить 0,14-0,15.

Таблиця 4.7

Показники міцності та деформативності швидкотверднучих безусадочних ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу

Ремонтна суміш	Призмova міцність, МПа	Модуль пружності, Е, ГПа	Коефіцієнт Пуассона, ν
ШРБС-2	45,3	54,7	0,16
ШРБС-4	41,4	49,5	0,16

4.3.4. Міцність зчеплення з основою. Ремонтні суміші призначені для відновлення майже всіх типів мінеральних основ згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Міцність зчеплення ремонтної суміші з основою визначали методом відриву металевого відривача з подальшою оцінкою руйнувань. Дослідження здійснювалися згідно ASTM D4541. Ремонтну суміш наносили шаром до 7,0 мм. Зразки тверднули в нормальних та при понижених температурах. На поверхню ремонтної суміші за допомогою епоксидного клею кріпили металевий «грибок». Після цього за допомогою коронки обмежували площу відриву. Адгезиметр встановлюється в робоче положення. В результаті обертання ручки адгезиметра відбувався відрив ремонтної суміші від макету основи (рис. 4.11). Міцність зчеплення ремонтних сумішей з основою через 28 діб наведена в табл. 4.8. Показано, що найвищою міцністю зчеплення з основою (4,0 МПа) характеризується ремонтна суміш на основі лужного портландцементу ШРБС-2, як при відриві від бетонної так і керамічної основ.

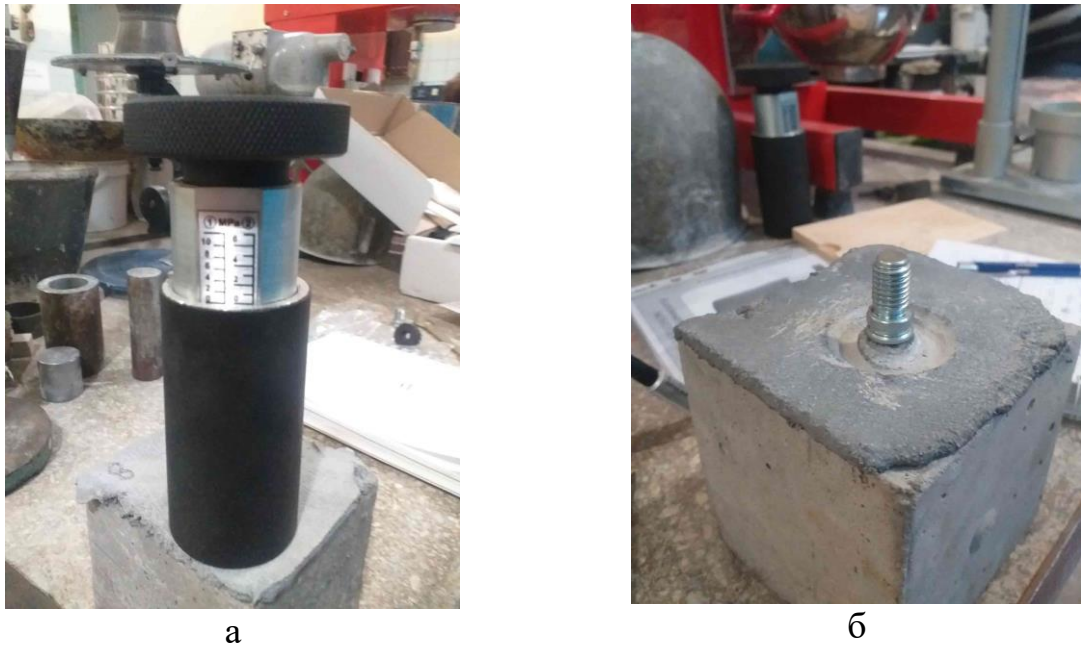


Рисунок 4.11 – Визначення міцності зчеплення ремонтної суміші з основою: а – адгезиметр під час випробування; б – макет з нанесеним розчином

Таблиця 4.8

Міцність зчеплення ремонтних сумішей з основою

Макет	Міцність зчеплення з основою, МПа							
	ШРБС-1		ШРБС-2		ШРБС-3		ШРБС-4	
	t=20°C	t=-5+5°C	t=20°C	t=-5+5°C	t=20°C	t=-5+5°C	t=20°C	t=-5+5°C
Бетонна основа	2,5	2,0	4,0	3,5	2,5	2,0	3,5	2,5
Керамічна основа	2,0	2,0	4,0	3,0	3,0	2,0	4,0	2,5

4.3.5. Морозостійкість. Важливою експлуатаційною характеристикою, що визначає довговічність будівельних конструкцій є морозостійкість. Морозостійкість визначали за стандартними методами згідно ДСТУ Б В.2.7-23-95 на зразках призми розміром 40x40x160 через 28 діб тверднення. Дослідження здійснювалося при температурі $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ в морозильній камері. Встановлено, що зразки швидкотверднучої ремонтної суміші на основі лужного портландцементу ШРБС не зазнали істотних змін, при багаторазових

циклах змінного заморожування в стані насиченим водою через 8 циклів морозостійкість відповідає високій марці за морозостійкістю - F300-F400.

4.3.6. Водопоглинання, пористість. Для швидкотверднучих ремонтних сумішей водопоглинання за масою через 28 діб тверднення становить від 2,5 до 2,9 %. При цьому спостерігається висока закрита пористість – 7,6 до 8,0 %. Введення С-А-N-H-РСЕ та ЗВ дозволяє регулювати параметри водопоглинання та пористості ремонтної суміші. Так для сумішей ШРБС-1 та ШРБС-4 коефіцієнт середнього розміру пор λ становить 0,45, при цьому коефіцієнт однорідності розподілу пор за розмірами α становить 0,55 та 0,50. Понижене водопоглинання зумовлене утворенням щільної мікроструктури модифікованої цементуючої матриці швидкотверднучої ремонтної суміші (табл. 4.9).

Таблиця 4.9

Пористість, водопоглинання модифікованих ремонтних сумішей

Ремонтна суміш	Водопоглинання, W_m , %	Пористість, %		λ	α
		Відкрита	Закрита		
ШРБС-1	2,9	6,3	5,6	0,45	0,55
ШРБС-2	2,4	5,3	8,0	0,50	0,50
ШРБС-3	2,8	6,4	5,5	0,40	0,55
ШРБС-4	2,5	5,5	7,6	0,45	0,50

4.3.7. Корозійна стійкість. При відновленні бетонних та залізобетонних конструкцій вагомий вплив має корозійна стійкість ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу. Корозійну стійкість ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу визначали за зміною міцності зразків розміром 20x20x80 мм при витримуванні їх в агресивному середовищі (10% розчин сульфату натрію). Це дало можливість візуально спостерігати процеси руйнування зразків в умовах агресивного середовища, а результати випробувань міцності підтверджені одержаними значення коефіцієнту корозійної стійкості. Показано, що коефіцієнт корозійної стійкості для

швидкотверднучих ремонтних безусадочних сумішей змінюється в межах $K_{ст,90} = 1,14 - 1,18$ (табл. 4.10).

Таблиця 4.10

Коефіцієнт корозійної стійкості модифікованих ремонтних безусадочних сумішей

Ремонтна суміш	В/Ц	РК, мм	$K_{ст,90}$
ШРБС-1	0,39	143	1,15
ШРБС-2	0,41	145	1,14
ШРБС-3	0,36	151	1,18
ШРБС-4	0,39	150	1,18

4.3.8. Водонепроникність. Проникнення води в будівельний матеріал – один з найбільш поширених факторів, що спричиняє руйнування будівельної конструкції. Здійснено дослідження водонепроникності швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші на основі лужного портландцементу. Водонепроникнення визначали згідно з EN 12390-8 за максимальною глибиною проникнення води під тиском в зразок ремонтної суміші (150x150x150 мм) через 28 діб тверднення в нормальних умовах. На зразок протягом 72 год подавався тиск води 0,5 МПа. Під час огляду сколу зразків встановлено, що вода проникла в зразок на глибину 5...4 мм. Досліджувані зразки ШРБС-2 і ШРБС-4 відповідають марці за водонепроникністю W16 (табл. 4.11).

Таблиця 4.11

Водонепроникність модифікованих ремонтних безусадочних сумішей

Ремонтна суміш	Глибина проникнення води, мм	Марка за водонепроникністю, W
ШРБС-2	5,0	W16
ШРБС-4	4,0	W16

Результати досліджень показників якості модифікованих ремонтних безусадочних сумішей на основі лужного портландцементу наведені в табл. 4.12.

Таблиця 4.12

Показники якості модифікованих ремонтних безусадочних сумішей на основі лужного портландцементу

Показник	Значення				
	ШРБС-1	ШРБС-2	ШРБС-3	ШРБС-4	
В/Ц	0,43	0,39	0,41	0,39	
Середня густина, кг/ м ³	1984	2123	2051	2063	
Початок тужавіння, хв	90	120	60	110	
Кінець тужавіння, хв	200	200	120	180	
Розплив конуса, мм	153	143	150	149	
Міцність зчеплення з основою, МПа	2,0	4,0	3,0	4,0	
Міцність на стиск, МПа, у віці діб	14 год	7,8	9,8	10,0	6,8
	1	14,8	22,0	19,7	14,4
	2	29,8	44,5	37,6	24,2
	28	54,0	70,9	66,0	51,0
Деформації усадки, мм/м	0,06	0,06	0,13	0,25	
Модуль пружності, ГПа	-	51,7	-	49,5	
Коефіцієнт крихкості	0,14	0,15	0,13	0,12	
Корозійна стійкість через 90 діб	1,15	1,14	1,18	1,18	
Пористість, %	11,9	13,3	11,9	13,1	
Марка за водонепроникністю, W	-	W16	-	W16	

Згідно аналізу досліджених показників якості, зокрема власних деформацій розроблені швидкотверднучі ремонтні суміші на основі лужного портландцементу можна віднести до безусадочних ШРБС згідно проекту ТУ У 23.5-02071010-178:2020 «Модифіковані швидкотверднучі ремонтні суміші на основі лужного портландцементу».

Таким чином, модифіковані безусадочні ремонтні суміші на основі лужного портландцементу, що використані для анкерування та відновлення пошкоджених бетонних та залізобетонних елементів конструкцій характеризуються підвищеними експлуатаційними властивостями, пониженими деформаціями усадки, високою міцністю зчеплення з основою, морозостійкістю та водонепроникністю.

4.4. Дослідження процесів структуроутворення в модельних розширних системах на основі алюмінату натрію

Головною умовою для отримання розширних ремонтних сумішей є створення відповідних умов для збільшення об'єму системи та забезпечення відповідної міцності штучного каменю. Встановлено закономірності впливу мінеральних добавок та хімічних модифікаторів на процеси структуроутворення модельних розширних систем на основі лужного прискорювача алюмінату натрію. Для встановлення процесів структуроутворення на першому етапі досліджено вплив хімічних добавок на час і температуру гасіння вапна. Дослідження здійснювали згідно з ДСТУ Б В.2.7-90:2011. Для визначення вказаних показників наважку негашеного вапна поміщали в термос, після чого вливали дистильовану воду ($t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Термос закривали корком із встановленим термометром. Як видно з рис. 4.12, а, при замішуванні негашеного вапна з водою температура зростала протягом 2 хв та

досягла 98 °С. Показано, що введення гідрофобізуючої добавки на основі кремнійорганічних сполуки ГКЖ в кількості 1,0 та 3,0 мас.% не впливало на температуру та швидкість гасіння вапна. При введенні 1,0 мас. % РСЕ температура досягла 99 °С. В той же час, при збільшенні кількості РСЕ до 3,0 мас. % спостерігається сповільнення часу гасіння вапна до 240 с, що на 120 с більше порівняно з вапном без добавок, при цьому температура досягла 110 °С.

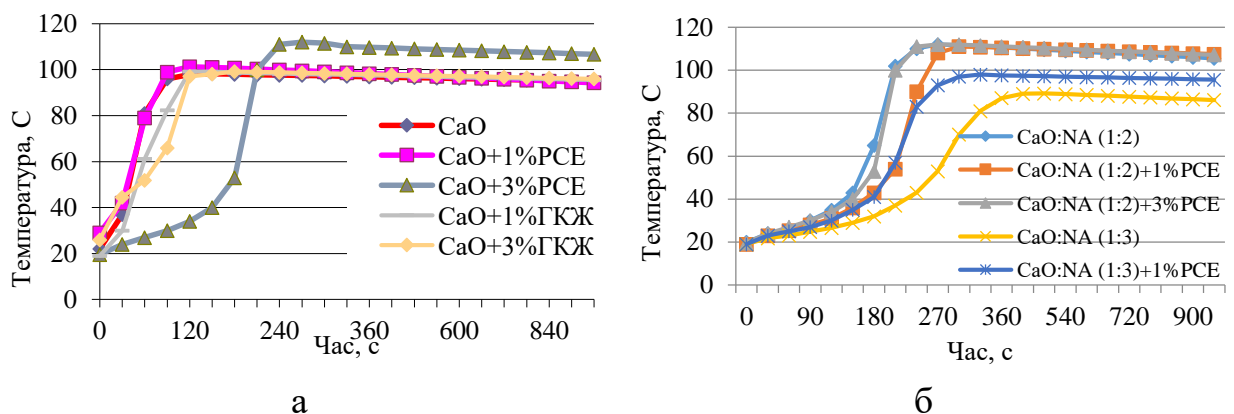


Рисунок 4.12 – Кінетика зміни температури і часу при гасінні CaO: а – з водою замішування; б – з лужним активатором $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$

Проведено дослідження впливу лужного алюмінійвмісного прискорювача $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та полікарбонатного суперпластифікатора на показники гасіння вапна (рис. 4.12, б). Встановлено, що при введенні $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ (концентрація $C=38\%$) час гасіння вапна збільшився на 33,0 % до 180 с, а температура зросла до 112 °С. При введенні РСЕ в кількості 1,0 та 3,0 мас.% час гасіння збільшився на 40,0 % - до 200 с, температура залишилася на рівні 112 °С. Збільшення кількості $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ в 3 рази призвело до зниження температури гасіння вапна на 20 °С, а час гасіння збільшився на 66,6 % до 360 с. При введенні РСЕ в кількості 1,0 мас.% час гасіння вапна склав 200 с, температура досягла 98,0 °С.

Згідно даних рентгенофазового аналізу (рис. 4.13) для модельної системи $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]+\text{CaO}$ ($B/T=0,5$) характерними є фази гідроксиду кальцію

($d/n=0,493; 0,263; 0,192$ нм) та гідрокабоалюмінату кальцію ($d/n=0,750; 0,378$ нм). При введенні полікарбоксилатного суперпластифікатора РСЕ якісний фазовий склад модифікованого каменю на основі $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]+\text{CaO}$ не змінився.

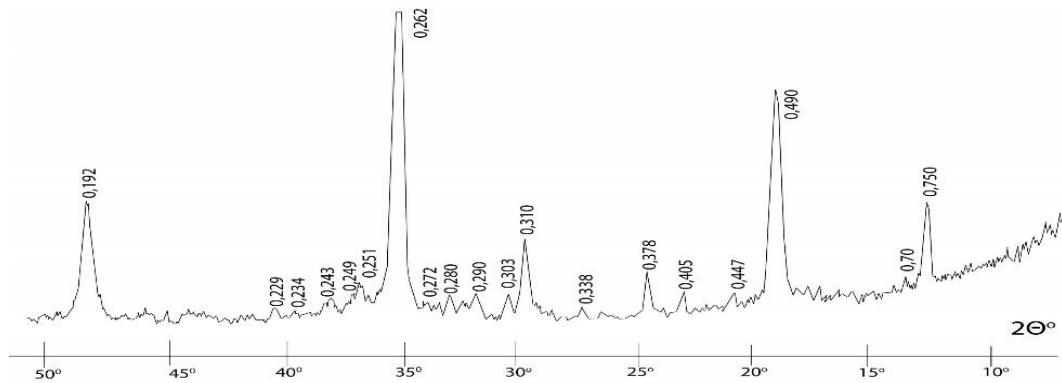


Рисунок 4.13 – Дифрактограма модельної системи $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{CaO}$

Для розкриття ролі сульфатних компонентів у структуроутворенні ремонтних розширних сумішей досліджено модельну систему $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O} - \text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$. З рис. 4.14, а, видно, що при замішуванні півводного сульфату кальцію $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ з водою початок тужавіння настає через 10 хв, а кінець тужавіння - через 15 хв. Міцність при стиску $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ через 2 год становить 5,7 МПа, через 1 та 28 діб міцність досягає 5,7 та 6,5 МПа відповідно (рис. 4.14, б).

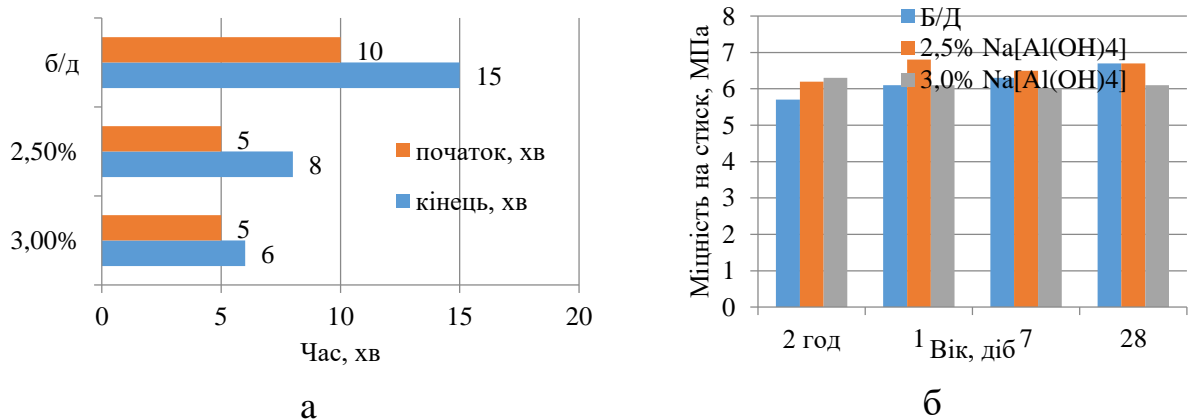


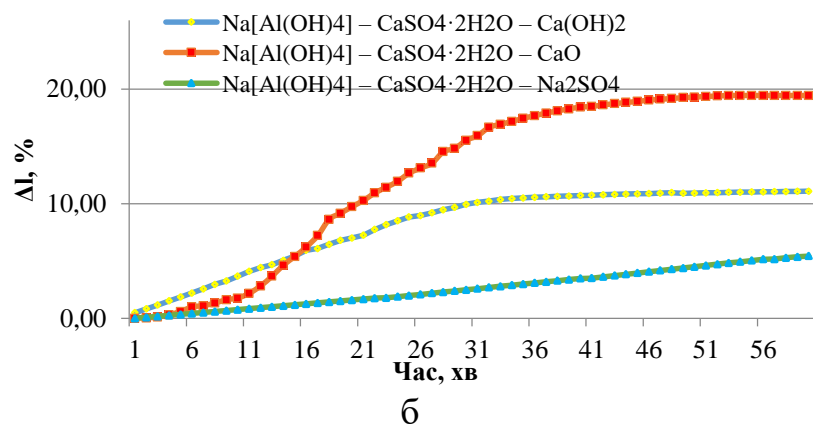
Рисунок 4.14 – Терміни тужавіння (а) та міцність (б) будівельного гіпсу з $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$

При введенні $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ в кількості 2,5 та 3,0 мас. % до складу $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ початок тужавіння скорочується на 5 хв, а кінець тужавіння – на 7 та 9 хв відповідно. При цьому через 2 год і 1 добу міцність збільшується до 6,2-6,8 МПа. В подальші терміни тверднення спостерігається спад міцності.

Проведено дослідження модельних алюмінійвмісних систем з сульфатвмісними добавками $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ та Na_2SO_4 . Встановлено, що при змішуванні двоводного сульфату кальцію з лужним прискорювачем $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ показник рН досягає 12,98 (В/В=0,5). Для модельної системи $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{CaO}$ показник рН становить 13,2, що свідчить про високе лужне середовище. Для встановлення інтенсивності проходження процесів структуроутворення досліджено деформації модельних систем (рис. 4.15, а). Для модельної системи з використанням гідроксиду кальцію $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{Ca}(\text{OH})_2$ об'ємні деформації досягли 11,0 % через 60 хв (рис. 4.15, б).



а



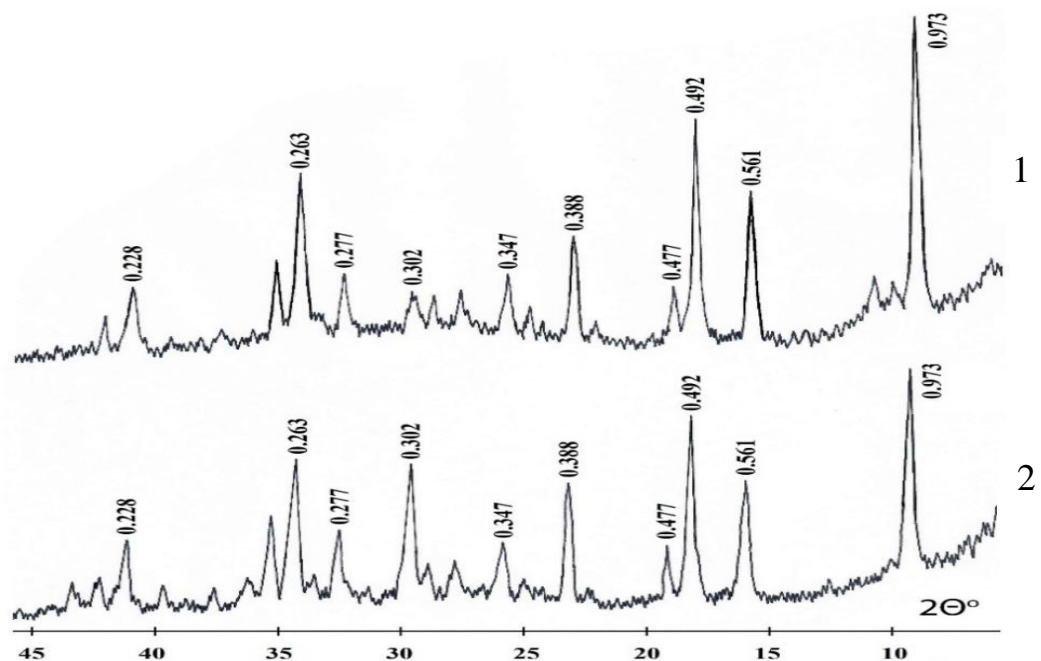
б

Рисунок 4.15 – Деформації розширення модельних систем: а – форма з компатором; б – деформації розширення

Для порівняльних досліджень в складі модельних систем використано сульфат натрію. Видно, що для модельної системи $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ (1,2:2,0:1,0) через 60 хв спостерігається незначне збільшення

об'ємних деформації – 5,4 %. Найбільша інтенсивність об'ємних деформацій - збільшення до 19,0 % через 60 хв спостерігається для модельної системи з додаванням негашеного вапна $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{CaO}$. Це в 3,5 рази більше порівняно із модельною системою $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ та в 1,6 рази більше порівняно із модельною системою $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{Ca}(\text{OH})_2$. Найбільш інтенсивно збільшення об'ємних деформації спостерігалось в інтервалі від 11,0 до 36,0 хв.

Згідно даних РФА (рис. 4.16) для розширної системи $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{CaO}$ фіксуються лінії гідроксиду кальцію ($d/n=0,493; 0,263$ нм) та незначні рефлекси гідроалюмінатів кальцію ($d/n=0,81$). При цьому відзначаються інтенсивні рефлекси еtringіту ($d/n=0,973; 0,561$ нм). Введення в систему 1,0 мас. % PCE призводить до сповільнення процесів раннього структуроутворення та зменшення інтенсивності гідросульфоалюмінату кальцію ($d/n=0,973; 0,561$ нм).



1 – $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{CaO}$; 2 – $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{PCE}$

Рисунок 4.16 – Дифрактограма модельних систем з добавкою негашеного вапна

Дані результати фізико-хімічних досліджень підтверджуються методом термогравіметричного аналізу. Встановлено, що загальні втрати маси модельної системи $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{CaO}$ складають 22%. На дериватограмі (рис. 4.17) фіксуються три ендоефекти: при температурі 100-130°, що вказують про втрати води з гідросульфоалюмінатів кальцію, двоводного сульфату кальцію; при температурі 410-440° свідчить про розклад гідроксиду кальцію; при температурі 690-750° - розклад гідрокарбоалюмінатів.

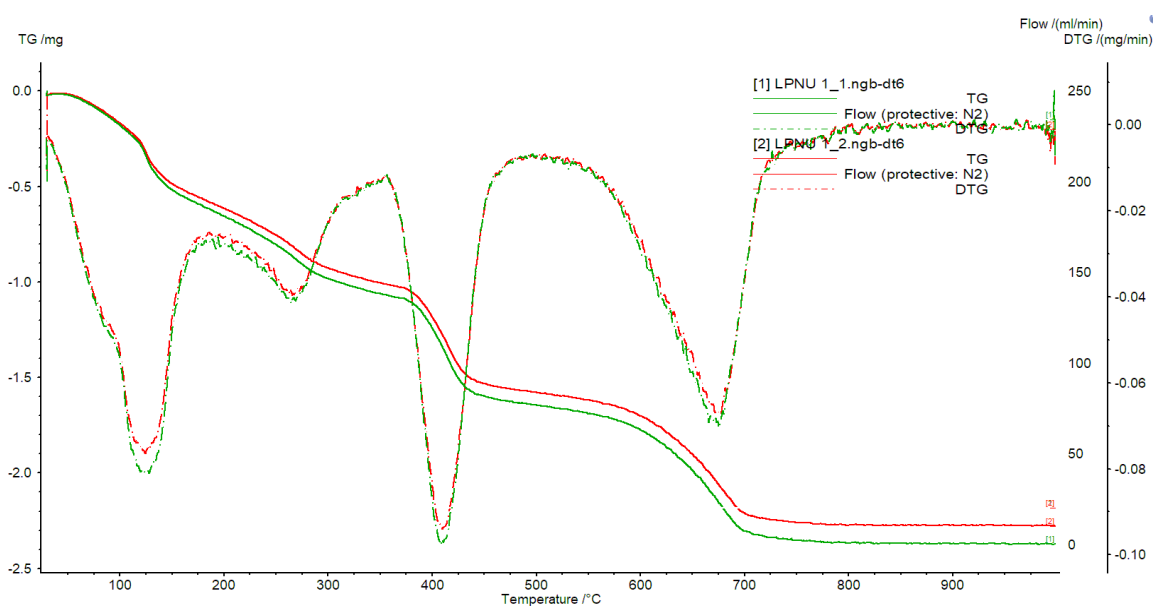


Рисунок 4.17 – Дериватограма лужної модельної системи $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{CaO}$

Для встановлення процесів інтенсивності утворення еtringіту досліджено модельні системи $\text{CaO} - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ та $\text{CaO} - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - \text{PCE}$ у співвідношенні компонентів 1:1. Згідно даних рентгенофазового аналізу (рис. 4.18, а) через 1 добу фіксуються лінії еtringіту ($d/n=0,973$; 0,561 нм) високої інтенсивності. Введення 1,0 мас. % PCE практично не впливає на інтенсивність утворення еtringіту.

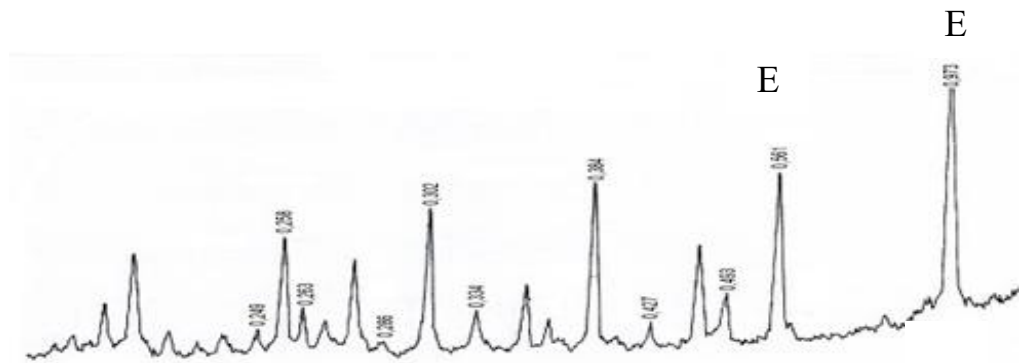
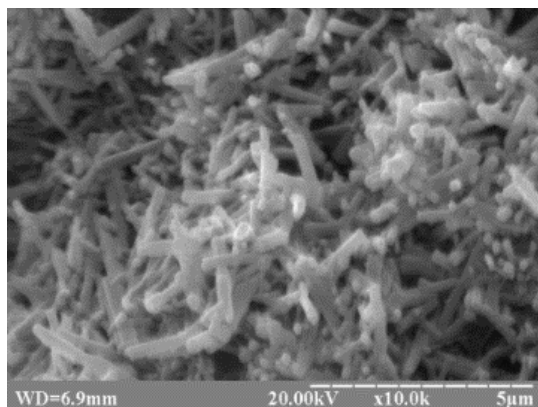
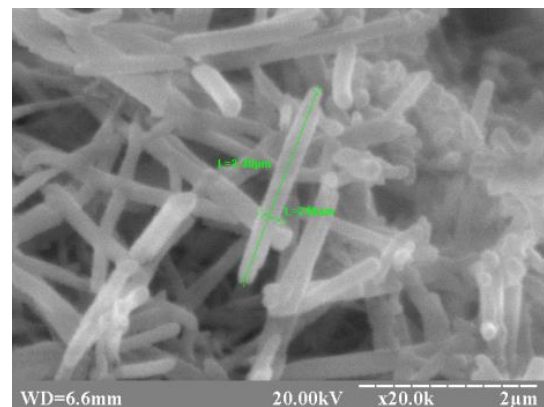


Рисунок 4.18 – Дифрактограма модельної системи $\text{CaO} + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ через 1 добу тверднення

Як видно з мікрофотографії (рис. 4.19, а, б) в штучному камені на основі $\text{CaO} + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{PCE}$ спостерігається утворення кристалів еtringіту. Взаємодія оксиду алюмінію із сульфатом кальцію призводить до формування кристалів еtringіту, а введення PCE дозволяє за рахунок явища адсорбційного модифікування отримати дрібнодисперсні кристали еtringіту, що забезпечують підвищену міцність на ранніх етапах тверднення за рахунок явища самоармування.



а



б

Рисунок 4.19 – Мікрофотографія штучного каменю через 1 добу тверднення:

а – $\text{CaO} + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; б – $\text{CaO} + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 1,0\% \text{PCE}$

Для аналізу процесів структуроутворення в подальших дослідженнях розглянуто модельні розширені системи на основі глиноземистого цементу типу ISTRА-40 (ГЦ). Встановлено, що глиноземистий цемент (тісто 1:0) для

досягнення НГТ характеризується водопотребою 25,0 %, при цьому початок тужавіння настає через 120 хв, а кінець - через 230 хв (табл. 4.13). При введенні в модельну систему на основі ГЦ 25,0 мас. % півводного сульфату кальцію та 25,0 мас. % оксиду кальцію значно підвищується водо-в'язуче відношення ($V/V=0,45$), терміни початку тужавіння скорочуються на 117 хв. При цьому міцність на стиск через 2, 7 та 28 діб становить 3,5, 11,7 та 26,8 МПа відповідно. Для модельної системи 50 % ГЦ+25 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + 25 % CaO V/V становить 0,45 та час початку тужавіння складає 3 хв. Міцність на стиск такої модельної системи через 2, 7 та 28 діб збільшується в 2,8; 3,9 та 1,4 рази та складає 13,8, 11,7 та 38,2 МПа порівняно з модельною системою на основі $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Введення в склад модельної системи 50 % ГЦ+25 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ +25 % CaO+1,0 мас. % PCE при рівній пластичності за рахунок водоредукуючого ефекту ($\Delta V/V = 30\%$) міцність через 2, 7 та 28 діб становить 27,6, 42,3 та 52,6 МПа, що вище на 53,3, 50,0 та 27,3 % відповідно.

Таблиця 4.13

Терміни тужавіння та міцність модельних систем
на основі глиноземистого цементу

№	Система	V/V	Терміни тужавіння, хв		Міцність на стиск, МПа, у віці, діб			
			поч	кін	1	2	7	28
1	ISTRA-40	0,25	120	230	105	-	-	120,0
2	50% ГЦ + 25% $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ + 25% CaO	0,45	3	5	2,5	3,5	11,7	26,8
3	50% ГЦ + 25% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + 25% CaO	0,45	5	7	7,0	13,8	25,6	38,2
4	50% ГЦ + 25% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + 25% CaO + PCE	0,30	5	10	15,0	27,6	42,3	52,6

Інтенсивні деформації розширення в модельній системі ГЦ - $\text{CaSO}_4 \cdot 2,0\text{H}_2\text{O}$ - CaO спостерігалися при замішуванні в'язучого з водою протягом однієї години. Як видно з рис. 4.20, об'єм модельної системи через

50-60 хв збільшився до 4,50 %. При введенні 1,0 мас. % РСЕ спостерігається незначне збільшення об'ємних деформацій системи - до 4,74%.

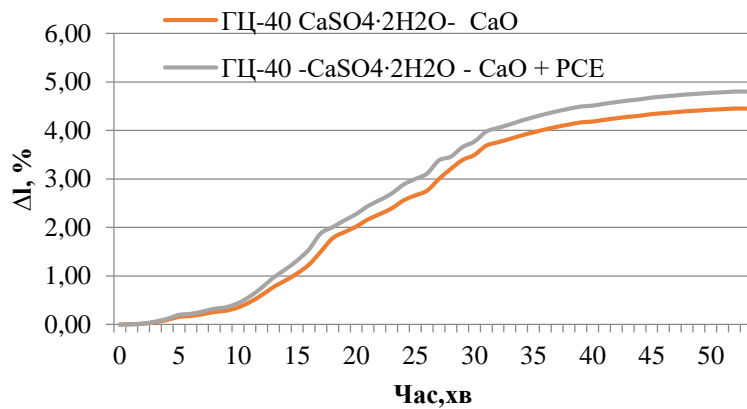


Рисунок 4.20 – Деформації розширення модельних систем на основі глиноземистого цементу

За допомогою пристрою УБ-40 визначали власні деформації на зразках - балочках розміром 20x20x160 мм в повітряно-сухих умовах. З рис. 4.21 видно, що від 1 до 4 доби спостерігаються інтенсивні деформації розширення модельної системи ГЦ–CaSO₄·2H₂O–CaO, які досягають значення 9,9 %. Показано, що деформації стабілізуються через 16 діб і зменшуються до 0,5 %. Введення в модельну систему полікарбоксилатного суперпластифікатора ГЦ–CaSO₄·2H₂O–CaO–РСЕ призводить до інтенсивності процесів раннього структуроутворення – об'ємні деформації спостерігаються до 3 діб, при цьому деформації стабілізуються вже через 11-12 діб тверднення та складають 4,8 %.

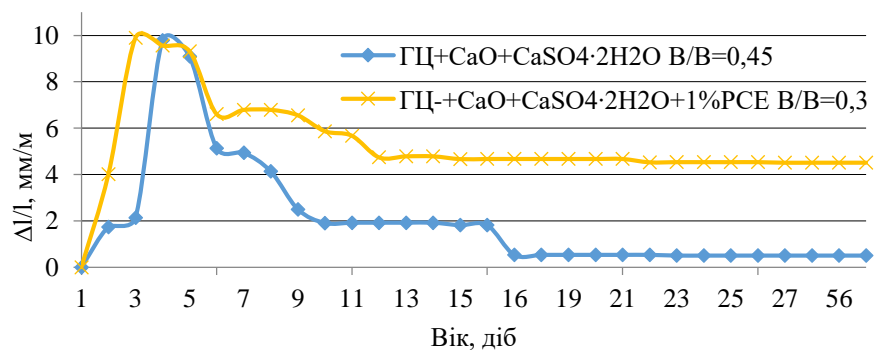
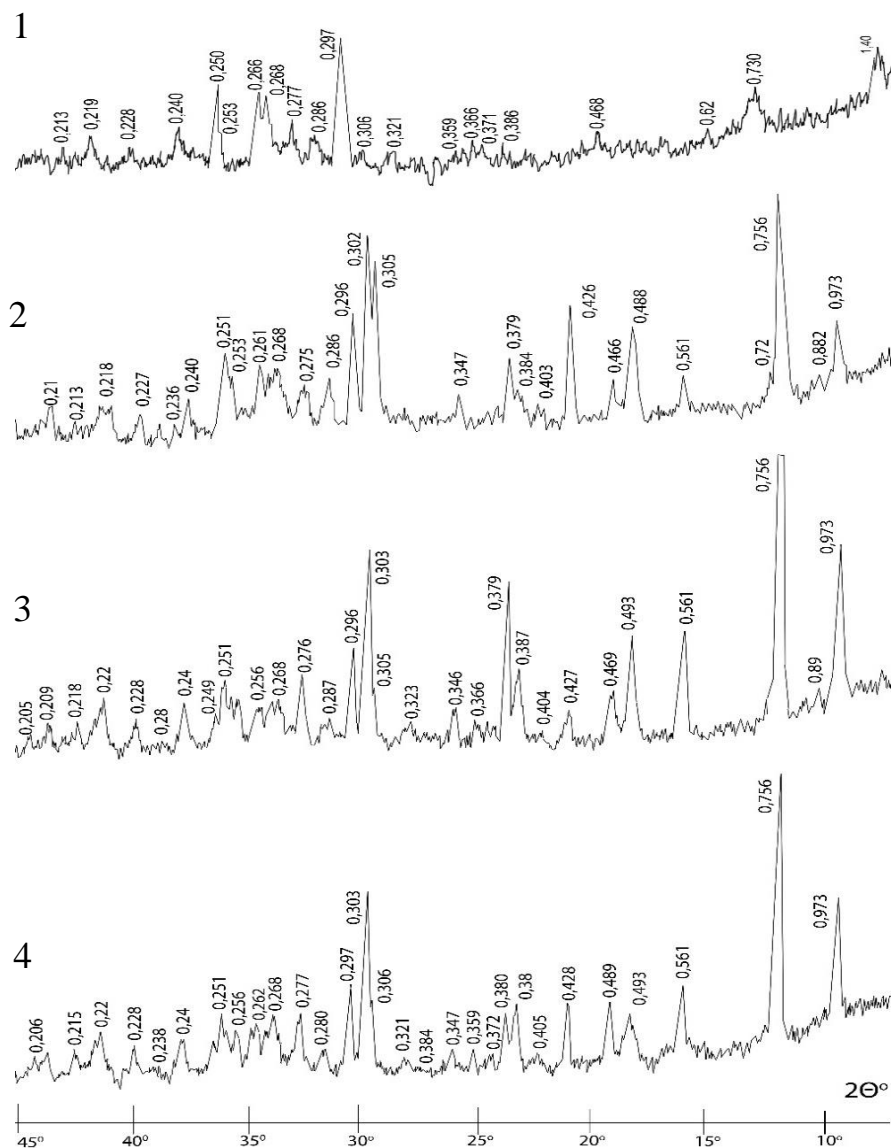


Рисунок 4.21 – Власні деформації модельних систем на основі глиноземистого цементу в повітряно-сухих умовах

Згідно даних рентгенофазового аналізу (рис. 4.22) основною гідратною фазою є гідросульфоалюмінат кальцію - еtringіт ($d/n=0,973$; $0,561$ нм), що призводить до збільшення об'єму системи. Показано, що лінії еtringіту найбільш інтенсивно утворюються в зразках на основі ГЦ + $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ + CaO та ГЦ + $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ + CaO + ПСЕ. Слід відзначити, що в модельних системах найбільш інтенсивно проявляється рефлекс двоводного сульфату кальцію ($d/n=0,756$).



1 – ГЦ – 40; 2 – ГЦ + $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ + CaO ; 3 – ГЦ + $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ + CaO ;
4 – ГЦ + $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ + CaO + ПСЕ

Рисунок 4.22 – Дифрактограма модельних систем на основі глиноземистого цементу

Метод растрової електронної мікроскопії доповнює дані про структуру модельних систем на основі глиноземистого цементу. Як видно з рис. 4.23, а, мікроструктура глиноземистого цементу характеризується гетерогенністю, спостерігається незначна кількість гелеподібних продуктів гідратації поруч із кристалізованими гідратними фазами.

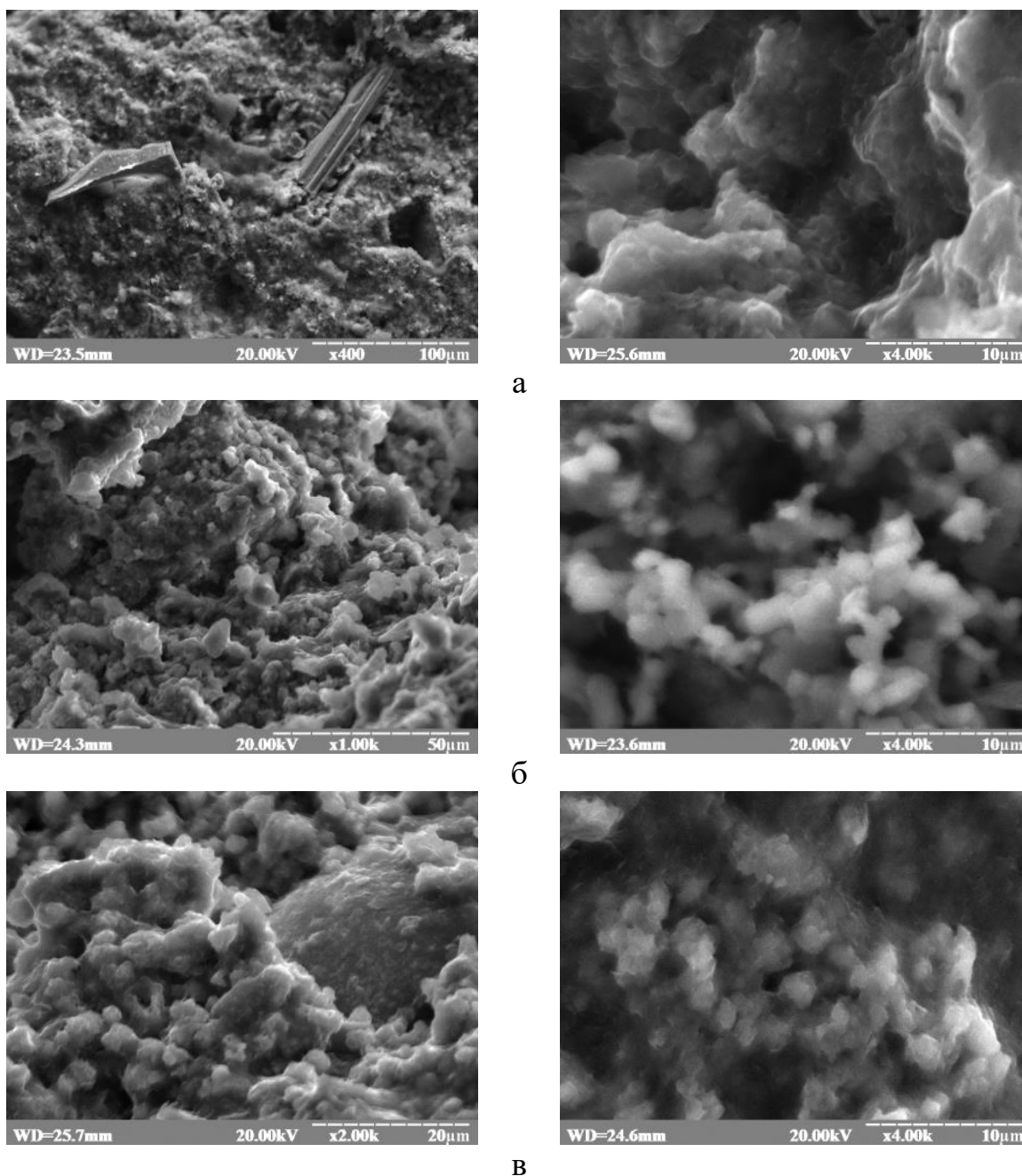


Рисунок 4.23 – Мікрофотографія модельних систем на основі глиноземистого цементу ISTRА-40 : а – ГЦ – 40; б – ГЦ + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO ; в – ГЦ + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + PCE

Використання негашеного вапна та двоводного сульфату кальцію (рис. 4.23, б) призводить до утворення більшої кількості центрів кристалізації, що в ранньому віці створює внутрішні напруження і призводить до збільшення об'єму системи. Введення PCE в модельну систему ГЦ + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + PCE за рахунок явища адсорбційного модифікування дозволяє зменшити розмір кристалів еtringіту. При цьому швидке накопичення дрібнодисперсних, стабільно існуючих кристалів еtringіту в наступні періоди тверднення сприяє їх інтенсивному зрощенню, значному збільшенню щільності та непроникності цементного каменю.

На даний час глиноземистий цемент в Україні не виробляється, що підвищує вартість ремонтних сумішей на його основі. У зв'язку з цим, для подальших досліджень проведено заміну глиноземистого цементу на портландцементи загальнобудівельного призначення з одночасним використанням лужного алюмінійвмісного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$, а також золи-винесення. Досліджено деформації модельних систем на основі портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R та портландцементу СЕМ II/A-S 42,5 R у формі з металевих набірних кілець та компаратором. З рис. 4.24 видно, що найбільшими деформаціями розширення характеризуються модельна система СЕМ II/A-LL 42,5R - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – CaO – $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ (В/Ц=0,50). Деформації складають через 8 год - 5,3 % та через 15 год - 5,9 %.

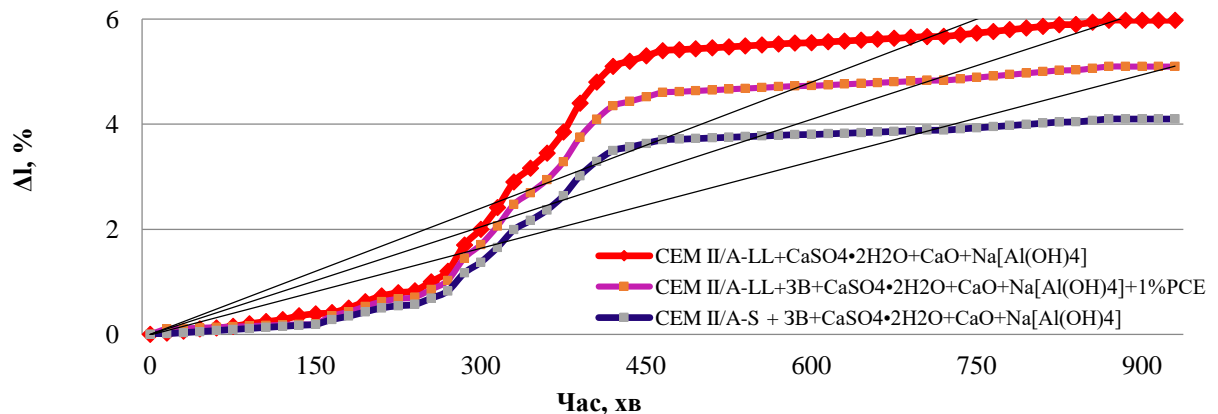


Рисунок 4.24 – Деформації розширення в модельних систем

Для модельної системи на основі СЕМ II/A-S 42,5R і з добавкою 5,0 мас. % золи-винесення СЕМ II/A-S 42,5 R - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – CaO – $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ – ЗВ деформації розширення є менші та складають через 8 год - 3,5 %, а через 15 год - 4,1 %. При введенні в систему СЕМ II/A-LL 42,5R - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – CaO – $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ – ЗВ полікарбоксилатного суперпластифікатора при досягненні рівної рухливості ($V/V = 0,4$), деформації розширення досягли через 8 год - 4,3 %, через 15 год - 5,1 %.

Дослідженнями деформацій з використанням пристрою УБ-40 (зразки - балочки 20x20x160 мм) показано (рис. 4.25, а), що для модельної системи СЕМ II/A-LL 42,5 R – CaO – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – ЗВ – $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ інтенсивні деформації розширення ($\Delta l/l = 8,0$ мм/м) спостерігали від 1 до 8 доби при зберіганні в ексикаторі. Введення в модельну систему СЕМ II/A-LL – CaO – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – ЗВ – $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ PCE дозволяє стабілізувати інтенсивність деформацій системи ($\Delta l/l = 1,5$ мм/м через 11 – 56 діб тверднення).

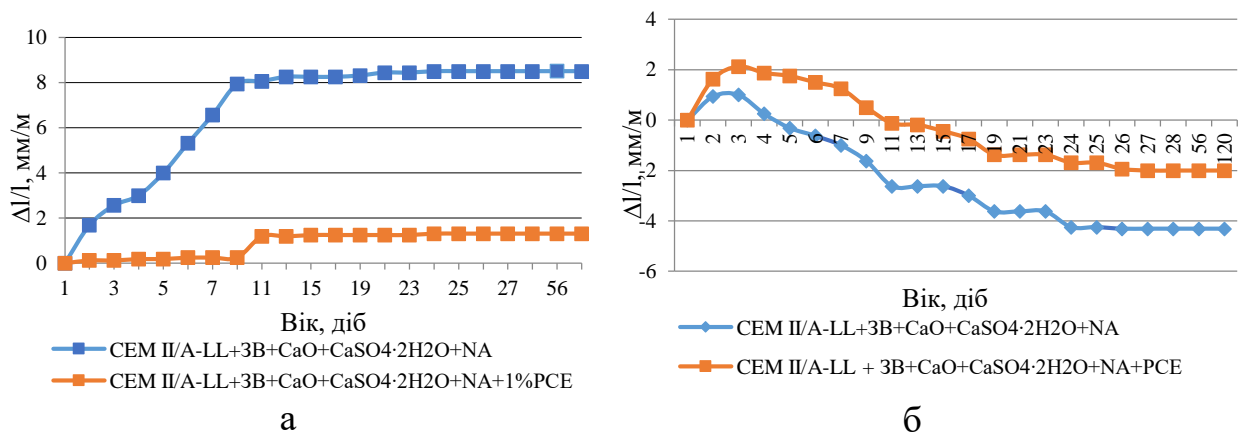


Рисунок 4.25 – Власні деформації каменю на основі СЕМ II/A-LL 42,5R: а – в ексикаторі; б – в повітряно-сухих умовах

З рис. 4.25, б, видно, що найбільші деформації розширення модельної системи СЕМ II/A-LL 42,5 R – CaO – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – ЗВ – $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ в повітряно-сухих умовах досягли через 2 доби і складають 2,1 мм/м. Показано, що об'ємні деформації зменшуються та переходять в усадочні через 24 доби і складають 4,2 мм/м. Введення в модельну систему СЕМ II/A-LL – CaO –

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 3\text{B} - \text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ PCE дозволяє стабілізувати та зменшити деформації системи. Так, деформації розширення спостерігали до 3 доби тверднення та досягають 1,2 мм/м. Показано, що деформації зменшуються і стабілізуються через 28 діб.

Показано, що втрати маси в ексикаторі для модельної системи СЕМ II/A-LL- CaO- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 3\text{B} - \text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ є більш інтенсивними і відбувалася від 4 до 8 доби та складають 2,0 % і далі стабілізуються (рис. 4.26, а). В той же час, втрата маси в модифікованому камені з суперпластифікатором PCE при $\text{B/B}=0,4$ є більш стабільними і проходять в період 12 діб тверднення і досягають 1,9 %. З рис. 4.26, б, видно що втрати маси каменю на основі системи СЕМ II/A-LL- $\text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 3\text{B} - \text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ в повітряно-сухих умовах є більш інтенсивними протягом 14 діб та складають 4,0 %. В той же час, втрата маси модифікованого каменю на основі системи відбуваються в період 15 діб тверднення і досягають 3,4 %.

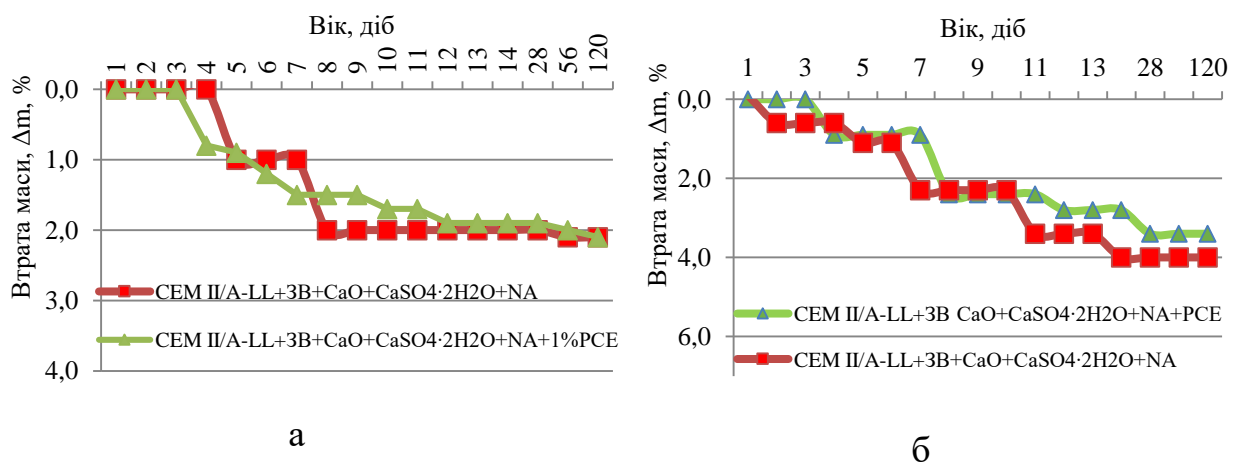


Рисунок 4.26 – Втрати маси каменю в модельних системах на основі СЕМ II/A-LL: а – в ексикаторі; б – в повітряно-сухих умовах

Таким чином, на основі результатів досліджень модельних систем розроблено комплексну розширну добавку (КРД) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$, яка забезпечує одержання необхідних деформацій розширення,

залежно від вмісту компонентів і умов тверднення. Введення полікарбоксилатного суперпластифікатора дозволяє стабілізувати інтенсивність розширення модельних систем за рахунок керованого утворення еtringіту, що відкриває можливості для одержання покращених експлуатаційних властивостей ремонтних сумішей.

4.5. Технологічні та експлуатаційні властивості ремонтних сумішей

Надзвичайно важливим для ремонтних розширних сумішей є забезпечення технологічних та експлуатаційних властивостей в процесі збільшення їх об'єму. Для подальших досліджень застосовано комплексну розширну добавку (КРД) $\text{CaO}-\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}-\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ (співвідношення 1,0:2,0:1,2). Комплексну розширну добавку вводили у кількості 10, 20 та 30 мас.%. Дослідження впливу добавки проводили для ремонтних сумішей на основі портландцементів СЕМ І 42,5 R та СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R (Ц:П=1:2). Так, для ремонтної суміші на основі СЕМ І 42,5 R рухливість складала РК = 140 – 145 мм (глибина занурення еталонного конуса – 6-7 см), що відповідає марці за рухливістю П8. Для суміші без добавок В/Ц становить 0,37, початок та кінець тужавіння досягав 200 та 240 хв відповідно (рис. 4.27, а). При введенні 10,0 мас. % КРД В/Ц збільшилося на 19,5% до 0,46, а терміни початку тужавіння скорочуються на 20 хв. При введенні 20 мас. % КРД водопотреба збільшується на 28,8 %, а терміни початку тужавіння скорочуються на 80 хв. Введення 30 мас. % КРД призводить до збільшення В/Ц на 31,5 % до 0,54, при цьому терміни початку тужавіння скорочуються на 150 хв (до 50 хв) (рис. 4.27, б).

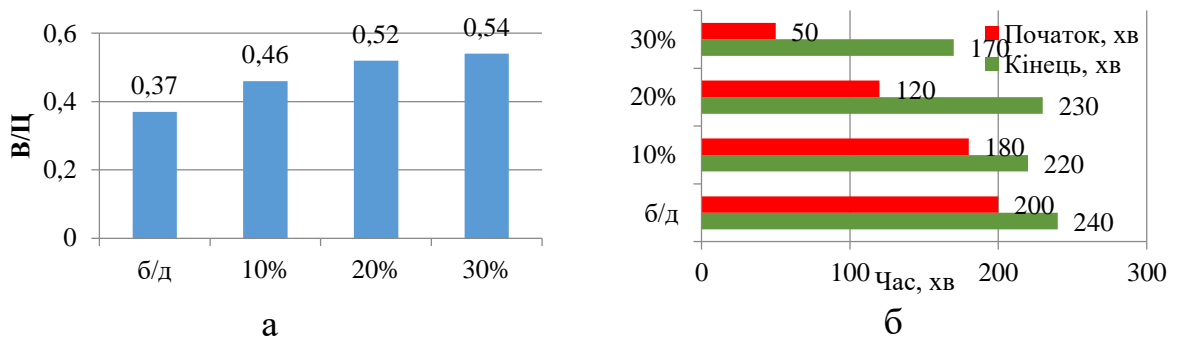


Рисунок 4.27 – Водо-цементне відношення (а) та терміни тужавіння (б) ремонтної суміші з добавкою КРД

Міцність при стиску ремонтних сумішей із введенням КРД знижується у всі терміни тверднення. Так, міцність при стиску ремонтної суміші на основі СЕМ І 42,5 R (Ц:П=1:2, В/Ц = 0,37) через 1, 2, та 28 діб становить 18,2; 40,0 та 68,0 МПа відповідно. Для складу з вмістом 10,0 мас. % КРД спостерігається незначне зниження міцності для всіх складів до 17-14 МПа. При цьому через 2, 7 та 28 діб міцність на стиск знижується для всіх складів. Так, для складу з вмістом 20,0 мас. % КРД міцність знижується до 25,2, 33,6 та 40,0 МПа відповідно, що на 37,0; 41,0 та 42,0 % менше порівняно з ремонтною сумішшю без добавок; для складу з вмістом 30,0 мас. % КРД міцність становить 19,6; 26,0 та 34,0 МПа, що на 51,0 %, 54,0 % та 50,0 % менше порівняно з складом без добавок (рис. 4.28, а).

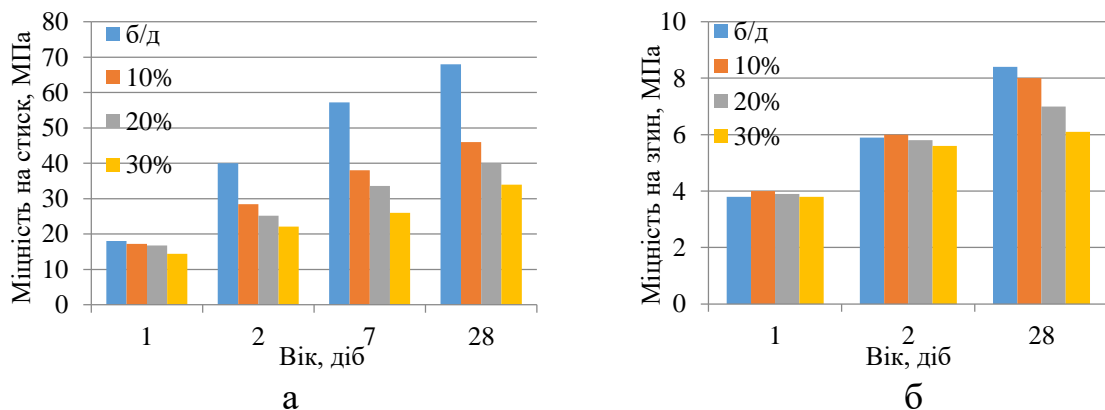


Рисунок 4.28 – Міцність ремонтної суміші: а – при стиску; б – при згині

В той же час, при введенні 10-20 мас. % КРД міцність при згині через 1 та 2 доби дещо зростає і становить 3,8 – 3,9 МПа та 5,9 - 5,8 МПа відповідно (рис. 4.28, б).

Також досліджено вплив КРД на властивості ремонтних сумішей з портландцементом СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R. Показано, що для досягнення РК = 140 – 145 мм В/Ц становить 0,37, початок та кінець тужавіння складає 200 та 275 хв відповідно (рис. 4.29, а). При введенні КРД в кількості 10 мас. % В/Ц збільшилося на 22,9%, а терміни початку тужавіння скоротилися на 10 хв. При введенні 20 мас. % КРД водопотреба збільшується на 28,8 % до 0,52, а терміни початку тужавіння скорочуються на 95 хв. Введення 30 мас. % КРД збільшує В/Ц на 34,0 % до 0,56, а терміни початку тужавіння скорочуються на 150 хв (рис. 4.29, б).

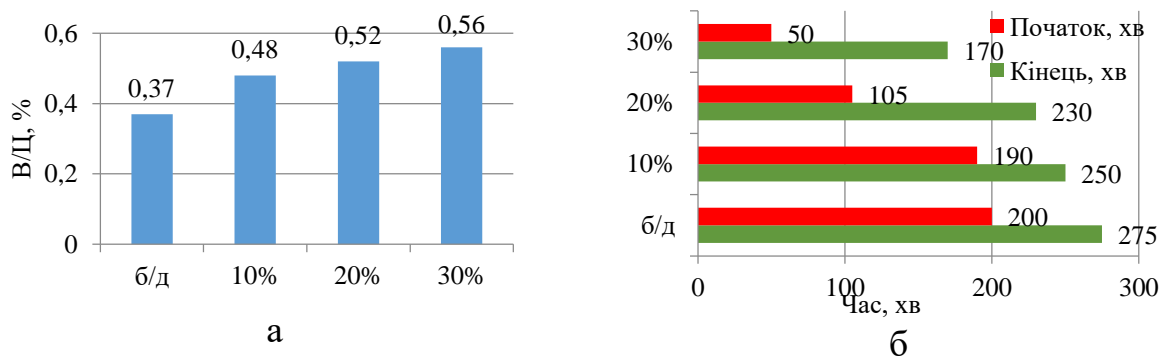


Рисунок 4.29 – Водо-цементне відношення (а) та терміни тужавіння (б) ремонтних розширних сумішей на основі СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при В/Ц = 0,37 розплив ремонтної суміші становить 145 мм. При введенні 10,0 мас.% КРД розплив конуса збільшився до 152 мм, при введенні 20,0 та 30,0 мас. % КРД розплив конуса зменшився до 142 мм та до 130 мм (рис. 3.30, а). При введенні КРД в кількості 10,0 мас.% до ремонтної суміші спостерігається інтенсивне зниження кінетики рухливості в інтервалі від 5,0 до 15,0 хв. При збільшенні кількості КРД в суміші до 20,0 – 30,0 мас. % рухливість зменшується в інтервалі від 5,0 до 10,0 хв (рис. 4.30, б).

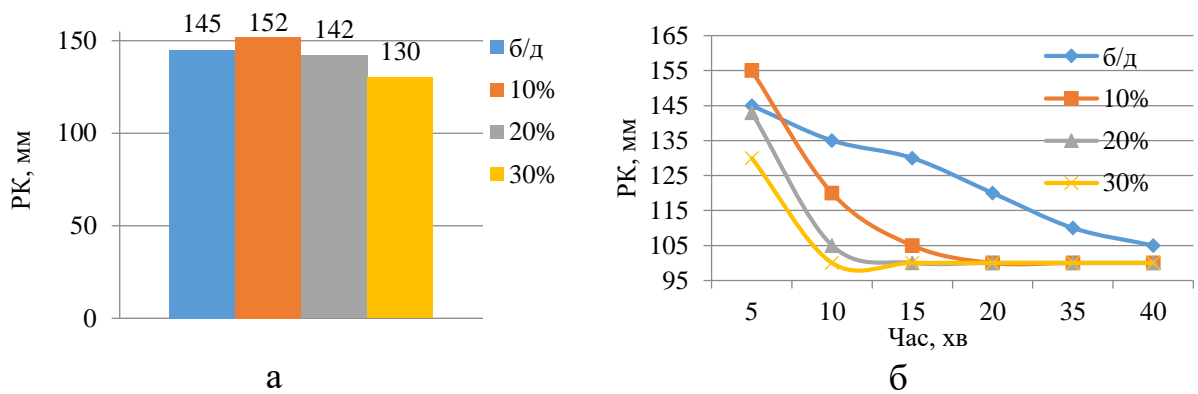


Рисунок 4.30 – Рухливість (а) та кінетика зміни рухливості (б) ремонтної розширної суміші

Встановлено, що міцність при стиску ремонтної суміші через 1, 2 та 28 діб тверднення становить 19,2, 41,2 та 64,0 МПа. При введенні 10, 20, 30 мас. % КРД міцність знижується у всі терміни тверднення. В той же час, відповідає вимогам щодо міцності ремонтних розчинів (рис. 4.31, а). Для ремонтної розширної суміші із вмістом 10-30 мас. % КРД міцність при згині через 1 та 2 діб є рівна значенням міцності суміші без добавок і складає 3,8 МПа (рис. 4.31, б).

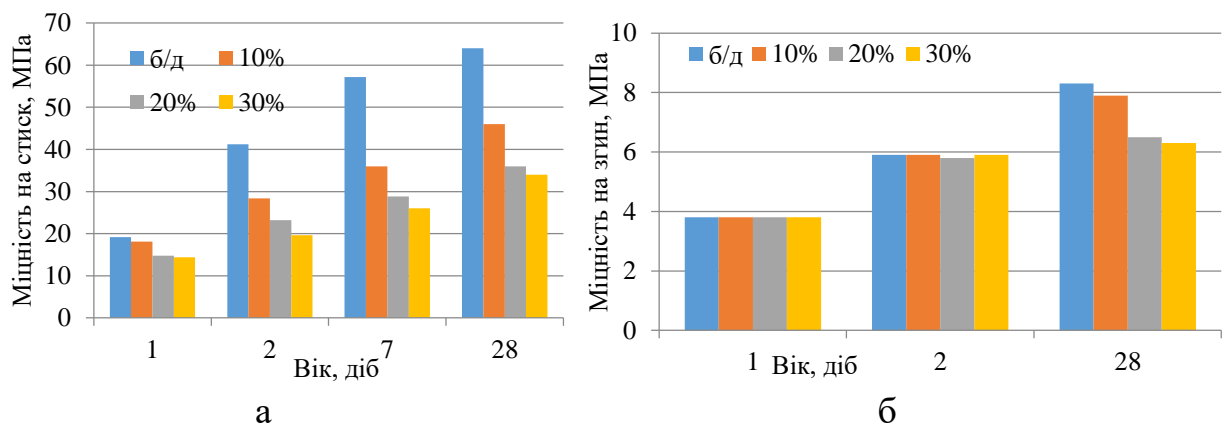


Рисунок 4.31 – Міцність ремонтної розширної суміші на основі СЕМ П/А-LL 42,5R при стиску (а) та при згині (б)

Для визначення міцності при стиску ремонтної суміші на основі СЕМ П/А-LL 42,5 R та з 20 мас. % КРД в обмеженому просторі, розчин тверднув в нормальних умовах у металевій формі 40x40x160 мм. Для порівняння наведено міцність зразків при стиску, що були розформовані та зберігалися в

нормальних умовах тверднення. Встановлено, що міцність на стиск зразків що тверднули в металевій формі через 2 доби становить 26,0 МПа, що на 11,5 % більше від міцності зразків, що зберігалися в нормальних умовах тверднення (рис. 4.32, а). Через 7 діб міцність суміші збільшилася до 12,5 %, а через 28 діб – склала 49,2 МПа, що на 18 - 23,0 % вище від міцності зразків, що зберігалися в нормальних умовах тверднення. Показано, що міцність при згині через 2 доби для зразків, що тверднули в формі становить 5,7 МПа, що на 8,7 % більше зразків, що тверділи в нормальних умовах. Через 7 і 28 діб міцність збільшилася на 1,4 % (рис. 4.32, б). Таким чином, тверднення розширних ремонтних сумішей в обмежених умовах призводить до збільшення стандартної міцності на 18 - 23 %.

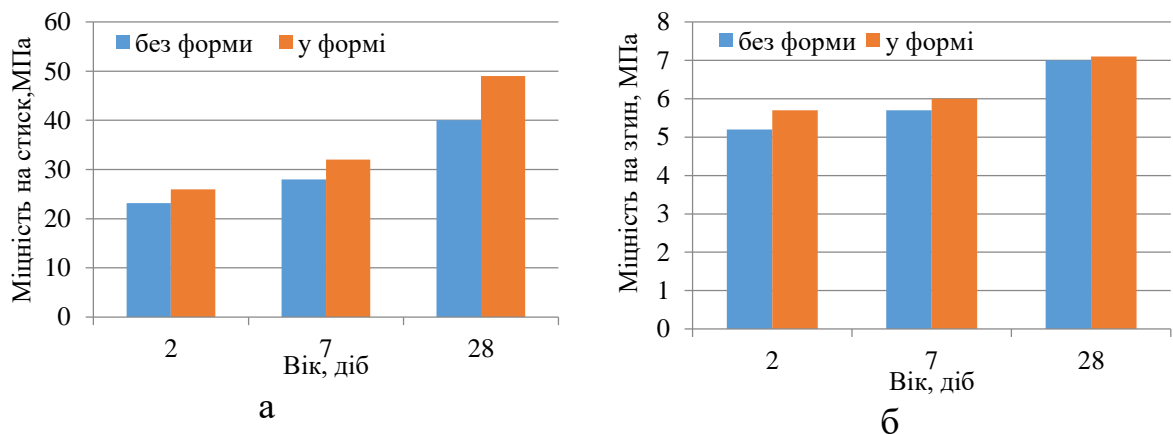


Рисунок 4.32 – Міцність при стиску (а) та міцність при згині (б) ремонтних розширних сумішей з 20 мас.% КРД

Дослідженнями показано, що введення 1,0 мас. % РСЕ в розширну ремонтну суміш дозволило знизити В/Ц розчину на 0,33 – 0,4, що сприяє зростанню міцності на стиск та згин у всі терміни тверднення порівняно з ремонтною сумішшю без РСЕ (рис. 4.28, а). Так, міцність на стиск ремонтної суміші на основі СЕМ І 42,5 R з РСЕ при введенні 10 – 30 мас. % КРД через 8 год міцність становить 3,2 та 2,4 МПа, через 1 добу міцність зростає до 32,0, 24,4 та 20,0 МПа, що на 43,7 – 28,0 % вище порівняно ремонтною сумішшю без РСЕ. Через 28 діб тверднення міцність ремонтної суміші з РСЕ становить

57,6; 46,2 та 41,0 МПа, що на 20,1 – 17,1 % вище порівняно ремонтною сумішшю без РСЕ. Так, введення РСЕ дозволяє підвищити стандартну міцність ремонтних сумішей (табл. 4.14).

Таблиця 4.14

Міцність модифікованих ремонтних сумішей

Вміст добавок	В/Ц	Міцність на стиск/згин, МПа				
		8 год	1	3	7	28
10% КРД + 1,0% РСЕ	0,33	3,2/0,9	32,0	42,0/6,8	51,2	57,6/8,2
20% КРД + 1,0% РСЕ	0,38	2,4/0,8	24,4	33,6/5,9	37,3	46,2/6,2
30% КРД + 1,0% РСЕ	0,40	2,4/0,7	20,0	26,0/4,2	36,8	41,0/5,8

Досліджено власні деформації розширення ремонтних сумішей (зразки 20x20x160 мм), які тверднули 7 діб у воді, після цього зразки тверднули в повітряно-сухих умовах. З рис. 4.33, видно, що найбільш інтенсивні деформації розширення відбувалися в ремонтних сумішах із вмістом 30 мас. % КРД в перші 7 діб, які досягли 1,7 мм/м. Показано, що деформації розширення стабілізуються через 18 діб в повітряно-сухих умовах і складають 1,1-1,2 мм/м. Найнижчими деформаціями характеризується суміш з 20 мас. % КРД + РСЕ – через 7 діб тверднення – деформації розширення досягли 0,5 мм/м і стабілізуються через 18 діб та складають 0,1 мм/м (рис. 4.33).

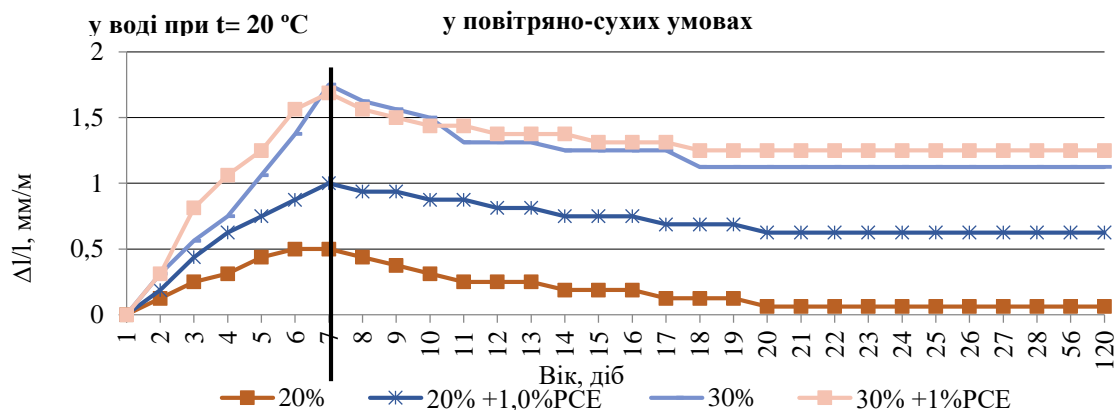


Рисунок 4.33 – Власні деформації ремонтних розширних сумішей

Показано, що найбільші втрати маси спостерігаються в розширних ремонтних сумішах з 30,0 мас. % КРД у повітряно-сухих умовах протягом 7 – 18 доби тверднення та складають 4,0 мас. %. Найменшими втратами маси ($\Delta m = 1,2\%$) характеризується суміш з вмістом 20,0 мас. % КРД і 1,0 мас. % РСЕ (рис. 4.34).

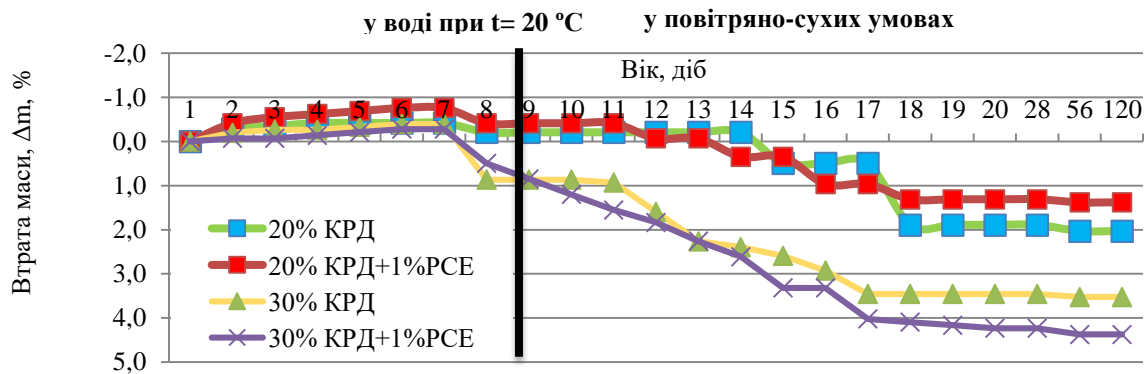


Рисунок 4.34 – Втрати маси ремонтних розширних сумішей

Проведено порівняльні дослідження деформації ремонтних сумішей на основі портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5R які тверділи в повітряно-сухих умовах. Показано, що об'ємні деформації характерні для ремонтної розширної суміші з добавкою 20,0 мас. % КРД + 1,0 мас. % РСЕ. Тоді як для суміші без добавок спостерігаються деформації усадки, які через 28 діб тверднення складають 0,25 мм/м (рис. 4.35).

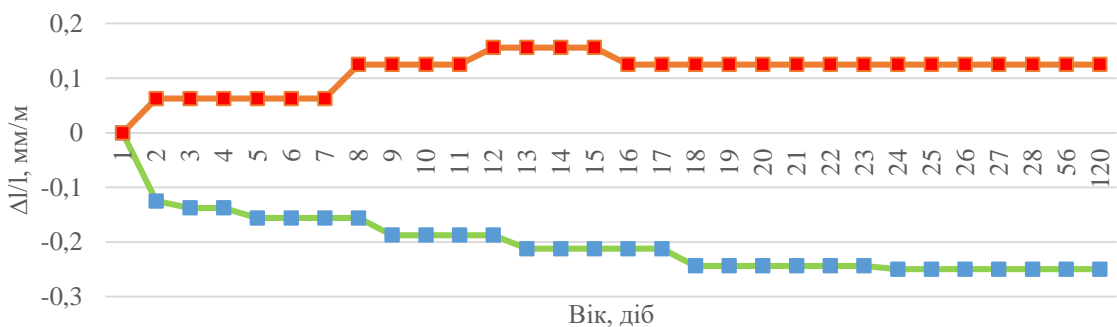


Рисунок 4.35 – Власні деформації ремонтних сумішей в повітряно-сухих умовах

Показано, що найбільші втрати маси для ремонтної суміші відбуваються в період перших 4 діб тверднення та складають 7,5 %. Втрати

маси в розширній ремонтній суміші із введення 20 мас. % та 1,0 мас. % РСЕ відбувалися протягом 9 діб, що в 1,5 рази менше порівняно із складом без добавок (рис. 4.36, а). Досліджено зміни температури ремонтної суміші на основі портландцементу СЕМ ІІ/А-LL 42,5R (Ц:П=1:2) в процесі тверднення. Встановлено, що найвища температура ($t=51,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) досягається через 480 хв для розширної ремонтної суміші з добавкою КРД 20 мас. % (рис. 4.36, б).

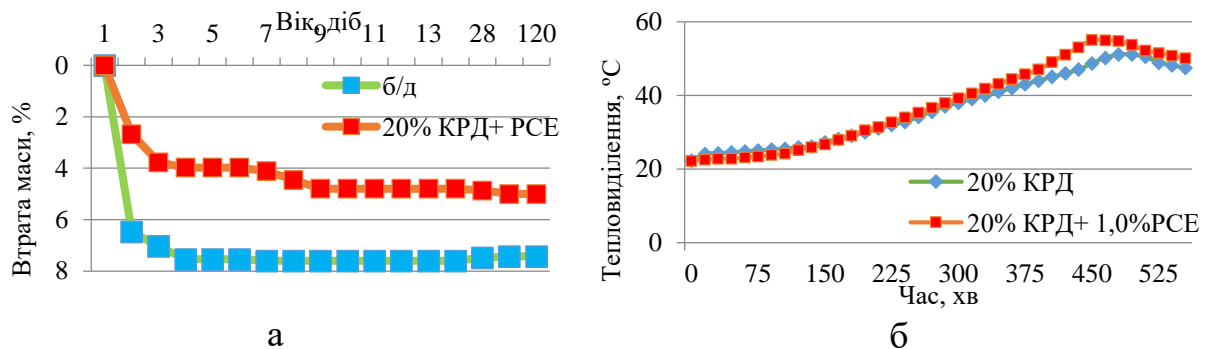


Рисунок 4.36 – Втрати маси розширної суміші на основі СЕМ ІІ/А-LL 42,5R в повітряно-сухих умовах (а) та зміна температури розчину (б)

Як видно з табл. 4.15, для ремонтної розширної суміші на основі СЕМ ІІ/А-LL 42,5R з 20,0 мас. % КРД +1,0 мас. % РСЕ через 28 діб водопоглинання зменшується в 1,9 рази порівняно із ремонтною сумішшю без РСЕ. Введення РСЕ дозволяє регулювати пористість та водопоглинання ремонтної суміші, коефіцієнт середнього розміру пор λ зменшується в 1,2 рази. При цьому коефіцієнт однорідності α зменшується до 0,5 (табл. 4.15).

Таблиця 4.15

Пористість, водопоглинання ремонтних розширних сумішей

Вміст добавки, мас. %	В/Ц	Водопоглинання, W_m , %	Пористість, %		λ	α
			Відкрита	Закрита		
20,0 % КРД	0,52	9,4	14,6	5,3	0,55	0,6
20,0 % КРД + 1,0 % РСЕ	0,46	4,8	9,2	4,4	0,40	0,5

Показники якості ремонтної розширної суміші (20,0 мас. % КРД) (РРС) та модифікованої розширної ремонтної суміші (20,0 мас. % КРД+РСЕ) (МРРС) наведено в табл. 4.16. Модифіковані ремонтні розширні суміші на основі лужного портландцементу характеризуються високою міцністю, тріщиностійкістю ($K_c=0,18$), водонепроникністю (W14), міцністю зчеплення з основою (3,0 МПа). Лінійне розширення модифікованої ремонтної суміші складає 0,12 мм/м (0,14 %), що дозволяє її віднести до розширної.

Таблиця 4.16

Показники якості ремонтних розширних сумішей на основі лужного портландцементу

Показник	Значення		
	РРС	МРРС	
В/Ц	0,52	0,46	
Середня густина, кг/ м ³	2043	2240	
Початок тужавіння, хв	105	90	
Кінець тужавіння, хв	230	210	
Розплив конуса, мм	142	145	
Міцність зчеплення з основою, МПа	2,5	3,0	
Міцність на стиск, МПа, у віці діб	14 год	3,4	4,2
	1	14,8	16,1
	2	26,0	30,2
	28	49,0	55,0
Деформації розширення, мм/м	0,62	0,12	
Пористість, %	19,9	13,6	
Марка за водонепроникністю	W14	W14	

Для захисту та відновлення бетонних та залізобетонних конструкцій від впливу агресивних середовищ, у тому числі ґрунтових вод досліджено гідроізоляційні ремонтні суміші на основі модифікованого лужного композиційного портландцементу. Для підвищення воднепроникності та покращення експлуатаційних властивостей гідроізоляційних ремонтних сумішей застосовано гідрофобізуючу нанорідину з вмістом високоактивних наночастинок Al_2O_3 . Дослідженнями встановлено, що оптимальна область введення нанорідини знаходиться в межах 0,6...0,8 мас. % [113].

Методом дефектоскопії за допомогою трубки Карстена визначено водопоглинання гідроізоляційних ремонтних сумішей, модифікованих гідрофобною нанорідиною (В/Ц = 0,31; Ц:П = 1:2). Так, після 4 год витримки-падіння водяний стовпчик зменшився на 4 поділки до 0,04 мл/см² (рис. 4.37, а-в), що свідчить про понижене водопоглинання гідроізоляційних ремонтних сумішей.

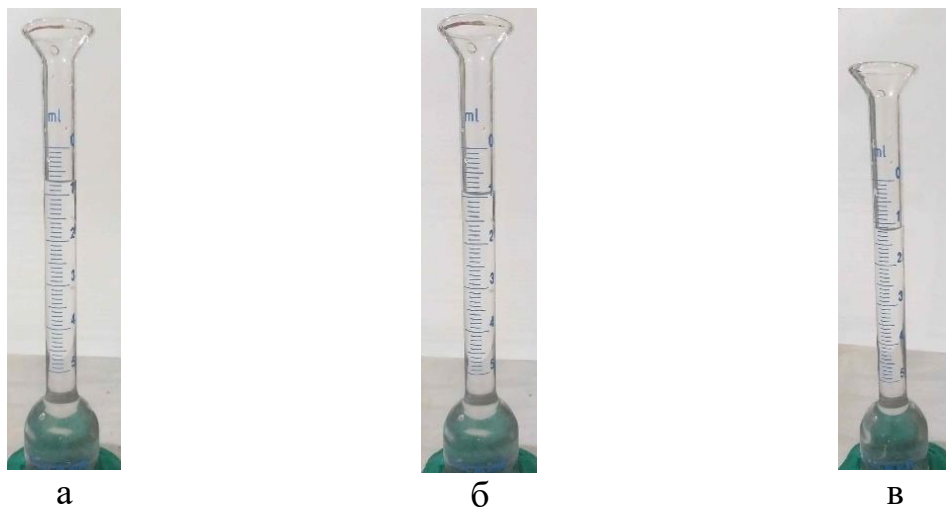


Рисунок 4.37 – Визначення водопоглинання з використанням трубки Карстена: а – через 15 хв; б – через 2 год; в – через 4 год

Здійснено дослідження водонепроникності ремонтної суміші на основі лужного портландцементу з введенням нано-рідини в кількості 0,5 мас. % (рис. 4.37). Водонепроникнення визначали згідно EN 12390-8 за максимальною

глибиною проникнення води під тиском в зразок ремонтної суміші (150x150x150 мм) через 28 діб тверднення в нормальних умовах. На зразок протягом 72 год подавався тиск води 0,5 МПа (рис. 4.38).

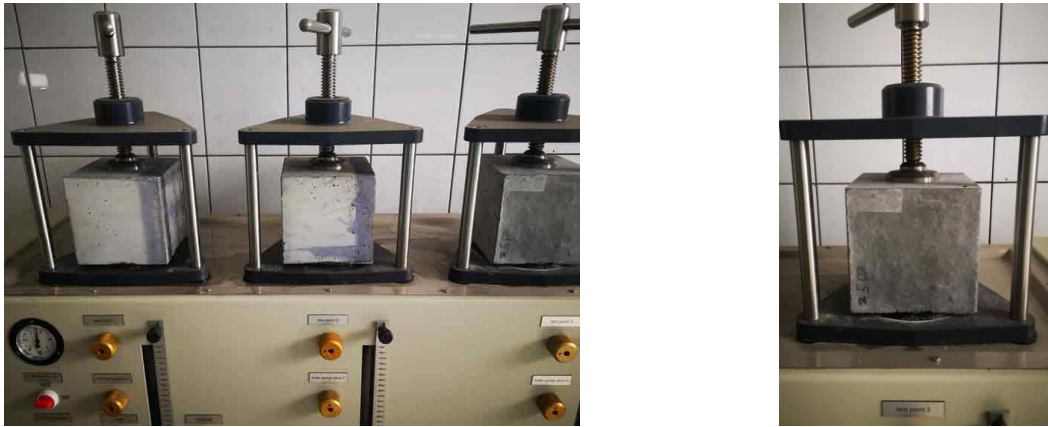


Рисунок 4.38 – Визначення водонепроникності ремонтної суміші з нанорідиною згідно EN 12390-8

З табл. 4.17 видно, що модифіковані гідроізоляційні розчини з добавкою нанорідини 0,5-0,8 мас. % (марка за рухливістю П8) характеризуються термінами початку тужавіння 100-80 хв, міцністю при стиску через 1 добу 13,4 – 14,2 МПа та проектною міцністю 56,2-57,3 МПа. При цьому досягається марка за водонепроникністю W16.

Таблиця 4.17

Показники якості гідроізоляційних ремонтних сумішей

Вміст нанорідини (Al ₂ O ₃), мас. %	В/Ц	Терміни тужавіння, хв		Міцність при стиску, МПа, у віці, діб		Марка за водонепроникністю, W
		поч.	кін.	1	28	
0,5	0,39	100	160	13,4	56,2	16
0,8	0,37	80	140	14,2	57,3	16

Введення нанорідини в ремонтну суміш на основі лужного портландцементу збільшує вміст розчинного Al₂O₃ і дозволяє інтенсифікувати

процеси сруктурування та досягнути високих показників водонепроникності шляхом утворення дрібнодисперсних важкорозчинних кристалогідратів. Ремонтні гідроізоляційні суміші характеризуються високими фізико-механічними властивостями та дозволяють наносити ремонтну суміш при від'ємному гідростатичному тиску води. Ремонтні гідроізоляційні суміші можна наносити на поверхню штукатурним способом або механізовано за допомогою торкретування. Такі матеріали не змінюють зовнішнього вигляду будівлі чи конструкції. Досягти потрібних властивостей ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу дозволяє контрольоване сруктурування за рахунок кольматації порового простору кристалогідратами, що забезпечує зменшення усадки та підвищення тріщиностійкості. Таким чиним, модифіковані ремонтні суміші володіють високими показниками якості та покращеними експлуатаційними властивостями, що дозволяє забезпечити довговічність будівельних конструкцій.

Висновки до розділу

1. Проведено оптимізацію зернового складу кварцового піску, для одержання щільної мезоструктури ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу. Показано, що найвищою густиною у насипному стані характеризується зерновий склад у співвідношенні $M_{k2,76}:M_{k1,25}=75:25$. Встановлено, що заміна кварцового піску оптимізованого зернового складу з $M_{k1,87}$ на 25,0 мас. % золи-винесення призводить до збільшення насипної густини (до 1683 кг/м^3) та зменшення пустотності (до 35,3 %). Підбір зернового складу піску забезпечує необхідні технологічні властивості ремонтних сумішей, а за рахунок одержання щільної мезоструктури розчину досягаються високі показники міцності.

2. Методом математичного планування експерименту запроєктовано ефективні склади ремонтних безусадочних сумішей за критеріями термінів тужавіння, ранньої та проектної міцностей. Встановлено, що оптимальний вміст добавок - 2,5-5,0 мас. % С-А-Н-Н-РСЕ та 10 мас. % золи-винесення забезпечує прискорені терміни тужавіння та високу міцність ремонтних сумішей як у ранньому так і в проектному віці. Так, рання міцність ремонтної суміші через 14 год становить 9,8 МПа, 24 год – 22,08 МПа, а через 28 діб тверднення досягає 70,9 МПа. Під час тверднення при понижених додатних та від'ємних температурах міцність складає 66,0 МПа. Деформації усадки після тверднення 7 діб у воді та 21 добу в повітряно-сухих умовах складають 0,06 мм/м, що дозволяє віднести такі ремонтні суміші до безусадочних.

3. Для одержання ремонтних розширних сумішей на основі лужного портландцементу з регульованим утворенням еtringіту розроблено модифіковану комплексну розширну добавку (КРД) $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{PCE}$. Встановлено, що деформації розширення модельної системи « $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ » через 50 хв складають 19,4%, що більше в 4 рази порівняно з системою на основі глиноземистого цементу (4,7%). Для модифікованої модельної системи « $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{PCE}$ » деформації розширення зменшуються на 18,3% та стабілізуються через 120 хв. Методом рентгенофазового аналізу встановлено наявність голкоподібних кристалів гідросульфоалюмінату кальцію ($d/n=0,973; 0,561$ нм), що прискорює початковий набір міцності та збільшує об'ємні деформації системи. Введення РСЕ в дану систему дає можливість регулювати утворення гідросульфоалюмінату кальцію, зменшити водопотребу та підвищити міцність ремонтних сумішей.

4. Експериментальними дослідженнями встановлено, що введення 20,0 та 30,0 мас. % КРД забезпечує прискорені терміни тужавіння ($\tau_{\text{поч}}=105-50$ хв) розширних ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу; в обмежених умовах тверднення рання та проектна міцності збільшується на 18

- 23 %. Для модифікованої ремонтної суміші на основі СЕМ П/А-LL 42,5R з 20,0 мас. % КРД +1,0 мас. % РСЕ міцність через 1 добу досягає 16,1 МПа, через 28 діб – 55 МПа. Лінійне розширення модифікованої ремонтної суміші складає 0,12 мм/м (0,14 %), що дозволяє її віднести до розширної. Модифіковані ремонтні розширні суміші на основі лужного портландцементу характеризуються високою міцністю, тріщиностійкістю ($K_c=0,18$), водонепроникністю (W14), міцністю зчеплення з основою (3,0 МПа).

5. Досліджено гідроізоляційні ремонтні суміші на основі модифікованого лужного композиційного портландцементу. Показано, що введення нанорідини з вмістом високоактивних наночастинок Al_2O_3 забезпечує термінами початку тужавіння 100-80 хв, міцність при стиску через 1 добу 13,4 – 14,2 МПа та проектну міцність 56,2-57,3 МПа. При цьому досягається марка за водонепроникністю W16. Модифіковані ремонтні гідроізоляційні розчини характеризуються підвищеними експлуатаційними властивостями, що забезпечує довговічність будівельних конструкцій.

РОЗДІЛ 5. ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ЛУЖНИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ ТА РЕМОНТНИХ СУМІШЕЙ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

5.1. Дослідно-промислова апробація ремонтних сумішей на основі лужних портландцементів з підвищеними експлуатаційними властивостями

Сучасний розвиток будівельного виробництва спрямований на розроблення нових ефективних будівельних матеріалів та оптимізацію існуючих в'язучих речовин. Виконання ремонтних та відновлювальних робіт дозволяє підвищити довговічність та збільшити експлуатаційну надійність будівельних конструкцій.

З метою зниження собівартості ремонтних сумішей було замінено глиноземистий цемент на портландцемент загальнобудівельного призначення та лужний алюмінійвмісний активатор. Висока міцність зчеплення з основою та висока водонепроникність дозволяє застосовувати ремонтні суміші для відновлення геометричних розмірів пошкоджених фундаментних блоків, колон, ригелів, плит покриття та перекриття, сходових маршів та монолітних елементів.

Лужний портландцемент для ремонтних безусадочних сумішей виготовляли за «бетонною» технологією. Дана технологія передбачає одночасну подачу всіх сировинних матеріалів у змішувач, в тому числі лужний алюмінійвмісний активатор тверднення у вигляді розчину. За «бетонною» технологією лужний компонент забезпечує найбільш активну взаємодію з алюмосилікатним компонентом та має значний вплив на ранню міцність сумішей та забезпечує високі показники проектної міцності. Ремонтна безусадочна суміш призначена, як для ручного так і для машинного нанесення

на відновлювальну ділянку конструкції. Технологічна схема виробництва безусадочних ремонтних сумішей на основі модифікованого лужного портландцементу представлена на рис. 5.1.

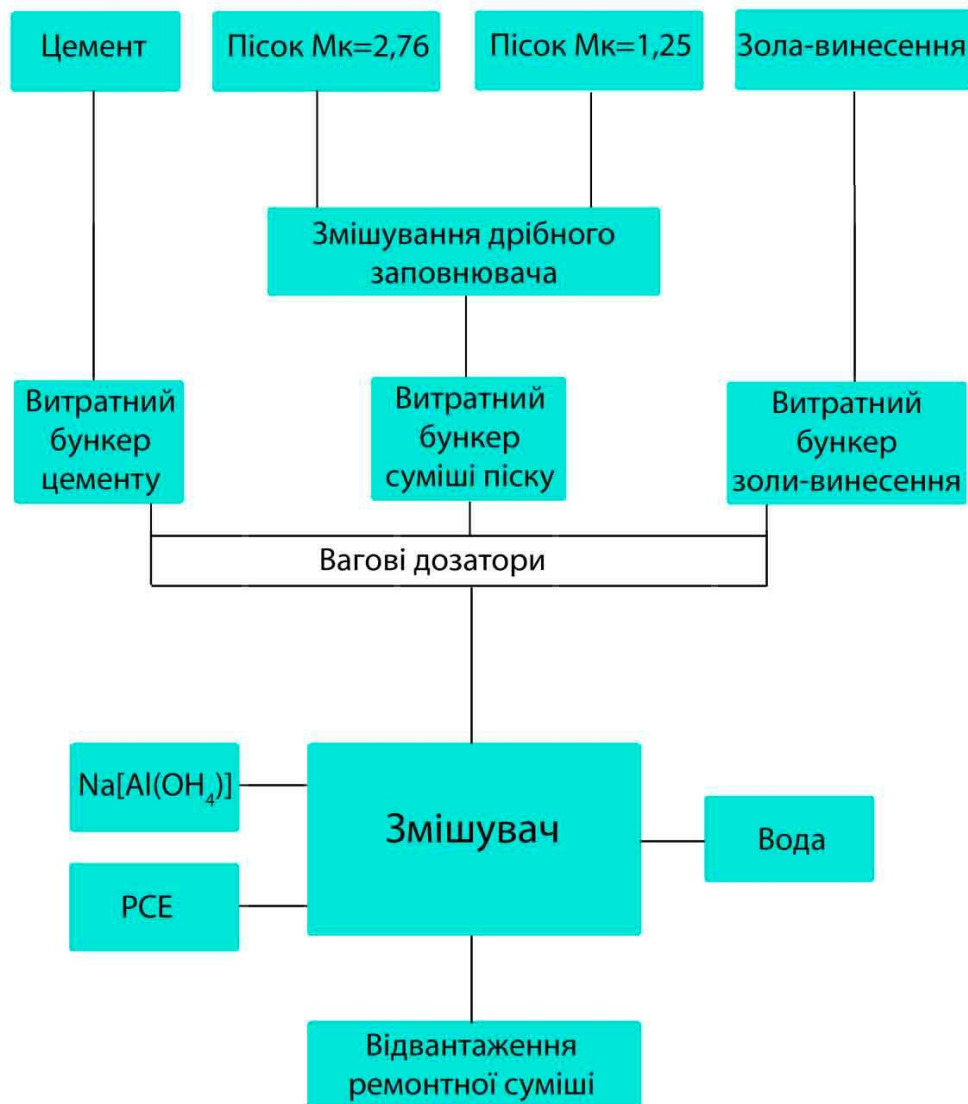


Рисунок 5.1 – Технологічна схема виготовлення безусадочної ремонтної суміші на основі лужного портландцементу

На підприємстві ПП «Терміт» вироблено швидкотверднучу ремонтну безусадочну суміш для закріплення закладних анкерних деталей ШРБС-АН 1 ТУ У 23.5-02071010-178:2020 (Додаток Б) в кількості 1000 кг. Ремонтну безусадочну суміш одержано за «бетонною» технологією шляхом сумісного

змішування компонентів: портландцементу з вапняком, оптимізованого зернового складу піску ($M_k=1,87$), золи-винесення, лужного активатора $Na[Al(OH)_4]$ та полікарбоксилатного суперпластифікатора РСЕ.

Ремонтні роботи здійснювалися компанією ТОВ «Теріос» при відновленні фундаменту під металевими колонами на території елеватору ТОВ «АГРІНГРУП» (Харківська обл., Барвінківський район, м. Барвінкове, вул. Соборна 24) (Додаток В). Ремонтною безсадочною сумішшю заповнювали отвори та вкладали металеві закладні анкерні деталі. Результати випробувань ремонтної безсадочної анкерної суміші ШРБС АН-1 наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Будівельно-технічні властивості безсадочної ремонтної суміші ШРБС АН-1

Показник		Значення
В/Ц		0,34
Середня густина, кг/ м ³		2160
Термін придатності, хв		20
Занурення еталонного конуса, мм		70
Міцність при згині/стиску, МПа, у віці, діб	6 год	3,0/12,0
	1	7,5/28,0
	28	11,5/78,4
Міцність зчеплення з основою, МПа		4,5
Лінійні деформації, мм/м		0,02-0,04
Марка за морозостійкістю		F400

На рис. 5.2 показано закріплення анкерних деталей під час проведення ремонтних та відновлювальних робіт фундаменту колони на території елеватору ТОВ «АГРІНГРУП».



а

б

Рисунок 5.2 – Закріплення металевих анкерних деталей при відновленні фундаменту колони

На підприємстві ПП «Терміт» виготовлено швидкотверднучу ремонтну безусадочну суміш ШРБС РМ-2 на основі лужного композиційного портландцементу в кількості 2000 кг. Для одержання ремонтної безусадочної суміші застосовували лужний композиційний портландцемент, кварцовий поліфракційний пісок оптимізованого гранулометричного складу ($M_k=1,87$) та полікарбоксилатний суперпластифікатор PCE SikaPlast 1020. Швидкотверднучу безусадочну ремонтну суміш готували у змішувачі типу ЗЛ-300 К на ПП «Терміт». Показники якості ремонтної безусадочної суміші на основі лужного композиційного портландцементу наступні: термін придатності - 30 хв, консистенція (осідання плунжера) – 23 мм, рання міцність на стиск – 22,4 МПа, проектна міцність – 52,9 МПа, міцність зчеплення з основою – 3,8 МПа, усадка – 0,2-0,3 мм/м, марка за морозостійкістю F300 (Додаток Г).

Варто відзначити, що при виконанні відновлення ділянки конструкції (рис. 5.3), ремонтна суміш добре накладається на основу та не розшаровується за рахунок вмісту в композиційному портландцементі активних мінеральних добавок гідралічної та пуцоланічної дії. Знижене водовідділення забезпечує

високу однорідність та якість отриманої поверхні. Ремонтна суміш володіє високими будівельно-технічними властивостями.



а



б



в



г

Рисунок 5.3 – Відновлення фундаментів під силосами елеватору на території ТОВ «АГРІНГРУП»: а, б – процес нанесення ремонтної суміші; в – затверділа ремонтна суміш; г – будівельна конструкція в процесі експлуатації

ТОВ «РУУФ» здійснено нанесення гідроізоляційної ремонтної безусадочної суміші з гідрофобною добавкою на основі $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ з вирішенням завдання підвищеної водонепроникності та корозійної стійкості для гідроізоляції підвального приміщення офісного центру (м.Львів, пл. Петрушевича, 5) (рис. 5.4). Загальна кількість виробленої гідроізоляційної ремонтної безусадочної суміші склала 750 кг. Для одержання гідроізоляційної

ремонтної безусадочної суміші застосовували композиційний портландцемент класу міцності 42,5 (клінкер фактор – 0,65), лужний активатор тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$, полікарбоксилатний суперпластифікатора PCE Sika 1020 та кварцовий пісок ($M_k=1,87$) (Додаток Е).



а

б

Рисунок 5.4 – Нанесення гідроізоляційної безусадочної ремонтної суміші з гідрофобною добавкою при виконанні гідроізоляції підвального приміщення офісного центру

Для вирішення завдань герметизації швів будівлі розроблено ремонтні розширні суміші РРС ТУ У 23.5-02071010-178:2020, які в процесі гідратації збільшуються в об'ємі та максимально щільно закривають порожнечі; в обмеженому просторі відбувається ефект самоущільнення такого розчину. Ефект розширення відбувається за рахунок введення комплексної розширної добавки КРД « $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]+\text{CaO}+\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}+\text{PCE}$ », модифікованої полікарбоксилатними естерами, що в ранній період структуроутворення за рахунок явища адсорбційного модифікування дозволяє синтезувати дрібнодисперсні кристали еtringіту, які забезпечують необхідне розширення системи.

На підприємстві ПП «Терміт» вироблено розширну ремонтну суміш в кількості 1600 кг (Додаток Д). Розширний ремонтний розчин одержано

шляхом сумісного змішування компонентів: портландцементу, поліфракційного піску оптимізованого гранулометричного складу ($M_k=1,87$), КРД (негашене вапно, двоводний сульфат кальцію, лужний активатор тверднення та полікарбоксилатного суперпластифікатор) (рис. 5.5). Лужний активатор $Na[Al(OH)_4]$ вводиться в суміш безпосередньо із водою замішування. Ремонтні роботи здійснено компанією ПП «Терміт». Процеси розширення в обмеженому просторі призводять до самоущільнення суміші, міцність на стиск/згин через 28 діб тверднення зростає на 18 – 23 %, та дозволяє зменшити подальші деформації усадки цементного каменю.

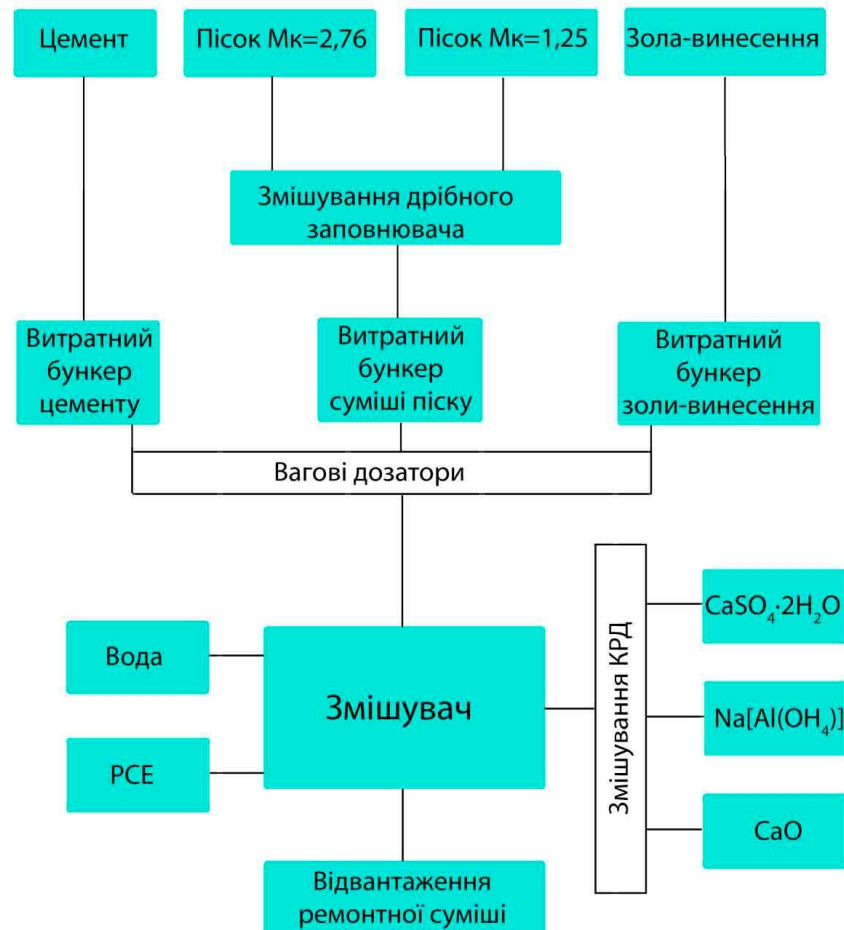


Рисунок 5.5 – Технологічна схема виготовлення розширної ремонтної суміші на основі лужного портландцементу за бетонною технологією

Розширні ремонтні суміші застосовано при виконанні інженерних вузлів комунікації. Розширні суміші заповнюють всі порожнини та дрібні тріщини.

В процесі розширення відбувається ущільнення структури ремонтного розчину, обтискається труба та надійно перекриває отвір (рис. 5.6, а – г). В процесі ремонту відновлено герметичність вузлів інженерних комунікацій в підвальній частині житлової будівлі (м. Львів, вул. Пасічна, 167). При цьому було вирішено технологічні завдання забезпечення герметичності та водонепроникності. Технологія проведення робіт не відрізнялась від стандартної, прийнятої на ПП «Герміт».



а



б



в



г

Рисунок 5.6 – Герметизація введення інженерних комунікацій в приміщення

Проведення ремонтних робіт з герметизації швів між фундаментними блоками показано на рис 5.7, а–е.



а



б



в



г



д



е

Рисунок 5.7 – Герметизація швів між фундаментними блокам ФБС: а, б, в – дефекти збірного фундаменту; г, д, е – заповнені фундаментні шви

В якості компонентів для ремонтних розширних сумішей застосовано лужний портландцемент та комплексну розширну добавку «Na[Al(OH)₄] – CaSO₄·2H₂O – CaO – РСЕ». Результати випробувань ремонтної розширної суміші з використанням лужного портландцементу наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Будівельно-технічні властивості швидкотверднучої ремонтної розширної суміші на основі лужного портландцементу

Показник	Значення	
В/Ц	0,52	
Термін придатності, хв	20-30	
Деформації розширення, мм/м	0,8	
Міцність зчеплення з основою в повітряно-сухих умовах, МПа	2,5-3,0	
Міцність на стиск, МПа	2	26,0-28,0
	28	45,0-49,0

Розширна ремонтна суміш характеризувалась наступними показниками: термін придатності – 20-30 хв, міцність на стиск через 2 доби – 26,0-28,0 МПа, проектна міцність – 45–49 МПа, міцність зчеплення з основою 2,5–3,0 МПа.

5.2. Техніко-економічні показники ремонтних сумішей на основі лужних портландцементів

В умовах зростання собівартості виробництва пріоритетним напрямком є відновлення та збереження, як ресурсів на зведення будівель, так і ресурсів на відновлення будівельних конструкцій. Виробництво спеціальних ремонтних сумішей у відходженні від стандартних методів виробництва, є

важливим напрямком розвитку будівельної галузі. Техніко-економічні порівняння ефективності проводили з допомогою програмного комплексу АВК – 5, використовуючи типовий метод визначення ефективності капіталовкладень. Згідно з результатами випробувань, заміна глиноземистого цементу на лужний алюмінійвмісний активатор тверднення забезпечує економічний ефект та сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей ремонтних сумішей (стійкість до деформацій усадки-розширення, водонепроникність), а також зменшенню працезатратності на одиницю часу. Застосування таких сумішей дають можливість виконувати ремонтні роботи при утворенні тріщин, а також ліквідувати дефекти існуючих конструкцій. При цьому прискорений набір міцності дає можливість скоротити терміни проведення робіт що може забезпечити додатковий економічний ефект.

Новизна полягає в заміні глиноземистого цементу лужним активатором $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ при забезпеченні необхідних властивостей та показників якості ремонтних сумішей. В умовах ПП «Терміт» собівартість виробництва однієї тони ремонтної безусадочної суміші для анкерування складає 2848,7 грн, тоді як для суміші на основі глиноземистого цементу - 3246,5 грн (табл. 5.3). Економічний ефект від виробництва ремонтних безусадочних сумішей на основі модифікованого лужного портландцементу з використанням золи-винесення складає 397,80 грн (Додаток Є).

Проведено економічне обґрунтування використання ремонтних розширних сумішей. Для порівняння приймаємо базовий склад ремонтних сумішей на основі глиноземистого цементу ISTRA-40. В умовах ПП «Терміт» собівартість виробництва однієї тони ремонтної розширної суміші порівняно з сумішшю на основі глиноземистого цементу зменшуються на 204 грн. Отже, використання ремонтного розширної суміші на основі лужного портландцементу при здійсненні ремонтних робіт забезпечує технічний та економічний ефекти.

Таблиця 5.3

Економічне обґрунтування використання
ремонтних безусадочних сумішей для анкерування

Стаття витрат	Од.	Вартість, грн/т	На основі глиноземистого цементу		На основі лужного портландцементу	
			Кількість на 1 т	Вартість, грн/т	Кількість на 1 т	Вартість, грн/т
СЕМ II/A-LL	т	3120,0	0,27	842,5	0,30	936,0
Пісок	т	2000,0	0,696	1392,0	0,56	1120,0
Зола-винесення	т	490,0	-	-	0,130	65,2
Na[Al(OH) ₄]	т	70000,0	-	-	0,0039	273,0
Ca(NO ₃) ₂	т	35000,0	-	-	0,0039	136,5
РСЕ	т	116000,0	0,002	232,0	0,003	348,0
ГЦ – 40	т	26000,0	0,03	780,0	-	-
				3246,5		2848,7
Економічний ефект						397,80

Таблиця 5.4

Економічне обґрунтування використання
ремонтних розширних сумішей

Стаття витрат	Одиниці виміру	Вартість, грн/т	На основі глиноземистого цементу		На основі лужного портландцементу	
			Кількість на 1 т	Вартість грн/т	Кількість на 1 т	Вартість грн/т
СЕМ II/A-LL	т	3120,0	-	-	0,26	829,9
Na[Al(OH) ₄]	т	70000,0	-	-	0,035	2450
ГЦ – 40	т	25000,0	0,105	2625	-	-
Пісок	т	2000,0	0,65	1300	0,534	1068
Вапно	т	20000,0	0,105	2100	0,075	1500
Гіпс	т	900,0	0,14	126	0,11	99
				6151,0		5946,9
Економічний ефект						204,0 грн

Використання ремонтних сумішей на основі композиційних портландцементів із пониженим клінкер фактором $K_f=0,65$ та відходів промислового виробництва (гранульований доменний шлак, зола-винесення) за рахунок зменшення викидів CO_2 дозволяють отримати екологічний ефект (302 кг CO_2 /т портландцементного клінкеру).

Висновки до розділу

1. На ПП «Терміт» здійснено впровадження швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші для закріплення металевих закладних анкерних деталей в кількості 1000 кг, випуск дослідної партії ремонтного безусадочного розчину для відновлення пошкоджених бетонних елементів в кількості 2000 кг, та розширної ремонтної суміші для герметизації конструкцій із середини приміщення в кількості 1600 кг.

2. Здійсненими випробуваннями ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу показано, що ремонтні суміші володіють прискореними термінами тужавіння, зниженим водовідділенням та забезпечують високі показники міцності відновлених елементів.

3. Впроваджено швидкотверднучу ремонтну безусадочну суміш для закріплення металевих закладних анкерних деталей під час відновлення фундаменту колон та безусадочних ремонтних розчинів на основі лужного портландцементу при відновленні фундаментів під силосом елеватора здійснено компанією ТОВ «Теріос». Розчини використовувалися на території ТОВ «АГРІНГРУП» за адресом: Харківська обл., Барвінківський район, м. Барвінкове, вул. Соборна 24.

4. Впроваджено гідроізоляційну безусадочну ремонтну суміш для гідроізоляції підвального приміщення офісного центру (м. Львів, пл. Петрушевича, 5) із вирішенням завдання підвищеної водонепроникності та корозійної стійкості.

5. Здійснено впровадження розширеного ремонтного розчину для герметизації швів та введення комунікацій у споруду за адресом: м. Львів вул. Пасічна, 167. Показано техніко-економічне обґрунтування виробництва ремонтної безусадочної суміші на основі лужного портландцементу. В умовах ПП «Терміт» виробнича собівартість однієї тони ремонтної безусадочної суміші на основі лужного портландцементу порівняно з сумішами на основі глиноземистого цементу зменшується на 397,8 грн.

6. Показано техніко-економічне обґрунтування виробництва ремонтної розширеної суміші на основі лужного портландцементу. В умовах ПП «Терміт» виробнича собівартість однієї тони ремонтної розширеної суміші на основі лужного портландцементу порівняно з сумішами на основі глиноземистого цементу зменшується на 204 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено наукове завдання одержання швидкотверднучих ремонтних безусадочних та розширних ремонтних сумішей з підвищеними експлуатаційними властивостями за шляхом розроблення лужних портландцементів та алюмінійвмісного нанокompозиту С-А-Н-Н-РСЕ. Внаслідок проведених теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано наступне:

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість отримання високоефективних ремонтних безусадочних сумішей з покращеними експлуатаційними властивостями за рахунок розроблення лужних портландцементів з добавкою вапняку, застосування активної мінеральної добавки пуцоланічної дії (золи-винесення), лужного алюмінійвмісного активатора тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу РСЕ, а також ремонтних розширних сумішей, одержаних шляхом введення комплексної лужної розширної добавки $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]\text{-CaO-CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O-РСЕ}$ з врахуванням технічних і економічних переваг.

2. Досліджено вплив лужного алюмінійвмісного активатора тверднення $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ на фізико-механічні властивості портландцементу з вапняком СЕМ ІІ/А-LL. Дослідженнями згідно ДСТУ Б EN 196-1 встановлено, що збільшення кількості $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ в межах 1,5-3,0 мас.% призводить до різкого зменшення рухливості цементно-піщаного розчину (В/Ц=0,50) від 152 до 110 мм, що обумовлено утворенням значної кількості плівкоподібних гідроалюмінатних фаз C_4AH_{19} , які формуються в умовах підвищеної лужності середовища (показник рН збільшується від 12,5 до 13,2). При введенні 1,5...3,0 мас.% $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ через 14 та 24 год рання міцність та стиск складає відповідно 7,5-10,0 МПа, в той же час через 2, 7 та 28 діб внаслідок зростання пористості спостерігається зниження міцності в 1,8-3,0 рази порівняно зі

складом без добавок. Показано, що при введенні 1,0 мас. % PCE + 1,5 мас.% Na[Al(OH)₄] при РК = 150-160 мм за рахунок водоредукуючого ефекту при $\Delta B/C=28,0\%$ відбувається зростання особливо ранньої міцності - через 14 год до 9,6 МПа.

3. Розроблено лужні портландцементи з високою ранньою міцністю різних видів. Так, для лужного портландцементу з добавкою вапняку та золи-винесення та вмістом 1,5 мас.% Na[Al(OH)₄] (B/C=0,50, РК=170 мм) рання міцність через 12 та 24 год тверднення складає 6,3 та 15,6 МПа, стандартна – 54,6 МПа. Введення 1,0 мас.% PCE за рахунок водоредукуючого ефекту $\Delta B/C=30,0\%$ при РК = 170 мм забезпечує збільшення міцності – через 12 год в 4,5 рази (19,3 МПа), 24 год в 2 рази (35,0 МПа), 2 доби в 1,8 рази (51,2 МПа), 28 діб - у 1,2 рази (73,7 МПа) ($R_{c1}/R_{c28}=47,5\%$; $R_{t2}/R_{c28}=69,4\%$). Розроблений модифікований лужний портландцемент характеризується високою ранньою ($R_{ct2}= 38,2$ МПа) та стандартною ($R_{c28} = 60,1$ МПа) міцностями на стиск та класом міцності 52,5 R. Оптимальний вміст 1,5 мас.% Na[Al(OH)₄] та 1,0% PCE забезпечує одержання лужного композиційного портландцементу АСЕМ П/В-М (S-P-L) 42,5 R з високою ранньою міцністю ($R_{c2}=32,0$ МПа, $R_{c28}=55,6$ МПа). Дослідженнями водовідділення згідно ДСТУ Б В.2.7-186:2009 встановлено, що для лужного портландцементу об'ємний коефіцієнт $K_{об}$ зменшується в 2 рази до $K_{об}=8,0\%$; введення PCE забезпечує стабілізацію лужної цементуючої системи без проходження седиментаційних процесів протягом 4 год; температурний максимум гідратації знижується від 83 до 59 °С, а період його досягнення прискорюється на 130 хв.

4. Встановлено закономірності формування фазового складу та мікроструктури в гідросульфатноалюмінатних цементуючих системах. Згідно даних рентгенофазового аналізу для цементного каменю на основі лужного композиційного портландцементу через 1 добу тверднення фіксуються лінії еtringіту, а також незначні рефлекси кальцію гідроксиду. Комплексне поєднання золи-винесення і вапняку забезпечує інтенсифікацію процесів

раннього структуроутворення за рахунок утворення гідрокарбоалюмінатів та лужних цеолітоподібних гідроалюмосилікатів N-C-A-S-H; крупніші фракції частинок вапняку та золи-винесення виступають як мікронаповнювач, що в комплексі сприяє підвищенню міцності цементного каменю. Методом растрової електронної мікроскопії показано, що в присутності добавок етерів полікарбоксилатів РСЕ внаслідок явища адсорбційного модифікування розмір утворених кристалів еtringіту зменшується, при цьому швидке накопичення дрібнодисперсних, стабільно існуючих кристалів еtringіту в наступні періоди тверднення сприяє їх інтенсивному зрощенню, значному збільшенню щільності і непроникності цементного каменю; за рахунок явища «самоармування» голчастими кристалами еtringіту відбувається зростання міцності на згин та тріщиностійкості ремонтної суміші.

5. Методом золь-гель технології внаслідок реакції у рідкій фазі $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ та $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ синтезовано гідронітроалюмінат кальцію $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, що відноситься до класу подвійних кальцієво-алюмінатних гідроксидів типу (Ca_2Al LDH) шаруватої будови, які можуть бути підкладкою для молекул етерів полікарбоксилатів і сприяють утворенню нанокомпозитів на основі органічних добавок і матеріалів шаруватої структури, що підтверджено методами ІЧ-спектроскопії, РФА та РЕМ. Введення лужного алюмінійвмісного нанокомпозиту С-А-Н-Н-РСЕ до цементуючої системи на основі на основі СЕМ ІІ/А-LL 42,5 забезпечує високу ранню (через 12 год - 20,8 МПа) та стандартну (через 28 діб - 90,0 МПа) міцності при зменшенні його капілярної пористості до 2,5-2,8 %. Розроблені нанокомпозити (C_2A LDH) – РСЕ відносяться до нового класу інженерних матеріалів, які забезпечують можливість контролювати кінетику процесів взаємодії при гідратації розширної системи в ранній період структуроутворення для направленої формування щільної мікроструктури в неклінкерній частині цементуючої матриці та сприяють покращенню

експлуатаційних властивостей будівельних конструкції після проведення ремонтних робіт.

6. Дослідженнями впливу зернового складу кварцового піску різних фракцій на формування мезоструктури та властивостей ремонтних сумішей встановлено, що найнижчою густиною у насипному ($\rho_n=1533 \text{ кг/м}^3$) і ущільненому ($\rho_{\text{щ}}=1690 \text{ кг/м}^3$) станах та пустотністю відповідно $P_n=42,2\%$ і $P_{\text{щ}}=36,2\%$ характеризується зерновий склад у співвідношенні $M_{k_{1,3}}:M_{k_{2,7}}=25:75$. Показано, що заміна кварцового піску $M_{k_{2,7}}$ на 25 мас.% золи-винесення у складі $M_{k_{1,3}}:M_{k_{2,7}}=25:75$ призводить до збільшення насипної густоти (1683 кг/м^3) та зменшення пустотності до 35,3 %. На основі комплексного аналізу математичних моделей за критеріями термінів тужавіння, міцності та деформацій усадки-розширення запроєктовані ремонтні склади безусадочних сумішей на основі лужних портландцементів, для яких введення оптимального складу добавок (10-15 мас.% золи-винесення та 2,0-2,5 мас.% С-А-Н-Н-РСЕ) забезпечує високу швидкість тверднення (140-200 хв), ранню (22,0 МПа) та марочну (70,9 МПа) міцності, понижені деформації.

7. Розроблено ремонтні безусадочні суміші на основі лужних портландцементів, що дозволяють отримати високі показники якості, а також забезпечують технологічний, технічний та економічний ефекти. Ремонтні безусадочні суміші (марка за рухливістю П8, осідання конуса – 6 см) на основі лужного портландцементу при $V/C=0,35$ характеризуються прискореним тужавінням, високою ранньою міцністю при згині та стиску відповідно: через 14 год – $R_{cb}=3,4 \text{ МПа}$, $R_c=9,8 \text{ МПа}$, 24 год – 22,08 МПа та марочною міцністю - через 28 діб – 70,9 МПа, міцність зчеплення з основою складає 4,0 МПа, модуль пружності $E_{cm}= 51,7 \text{ ГПа}$, корозійна стійкість $K_{90}=1,2$, водонепроникність W16, морозостійкість F400. Встановлено, що загальна пористість складає $P=11,9$, деформації усадки після 7діб зберігання у воді та

21 доби у повітряно-сухих умовах становлять ($\Delta l/l = 0,06$ мм/м), що дозволяє такі ремонтні суміші віднести до безусадочних.

8. Для одержання ремонтних розширних сумішей з регульованим утворенням еtringіту розроблено модифіковану комплексну розширну добавку (КРД) $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{PCE}$. За допомогою рентгенофазового аналізу в модельних системах «глиноземистий цемент (ГЦ) - $\text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ » (1:0,5:0,5); « $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ », « $\text{CaO} - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ » виявлено інтенсивні рефлекси еtringіту ($d/n=0,973$; 0,561 нм). Методом растрової електронної мікроскопії показано, що введення PCE в модельні системи « $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ » і « $\text{CaO} - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ » за рахунок явища адсорбційного модифікування забезпечує синтез голкоподібних, дрібних кристалів еtringіту, що створює можливість для регулювання процесів розширення у цементуючій матриці ремонтних сумішей. Деформації розширення модельної системи « $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ » через 60 хв складають 19,4%, що більше в 6,7 разів порівняно з системою на основі глиноземистого цементу. Для модифікованої модельної системи « $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] - \text{CaO} - \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{PCE}$ » деформації розширення зменшуються на 18,3% та стабілізуються через 120 хв.

9. Експериментальними дослідженнями встановлено, що введення 20-30 мас.% КРД забезпечує високу швидкість тверднення, при цьому початок тужавіння суміші скорочується до 120-50 хв. Ремонтні розширні суміші на основі портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 при використанні КРД на основі $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ та суперпластифікатора PCE створюють можливість збільшення такої системи в об'ємі ($\Delta l/l = 0,62 - 1,25$ мм/м) із забезпеченням міцності на рівні 40,0 – 34,0 МПа. Процеси розширення в обмеженому просторі призводять до самоущільнення суміші, міцність на стиск/згин через 28 діб тверднення зростає на 18 – 23 %. Загальна пористість розширної суміші складає 13,9%, водопоглинання за об'ємом – 9,2%. За рахунок додаткової

гідрофобізації ремонтних сумішей зростає довговічність бетонних та кам'яних конструкцій.

10. ПП «Терміт» здійснено апробацію швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші ШБРС АН-1 на основі лужного портландцементу в кількості 1,0 т та проведено замонолічування закладних анкерних деталей (с. Барвінкове, Харківської обл.). ТзОВ «Теріос» із використанням ремонтної суміші на основі лужного портландцементу АСЕМ П/В-М(S-P-L) 42,5R проведено роботи із відновлення пошкодженого фундаменту під силосами елеватору на території агрокомплексу ТОВ «АГРІНГРУП» (с. Барвінкове, Харківської обл.). ПП «Терміт» здійснено випуск дослідної партії ремонтної розширної суміші в кількості 1600 кг та проведено ремонтні роботи з відновлення бетонних елементів конструкції. При виконанні герметизації швів між залізобетонними конструкціями та герметизації введення інженерних комунікацій в споруду введено ремонтну розширну суміш з КРД на основі лужного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ (м. Львів, вул. Пасічна 169). ТОВ «РУУф» впроваджено спеціальні безусадочні ремонтні суміші з гідрофобною добавкою для гідроізоляції підвального приміщення офісного центру. Економічний ефект застосування швидкотверднучої ремонтної суміші складає 397,8 грн/т. Економічний ефект застосування ремонтної розширної суміші складає 204 грн/т.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабіч М., Рунова Р., Кріпка Л. Європейські стандарти на цемент: практика впровадження. АВЦУ "Укрцемент". Х.: ПП "Юнісофт", 2016. 72 с.
2. Баженов Ю. М., Алимов Л. А., Воронин В. В. Наномодифицированные цементные бетоны. М. : Изд-во АСВ, 2017. 198 с.
3. Барабаш І. В. Бетони на механоактивованих мінеральних в'язучих : автореф. дис. докт. техн. наук : 05.23.05. Одеса, 2005. 35 с.
4. Бліхарський З. Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд / Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2008. 108 с.
5. Бондаренко О. П. Швидкотверднучі лужні шлакопортландцементи та бетони на їх основі : автореф. дис. канд. техн. наук : спец. 05.23.05. Київ, 2009. 21 с.
6. Будников П.П., Кравченко И.В. Расширяющиеся цементы / Труды 5-го Международного симпозиума по химии цемента (Токио). Цементная Ассоциация Японии, 1968. т. 4. С. 319-335.
7. Високоміцний шлаколузний цемент підвищеної тріщиностійкості: пат. 115704 Україна. Опубліковано 25.04.2017. Автори: Лакуста С. О., Ковальчук О. Ю., Вознюк Г. В., Кривенко П. В., Пасько А. В., Петропавловський О. М.
8. Выровой В. Н., Дорофеев В. С., Суханов С. Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. Одесса: ГЕС, 2010. 169 с.
9. Гавриляк А. І., Базарник І. Б., Кінаш Р. І., Котів М. В. Технічна експлуатація, реконструкція і модернізація будівель : навч. посібник для вишів : Видавництво Львівської політехніки, 2006. 540 с.
10. Гергичны З. Зола уноса в составе цемента и бетона. Перевод с польского. Санкт-Петербург, 2014. 189 с.
11. Гоц В. І. Ефективні будівельні матеріали та вироби на основі активованих паливних зол і шлаків : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.23.05. / Київський національний ун-т будівництва і архітектури – К., 2009. 36 с.

12. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шилюк П. С. Бетони і будівельні розчини: підручник. К. : Основа, 2016. 568 с.
13. Гуняк О. М. Високоміцні бетони транспортного призначення з підвищеною довговічністю : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.05. Львів, 2019. 21 с.
14. Глуховский В. Д., Рунова Р. Ф., Шейнич Л. А., Гелевера А. Г. Основы технологии отделочных, тепло- и гидроизоляционных материалов. К.: Высшая школа, 1986. 303 с.
15. Дворкін Л. Й., Гоц В. І., Дворкін О. Л. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів: навчальний посібник. К.: Основа, 2014. 304 с.
16. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Марчук В. В. та ін. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини : монографія. Рівне : НУВГП, 2017. 424 с.
17. Дворкін Л. Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах: Монографія, 2007. 214 с.
18. Дерев`янку В. Н., Мартыненко Т. В., Максименко А. А., Кондратьева Н. В. Модифицированные высокопрочные ремонтные растворы // *ОДАБА*. 2015. 58,19. С. 110–114.
19. ДСТУ Б В.2.7-128:2006. Добавки активні мінеральні та добавки-наповнювачі до цементу. Технічні умови. [Чинний від 2006-03-07]. К. : Мінрегіонбуд України, 2006. 25 с.
20. ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Суміші будівельні сухі модифіковані Загальні технічні умови. [Чинний від 2011-06-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2011. 59 с.
21. ДСТУ Б В.2.7-181:2009. Цементи лужні. Технічні умови. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 14 с.
22. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. [Чинний від 2011-09-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2011. 14 с.

23. 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.
24. Казанская Л. Ф., Смирнова О. М. Основные технические характеристики бетонов на основе цементов щелочной активации. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2016. Т. 2, № 4. С. 1–6.
25. Камінський А. Використання лужного прискорювача на основі алюмінату натрію в технології бетону // *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2019. № 912. С. 57–62.
26. Кравченко И. В. Расширяющийся цемент. М.: Стройиздат, 1962. 164 с.
27. Кривенко П. В., Вознюк Г. В., Гончарова А. М. Безусадочные щелочные цементы // *Вісник ОДАБА*. 2013. 52 (22). С. 128–133.
28. Кривенко П. В. Специальные шлакощелочные цементы. К.: Будівельник, 1992. 192 с.
29. Кривенко П. В. Лужні цементы: термінологія, класифікація, галузі застосування // *Будівельні матеріали і конструкції*. 1995. № 1. С. 23–24.
30. Кривенко П. В., Ковальчук О. Ю. Гібридні лужні цементы: структура та властивості // *Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка*. 2015. Вип. 55. С. 8–12.
31. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б. та ін. Будівельне матеріалознавство. К.: ТОВ УВПК “Ексоб”. 2010. 704 с.
32. 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.
33. Кривенко П. В., Рунова Р. Ф., Саницкий М. А., Руденко И. И. Щелочные цементы : монография. Київ : «Основа», 2015. 448 с.
34. Кривенко П. В., Петропавловський О. М., Вознюк Г. В., Лакуста С. О. Високоміцні шлаколузні цементы для швидкого ремонту та зведення бетонних споруд // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2016. Вип. 33. С. 62–68.

35. Кропивницька Т. П. Лужноактивовані композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та наномодифіковані бетони на їх основі : автореф. дис. докт. техн. наук : 05.23.05. Львів, 2020. 39 с.
36. Кропивницька Т. П. Концепція еко-ефективних наномодифікованих лужноактивованих композиційних цементів з високою ранньою міцністю // *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2019. № 912. С. 99–107.
37. Кропивницька Т. П., Саницький М. А., Семенів Р. М., Камінський А. Т. Підвищення експлуатаційних властивостей цегляної кладки зовнішніх стін огорожувальних конструкцій // *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т.91, №1. С. 146–151.
38. Кузнецова Т. В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. Стройиздат Москва, 1986. 208 с.
39. Кутателадзе К. С., Габададзе Т. Г., Нергадзе Н. Г. Алунитовые безусадочные, расширяющиеся и напрягающие цементы. Шестой международный конгресс по химии цемента. Том III Цементы и их свойства. Под общ.ред. Болдырева А.С. М.: Стройиздат, 1976. 355 с.
40. Марціх А. С. Гідроізоляційні будівельні розчини на основі портландцементів, модифікованих комплексною добавкою, що містить неочищені вуглецеві нанотрубки : автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.05. Київ, 2016. 23 с.
41. Мишутин А. В. Повышение долговечности и водонепроницаемости стыков сборно-монолитных железобетонных конструкций // *Вісник ОДАБА*. 2000. №2. С. 115-123.
42. Мішутін А. В., Кровяков С. О., Романов О. А. Вплив комплексної добавки суперпластифікатор С-3 + Пенетрон на властивості дрібнозернистого бетону : Збірка наукових статей, Київ. 2006. Випуск 6. С. 257–266.
43. Михайлов В. В., Литвер С. Л. Расширяющийся и напрягающий цементы и самоупражные железобетонные конструкции. М. 1974. 312 с.
44. Мошковская С. В. Разработка составов сухих строительных смесей гидроизоляционного назначения : автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.17.11. М., 2008. 16 с.

45. Мчедлов-Петросян О. П., Филатов Л. Г. Расширяющиеся составы на основе портландцемента. М.: Стройиздат, 1965. 139 с.
46. Негматов З. Ю. Безусадочные и расширяющиеся шлакощелочные вяжущие и бетоны на их основе : автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.05. Киев. 1995. 20 с.
47. Орловський В. М. Тампонажні матеріали, що розширюються при твердінні: монографія. Полтава, 2015. 129 с.
48. Пащенко О. О., Сербін В. П., Старчевська О. О. В'язучі матеріали. К.: Вища школа, 1995. 416 с.
49. Пащенко А. А., Мясникова Е. А., Саницкий М. А. и др. Теория цемента : под ред. А. А. Пащенко. К. : Будівельник, 1991. 169 с.
50. Попруга П. В. Пластифіковані бетонні суміші на основі ГР-2 для ремонту і відновлення залізобетонних конструкцій : дис. канд. наук: спец. 05.23.05. Київ, 2008.
51. Плугин А. Н., Плугин А. А. Коллоидно-химические основы прочности и долговечности бетона и конструкций. *Строительные материалы*. 2007. №7. С. 68–71.
52. Плугин А. Н., Плугин А. А., Калинин О. А., Мирошниченко С. В., Плугин Д. А. [и др.]. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них. Т.2 Теория твердения портландцемента: Київ, 2012. (2). 222 с.
53. Плугин А. Н., Плугин А. А. та ін. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов. Київ, 2011. (1). 333 с.
54. Пушкарьова К. К., Суханевич М. В., Марціх А. С. Гідроізоляційні штукатурні розчини на основі наномодифікованих цементів з добавками алюмосилікатів шаруватої будови // *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2015. №55. С. 42–48.
55. Пушкарьова К. К., Суханевич М. В., Марціх А. С. Портландцементні розчини, модифіковані вуглецевими нанотрубками, як основа для створення гідроізоляційних покриттів // *«Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка»*. Київ, НДІБМВ, 2013. Вип. 50. С. 31–37.

56. Рамачандран В. Фельдман Р., Бодуен Дж. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение. Москва: Стройиздат, 1986. 278 с.
57. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. С. 152–153.
58. 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.
59. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини: підручник. К.: Основа, 2012. 448 с.
60. Рунова Р. Ф., Носовський Ю. Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів, К.: КНУБА, 2007. 256 с.
61. Русин Б. Г. Високофункціональні бетони на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками : автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.05. Львів, 2014. 21 с.
62. Саницький М. А. Безгипсовые портландцементы с регулируемым временем схватывания. М.: ВНИИЭСМ. 1990. 65 с.
63. Саницький М.А., Марущак У.Д., Кіракевич І.І., Стечишин М.С. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсно-армованих цементуючих систем/*Будівельні матеріали та вироб.* 2015. № 1. С.10–4.
64. Саницький М. А., Соболев Х. С., Марків Т. Є. Модифіковані композиційні цементы. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2010. 132 с.
65. Солодкий С. Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2008. 144 с.
66. Соболев Х. С. Концепція застосування модифікованих композиційних цементів у будівельному виробництві. *Вісник НУ “Львівська політехніка”*: Теорія і практика будівництва. 2004. № 520. С. 179–182.
67. Спосіб визначення міцності зчеплення у кам'яній кладці в лабораторних умовах: пат. 102599 Україна. № u201808833; заявл. 20.08.2018; опубл. 10.11.2015; Бюл. № 21. 4 с
68. Суханевич М. В. Наукові засади отримання гідроізоляційних розчинів на основі цементних композицій, модифікованих вуглецевими нанодобавками : автореф. дис. докт. техн. наук: спец. 05.23.05.Київ, 2020.47 с.

69. Технологический регламент на проектирование и выполнение работ по гидроизоляции и антикоррозионной защите монолитных и сборных бетонных и железобетонных конструкций. СРО «РСПППГ», 2008. 64 с.
70. Тейлор Х. Химия цемента. М.: Мир, 1996. 560 с.
71. Троян В. В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Ніжин: Аспект-Поліграф, 2010. 228 с.
72. Ушеров-Маршак А. В., Кабусь А. В. Функционально-кинетический анализ влияния добавок на твердение цементов // *Неорганические материалы*. 2016. Том 52, № 4. С. 479–484.
73. Хигерович М. И., Байер В. Е. Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, бетонов и растворов. М.: Стройиздат, 1979. 202 с.
74. Хохряков О. В. Безусадочный цементный раствор для омоноличивания стыков железобетонных конструкций : автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.05. Казань, 2006. 17 с.
75. Чмель Г. В. Модифицирование расширяющихся вяжущих веществ с целью управления собственными деформациями и прочностью бетонов : автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.05. Ростов-на-Дону. 2004. 24 с.
76. Шейкин А. Е., Якуб Т. Ю. Безусадочный портландцемент. М.: Изд-во литературы по строительству. 1966. 104 с.
77. Шейніч Л. О., Попруга П. В. Високоміцні бетони на основі портландцементу, модифікованого сульфатзалізовміщуючою добавкою для ремонту та відновлення залізобетонних конструкцій // *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. К.: НДІБК, 2007. Вип. 67. С.492–499.
78. Шейніч Л. О., Приймаченко А. С., Пушкарьова К. К. Вплив алюмосилікатного компоненту на усадку та тепловиділення бетону // *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2015. Вип. 56. С. 131–136.
79. Шпынова Л. Г., Чих В. И., Саницкий М. А. и др. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня. Львов: Вища школа, 1981. 160 с.

80. Штарк Й. Щелочная коррозия бетона : пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. К., 2010. 166 с.
81. Штарк Й., Бернд В. Долговечность бетона : пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. К.: Оранта, 2004. 301 с.
82. Штарк Й., Бернд В. Цемент и известь : пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. К.: Оранта, 2008. 480 с.
83. Щелочные и щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны. Под общ. ред. В. Д. Глуховского. Киев: Вища школа, 1979. 232 с.
84. Якимечко Я. Б. Фізико-хімічні та технологічні засади підвищення ефективності використання негашеного вапна у композиційних в'язучих системах : автореф. дис. д-ра тех. наук: спец. 05.17.11. Львів. 2013. 39 с.
85. Andersen M. D., Jakobsen H. J., Skibsted J. Characterization of white Portlandcement hydration and the C–S–H structure in the presence of sodium aluminate by ^{27}Al and ^{29}Si MAS NMR spectroscopy // *Cem. Concr. Res.* 2005. Vol. 34(5). P. 857-868.
86. 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.
87. Christensen A. N., Jensen T. R., Hanson J. C. Formation of ettringite, AFt, and monosulfate, AFm, in hydrothermal hydration of Portland cement and of calcium aluminum oxide–calcium sulfate dihydrate mixtures studied by in situ synchrotron X-ray powder diffraction // *J. Solid State Chem.* USA, 2004, 51 p.
88. Chludzynski S., Garbacik A. Cementy wieloskladnokowe w budownictwie. SPC, Krakow, 2008. 125 s.
89. Davidovits J., Geopolymer. Chemistry and Applications, Institut Geopolymere, Saint-Quentin, France. 2008.
90. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Stepasyuk Y., Ribakov Y. A method for design of high strength concrete composition considering curing temperature and duration / *Construction and Building Materials*, 2018, 186, P. 731–739.

91. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Sonebi M., Marchuk V., Stepasiuk Y. Improving Concrete and Mortar Using Modified Ash and Slag Cement. Taylor & Francis, 2020. 194 p.
92. Donatello S., Fernandez-Jimenez A., Palomo A. Very High Volume Fly Ash Cements. Early Age Hydration Study Using Na₂SO₄ as an Activator // *Journal Am. Ceram. Soc.* 2013. Vol. 96. 3. P. 900–906.
93. 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.
94. Fernandez-Jimenez A., García-Lodeiro I., Palomo A. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials // *Journal of Materials Science*. 2007. Vol. 42. P. 3055–3065.
95. Giergiczny Z. Fly ash and slag // *Cement and Concrete Research*. 2019. 124. P. 1–18.
96. Gwenn Le Saoût, Barbara Lothenbach, Akihiro Hori. Hydration mechanism of quick hardening cement based on OPC blended with an amorphous calcium aluminate // *Conference: 18. Internationale Baustofftagung (ibausil)*, Weimar, Germany, 2012. Band 2. 8 p.
97. José Antônio da Silva Sousa, Mônica Silva Serra Leandro. Formation study and influence of tricalcium aluminate (TCA) on the polishing process of green liquor. 9 p.
98. Han J., Wang K., Shi J., Wang Y. Influence of sodium aluminate on cement hydration and concrete properties // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 64. P. 342–349.
99. Kanchanason V., Plank J. Effect of calcium silicate hydrate – polycarboxylate ether (C-S-H-PCE) nanocomposite as accelerating admixture on early strength enhancement of slag and calcined clay blended cements // *Cement and Concrete Research*. 2019. 119. P. 44–50.
100. Kavalerova E. S. Alkali-activated cement production and «best available techniques» // *17th Ibausil, Internationale Baustofftagung*, Weimar, 2009. Band 1. P. 0469–0475.

101. Kovalchuk O., Grabovchak V., Govdun Y. Alkali activated cements mix design for concretes application in high corrosive conditions // *MATEC Web of Conferences*. 2018. 230, 03007. 7 p.
102. Krivenko P., Sanytsky M., Kropyvnytska T. Alkali-Sulfate Activated Blended Portland Cements // *Solid State Phenomena*. 2018. № 276. P. 9–14.
103. Krivenko P., Rudenko I., Petropavlovsky O. et. al. Alkali-activated Portland cement with adjustable proper deformations for anchoring application. Alkali TRANSBUD-2019IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. 2019. 708. P. 1–8.
104. Krivenko P. Alkaline Cements: Terminology, Classification, Aspects of Durability. Proceed. 10-th Intern. Congress on the Chemistry of Cement, Göteborg, Sweden, 1997. P. 46–50.
105. Krivenko P. V., Petropavlovskyi O. M., Rudenko I. I., Konstantynovskyi O. P. and Kovalchuk A. V. Complex multifunctional additive for anchoring grout based on alkali-activated portland cement // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 907. P. 012055.
106. Krivenko P., Petropavlovskii O., Vozniuk H., Lakusta S. The development of alkali-activated cement mixtures for fast rehabilitation and strengthening of concrete structures // *Procedia Engineering*. 2017. 195. P. 142–146.
107. Krivenko P., Sanytsky M., Kropyvnytska T. The effect of nanosilica on the early strength of alkali-activated portland composite cements // *Solid State Phenomena*. 2018. 296. P. 21–26.
108. 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.
109. Kryvenko P., Sanytsky M., Kropyvnytska T., Kotiv R. Decorative multi-component alkali activated cements for restoration and finishing works // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 897. P. 45–48.
110. Król M., Tur W. Beton ekspansywny. Warszawa: Arkady, 1999. 240 s.
111. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucinska T., Rykhlytska 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.
112. Kropyvnytska T., Semeniv R., Chekaylo M., Kaminsky A. Impact of modifiers on the properties of brick masonry construction // *The international journal Sustainable development*. 2018. Vol. 2. P. 77–82.
113. Kropyvnytska T., Semeniv R., Kotiv R., Kaminsky A., Gots V. Studying the effect of nano-liquids on the operational properties of brick building structures // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5/6(95). P. 27–32.
114. Kurdowski W. Chemia cementu i betonu. *Wyd. Polski Cement*. 2010. 728 s.
115. Lukowski P. Modyfikacja materiałowa betonu. SPC, Kraków, 2016. 365 s.
116. Małolepszy J., Deja J., Brylicki W., Gawlicki M. Technologia betonu // *Uczelniane wydawnictwa naukowo-dydaktyczne*. Kraków, 2000. 326 s.
117. Middendorf B., Singh N. B. Nanoscience and nanotechnology in cementitious materials // *Cement international*. 2006. № 4. P. 80–86.
118. Mir Z. M., Bastos A., Höche D., Zheludkevich M. L. Recent Advances on the Application of Layered Double Hydroxides in Concrete—A Review // *Materials* (Basel). 2020. 13(6). P. 1426.
119. Morioka M., Higuchi T., Hori A., Sakai E. Characteristics of Rapid - Hardening Mortar Added with Amorphous Calcium Aluminate // *Innovationen in Bauchemie und Lackchemie*. 2008. P. 263–271.
120. Mori T., Eguchi M., Fujita K., and Dr. Morioka M. Microstructures of Hydrated Calcium Sulfoaluminates Observed with 3D Visualization of SEM Photograph: 2209 Omi, Itoigawa 949-0393, Japan.
121. Mori T., Higuchi T., Dr. Morioka M., and Dr. Hori A. Effects of Amorphous Calcium Aluminate/Anhydrite Addition on the Hydration Reaction of Ordinary Portland Cement: 2209 Omi, Itoigawa 949-0393, Japan.
122. N’guadi B. A., Pinky S., Angana B., Rajib L. G. Hybrid nanocomposites of layered double hydroxides: an update of their biological applications and future prospects // *Colloid and Polymer Science*. 2017. Vol. 295. P. 725–747.
123. Neville A. M. Właściwości betonu. Kraków: Polski Cement, 2000. 874 s.

124. Paglia C., Wombacher F., Böhnia H. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems: Influence of the temperature on the sulfate attack mechanisms and damage // *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, Issue 3. P. 387–395.
125. Palomo A., Grutzeck M. W., Blanco M. T. Alkali-activated fly ashes. A cement for the future // *Cement and Concrete Research*. 1999. Vol. 29. P. 1323–1329.
126. Palomo A., Krivenko P., Garcia-Lodeiro I. et. al. A review on alkaline activation: new analytical perspectives // *Materiales de Construcción*. 2014. Vol. 64, Issue 315. 22 p.
127. Plank J. Concrete Admixtures – Where Are We Now and What Can We Expect in the Future? 19th Internationale Baustofftagung, Weimar, Germany. 2015. Band 2. P. 11–17.
128. Plugin A. A., Runova R. F. Bonding calcium chloride and calcium nitrate into stable hydration portland cement products: Stability conditions of calcium hydrochloraluminates and calcium hydronitroaluminates // *International Journal of Engineering Research*, 2018. 36. P. 69–73.
129. Provis J. Alkali-activated materials // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. P. 40–48.
130. Pushkareva K. K., Gonchar O. A., Kaverin K. O. The role of the crystallo-chemical factor in the evaluation and improvement of the nanomodification efficiency of mortar and concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 708. P. 012102.
131. Pushkarova K., Plugin A., Sukhanevych M. The study of the processes of structure formation in the system "portland cement-carbon nanotubes-surfactant" from the point of view of physicochemical mechanics of dispersed systems . Tech Publications Ltd, Switzerland, 2020. 864. P.158-163.
132. Qi Xu, J. Stark. A model of early cement hydration with an alkaline setting accelerator // *Cement international*. 2008. P. 68-72.
133. Qi Xu, Roessler C., Stark J., Wang P.. Effect of an Alkaline Set Accelerator on Normal Portland Cement Paste in the Presence of a Superplasticizer // *7-th CANNET Symposium Paper*. Berlin, 2003. Vol. 217. P. 409–422.

134. Qian J., Shi C., Wang Z. Activation of blended cements containing fly ash // *Cem. Concr. Res.* 2001. Vol. 31. P. 1121–1127.
135. Robertson K. The use of shotcrete as a repair process for structural concrete repair // *Concrete repair bulletin*, 2015. P. 34-39.
136. Salvador R. P., Cavalaro S. H. P., Segura I., Figueiredo A. D., Pérez J. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 111. P. 386–398.
137. Sanytsky M. Alkaline portland cements. *Alkaline cements and concretes*. Kyiv, 1999. P. 315–336.
138. Sanytsky M., Fischer H.-B., Kropyvnytska T., Geviuk I. Effects of gypsum and alkali metals salts interaction on the properties of cementitious materials // *Weimar Gipstagung: Bauhaus, Universitat Weimar*, 2014. P. 203–210.
139. Savchuk Y., Plugin A., Lyuty L., Pluhin O., O. Borziak Study of influence of the alkaline component on the physico-mechanical properties of the low clinker and clinkerless waterproof compositions // *MATEC Web of Conferences*. 2018. № 230. P. 03018.
140. Semeniv R., Kaminsky A. Efficiency of the Modifiers Use for Protection of Brick Structures. *LEA`2018 «GAC»*. 2018. P. 111-112.
141. Schneider M. The cement industry on the way to low-carbon future // *Cem. Concr. Res.* 2019. 124. P. 1–19.
142. Szymanowski J., Sadowski Ł. The Development of Nanoalumina-Based Cement Mortars for Overlay Applications in Concrete Floors // *Materials*. 2019. 12, 3465. 20 p.
143. Sheng Y., Xue B., Li H. et al. Preparation and Performance of a New-Type Alkali-Free Liquid Accelerator for Shotcrete // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. 9 p.
144. Shi C., Krivenko P. V., Roy D. M. *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor & Francis, Abingdon, UK. 2006.
145. Valente M., Sibai A. Rubbercrete: Mechanical properties of scrap to reuse tire-derived rubber in concrete. A review. *Appl. Biomater. Funct. Mater.* 2019. 17, P. 1–8.

146. Xiao-bin LI, Dong-feng ZHAO, Shuai-shuai YANG, Dan-qin WANG, Qiu-sheng ZHOU, Gui-hua LIU. Influence of thermal history on conversion of aluminate species in sodium aluminate solution // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 24, Issue 10. P. 3348–3355.
147. Xu Q., Roessler C., Stark J., and Wang P. Effect of an Alkaline Set Accelerator on Normal Portland Cement Paste in the Presence of a Superplasticizer. Symposium Paper 7-th CANNMET/ACI, Berlin, 2003. P. 409–421.
148. Xu Qi, Stark J. A model of early cement hydration with an alkaline setting accelerator // *Cement international*. 2008. № 1. P. 67–74.
149. Yanping Sh., Bin Xue, Haibin Li, Yunyan Qiao, Huaxin Chen, Jianhong F. and Anhua Xu. Preparation and Performance of a New-Type Alkali-Free Liquid Accelerator for Shotcrete *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017(5). P. 1–9.
150. Yong-Soo Leea, Dae-Sung Lima, Byung-Sik Chunb and Jae-Suk Ryou. Characterization of a sodium aluminate(NaAlO_2)-based accelerator made via a tablet processing method // *Journal of Ceramic Processing Research*. 2013. Vol. 14, No. 1, P. 87–91.
151. Ying Qiu, Bei D., Jiezhong G., Zhaolai G., Chunyang Zh. and Haidong J. Mechanism and preparation of liquid alkali-free liquid setting accelerator for shotcrete // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2017. 182. P. 012034.
152. Zhang L., Li S., Yan Q., Zhu L. Study on the effect of new type liquid accelerator on the performance of shotcrete // *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2017. 41. P. 356–368.

Додаток А**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ****Статті у наукових фахових виданнях України**

1. Кропивницька Т., Саницький М., Семенів М., Камінський А. Підвищення експлуатаційних властивостей цегляної кладки зовнішніх стін огорожувальних конструкцій. Науковий вісник будівництва. 2018. Т.91, №1. С. 146–151.
2. Камінський А. Використання лужного прискорювача на основі алюмінату натрію в технології бетону. Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 57–62.

Стаття у науковому періодичному виданні, що включене до міжнародних наукометричних баз

3. Kropyvnytska T., Semeniv R., Kotiv R., Kaminskyu A., Gots V. Studying the effect of nano-liquids on the operational properties of brick building structures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 5/6(95). P. 27–32. ISSN 1729-3774. SCOPUS. (DOI: 10.15587/1729-4061.2018.145246).

Стаття у науковому виданні, інших держав

4. Kropyvnytska T., Semeniv R., Chekaylo M., Kaminskyu A. Impact of modifiers on the properties of brick masonry construction. The international journal Sustainable development. 2018. Vol. 2. P. 77–82.
5. Kropyvnytska T., Kaminskyu A., Semeniv R., Chekaylo M. The effect of sodium aluminate on the properties of the composite cements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (TRANSBUD-2019), 708 012091. (Scopus).
6. Кропивницька Т., Семенів Р., Камінський А. Вплив нанорідин на стійкість зовнішніх цегляних стін будівель і споруд щодо висолоутворення // Збірник тез доповідей II міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». Харків, 2018. С.127-128.
7. Кропивницька Т., Семенів Р., Камінський А., Гоц В. Ефективність використання модифікуючих речовин для захисту цегляних конструкцій // Тези доповідей 7-ої міжнародної науково-технічної конференції. Харків, 2018. С. 195–197.

8. Semeniv R., Kaminskyu A. Efficiency of the Modifiers Use for Protection of Brick Structures // LEA`2018 «GAC». 2018. P. 111-112.

9. Камінський А., Кропивницька Т., Семенів Р. Модифіковані бетони для ремонту конструкцій та споруд // Тези доповідей 8-ої міжнародної науково-технічної конференції. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 153–154.

10. Semeniv R., Kropyvnytska T., Kaminskyu A. Studying the effects of nano-liquids on the operational properties of brick structures. International Seminar on Circular Economy and Sustainability in Civil Engineering 2020 P. 21–22.

11. Камінський А. Система гідроізоляційних матеріалів «Мегатрон» // Будексперт, Львів, 2020. № 02. С. 46.

Патент

12. Пат. 1344106 Україна. Спосіб визначення міцності зчеплення у кам'яній кладці в лабораторних умовах. Т. П. Кропивницька, Р. М. Семенів, А. Т. Камінський. – u 201808833; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 21. 4 с.

Додаток Б

ДКПП 23.51.12

УКНД 91.100.50

ЗатверджуюДиректор ФІТ «Терміт»
Камінський Т.В.**Затверджую**Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
І.В. Демидов

**Модифіковані швидкотверднучі ремонтні суміші
на основі лужного портландцементу**

Технічні умови

ТУ У 23.5-02071010-178:2020

(проект)

Без обмеження терміну дії

Розроблено:Завідувач кафедри будівельного виробництва
НУ «Львівська політехніка», д.т.н., проф.

 Саницький М.А.

Доцент кафедри будівельного виробництва, к.т.н.


 Кропивницька Т.П.

Аспірант кафедри будівельного виробництва


 Камінський А.Т.

Львів 2020

ЗМІСТ

	С
1. Сфера застосування	3
2. Нормативні посилання	3
3. Технічні вимоги	4
4. Вимоги до сировинних матеріалів	5
5. Вимоги безпеки, охорони довкілля, утилізування	5
6. Методи контролювання	6
7. Правила приймання	6
8. Транспортування та зберігання	7
9. Гарантії виробника	7
Аркуш реєстрації змін	8

1. СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Дані технічні умови поширюються на модифіковані швидкотверднучі ремонтні суміші, що виготовляються на основі лужного портландцементу з добавками золи-винесення та полікарбоксилатного суперпластифікатора. Модифіковані швидкотверднучі ремонтні суміші використовується в будівництві при здійсненні ремонтних робіт для замонолічування закладних деталей, відновлення пошкодженої поверхні бетону, продовження служби конструкції.

2. НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

В цих технічних умовах є посилання на такі нормативні документи:

ДБН Г.1-4-95	Організаційно-методичні економічні і технічні нормативи. Правила перевезення, складування та зберігання матеріалів, виробів, конструкцій і устаткування в будівництві
ДБН В.1.4-1.01-97	Система норм та правил зниження рівня іонізуючих випромінювань природних радіонуклідів в будівництві. Регламентовані радіаційні параметри. Допустимі рівні.
ДСанПін 2.2.7.029-99	Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення їх класу безпеки для здоров'я населення
ДСП 201-97	Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць від забруднення хімічними та біологічними речовинами
НАПБ А.01.001-2004	Правила пожежної безпеки в Україні
ДСТУ 3273-95	Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги
ДСТУ 3413-96	Система сертифікації УкрСЕПРО. Порядок проведення сертифікації продукції
ДСТУ Б В.2.7-104-2002	Будівельні матеріали. Камінь гіпсовий та гіпсоангідритовий для виробництва в'язучих матеріалів. Технічні умови.

- ДСТУ Б В.2.7-112:2002 Будівельні матеріали. Цементи. Загальні технічні умови.
- ДСТУ Б В.2.7-128:2006 Будівельні матеріали. Добавки активні мінеральні та добавки-наповнювачі до цементу. Технічні умови.
- ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загально будівельного призначення. Технічні умови.
- ДСТУ Б В.2.7-185:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення і рівномірності зміни об'єму
- ДСТУ Б В.2.7-187:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск
- ДСТУ Б В.2.7-202:2009 Будівельні матеріали. Цементи і матеріали цементного виробництва. Методи хімічного аналізу
- ДСТУ EN 196-1 Будівельні матеріали. Методи випробування цементу- Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2005, IDT)
- ДСТУ EN 196-3 Будівельні матеріали. Методи випробування цементу- Частина 3. Визначення строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму (EN 196-3:2005, IDT)
- ДСТУ EN 196-6 Будівельні матеріали. Методи випробування цементу- Частина 6. Визначення тонкості помелу (EN 196-6:1989, IDT)
- ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (ССБП. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони)
- ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (ССБП. Електробезпека. Загальні вимоги безпеки)
- ГОСТ 12.3.009-76 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности (ССБП. Роботи вантажно-розвантажувальні. Загальні вимоги безпеки)
- ГОСТ 12.3.020-80 ССБТ. Процессы перемещения грузов на предприятиях. Общие требования безопасности (ССБП. Процеси переміщення вантажів на підприємствах. Загальні вимоги безпеки)
- ГОСТ 6613-86 Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия (Сітки дротяні ткані з квадратними чарунками. Технічні умови)

ГОСТ 24297-87	Входной контроль продукции. Основные положения (Вхідний контроль продукції. Основні положення)
СНиП III-4-80	Техника безопасности в строительстве (Техника безпеки в будівництві)

3. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

3.1. Суміші повинні відповідати вимогам цього стандарту і виготовляться за технологічними регламентами та рецептурами, що затверджені виробником в установленому порядку.

3.2. Вологість сумішей не повинна перевищувати 0,5 % за масою.

3.3. Водоутримувальна здатність розчинових сумішей, отриманих із застосуванням сухих сумішей, не повинна бути менше 95 %.

3.4. За зовнішнім виглядом суміш повинна являти собою однорідний за кольором порошок, який не має видимих неозброєним оком сторонніх включень. Колір розчину, якщо це вказано в замовленні, повинен відповідати кольору зразка, затвердженому виробником у встановленому порядку.

3.5. Матеріали, які входять до складу сумішей, повинні відповідати за своїми властивостями вимогам нормативних документів, зазначеним у рецептурі, та бути дозволеними до використання центральним органом виконавчої влади у сфері охорони здоров'я.

3.6. Для отримання розчинової суміші слід використовувати воду згідно з ГОСТ 23732 або ДСанПІН 2.2.4-171 та ГОСТ 2874.

3.7. Умовне позначення ремонтних сумішей:

- Швидкотверднуча безусадочна ремонтна суміш для анкерування

ШРБС-АН 1 ТУ У 23.5-02071010-178:2020

- Ремонтна розширна суміші РРС ТУ У 23.5-02071010-178:2020

4. ВИМОГИ ДО ВИХІДНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ РЕМОНТНИХ СУМІШЕЙ

4.1. Для виготовлення швидкотверднучої безусадочної ремонтної суміші використовуються сировинні матеріали – сірий портландцемент (ДСТУ Б В.2.7-46:2010), активні мінеральні добавки (ДСТУ Б В.2.7-128:2006), гіпсовий камінь (ДСТУ Б В.2.7-104-2000), добавки пластифікуючої дії (ДСТУ Б В.2.7-171:2008), лужний компонент (ТУ У 20.5-20841500-01:2018).

4.2. Лужний портландцемент для швидкотверднучих безусадочних ремонтних сумішей повинен відповідати вимогам цих технічних умов та виготовлятися відповідно ДСТУ Б В.2.7-181:2009 та технологічної документації, затвердженої в установленому порядку.

4.3. Лужний портландцемент повинен відповідати наступним вимогам:

4.4. При умовному позначенні ремонтних сумішей цементу згідно ДСТУ Б В.2.7-181:2009 вказується номер даних технічних умов.

4.5. Портландцементний клінкер, хімічний склад якого відповідає технологічному регламенту, застосовується згідно з нормативними документами, чинними в Україні.

4.6. Допускається також із метою підвищення активності, корозійної стійкості цементів та запобігання висолоутворенню вводити в їх склад природні та дегідратовані глини (наприклад, метакаолін) в кількості не більше 10% від маси цементу.

4.7. У разі виготовлення лужного цементу шляхом помелу компонентів (шлаку, золи, клінкеру тощо) з наступним замішуванням їх розчинами сполук лужних металів - натрію чи калію, поставка алюмосилікатних та лужних компонентів повинна здійснюватися комплектно, але без їх змішування.

4.8. Початок тужавіння лужного портландцементу повинен наставати не раніше 30 хв, а кінець не пізніше 10 год від початку замішування.

4.9. Водовідділення цементного тіста, приготовленого при водоцементному відношенні (В/Ц), що дорівнює 1, повинно бути не більше 5 % за об'ємом.

4.10. Міцність на стиск цементів ШБРШ через 6 год повинна бути відповідно не менше 10-12 МПа, а через 28 діб – не менше 80-85 МПа.

4.11. Допускається використання інших подібних сировинних матеріалів, які відповідають вимогам чинних в Україні нормативних документів.

4.12. Ефективна сумарна питома активність природних радіонуклідів у сировинних матеріалах, що застосовуються, не повинна перевищувати 370 Бк/кг (1 клас використання) згідно ДБН Б.1.4-1.01.

4.13. Сировинні матеріали повинні бути дозволені до використання центральним органом виконавчої влади України в сфері охорони здоров'я і відповідати документам про якість.

5. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ, УТИЛІЗУВАННЯ

5.1. Модифікована швидкотверднуча ремонтна суміш, є пожежовибухобезпечною речовиною, не утворює токсичних сполук в повітряному середовищі та стічних водах (слаболужна реакція).

5.2. Гранично допустима концентрація (ГДК) цементного пилу в повітрі робочої зони не повинна перевищувати 6 мг/м³ згідно ГОСТ 12.1.005.

5.3. Виробництво модифікованої швидкотверднучої ремонтної суміші необхідно здійснювати з виконанням вимог ДСТУ 3273 та Закону України «Про охорону праці».

5.4. У виробничих приміщеннях необхідно дотримуватись правил пожежної безпеки згідно з НАПБ А.01.001 та електробезпеки згідно ГОСТ 12.1.19.

5.5. Вантажно-розвантажувальні роботи необхідно здійснювати відповідно вимог СНиП III-4, ГОСТ 12.3.009, ГОСТ 12.3.020.

5.6. Вміст шкідливих речовин у викидах вентиляційних установок в атмосферне повітря не повинен перевищувати норм граничнодопустимих викидів (ГДВ) та має контролюватись згідно з ДСП 201.

5.7. При виробництві модифікованої швидкотверднучої ремонтної суміші відходи, придатні до повторної переробки, повертаються в технологічний цикл.

6. ПРАВИЛА ПРИЙМАННЯ

6.1. Приймально-здавальні випробування та оцінювання якості модифікованої швидкотверднучої ремонтної суміші здійснюють відповідно до ДСТУ Б В.2.7-124-2004.

6.2. Вхідний контроль сировинних матеріалів виробник проводить згідно з вимогами ГОСТ 24297 та з переліком матеріалів, що підлягають вхідному контролю.

6.3. Сертифікаційні модифікованих швидкотверднучих ремонтних сумішей проводять згідно ДСТУ 3413 та ДСТУ Б В.2.7-124-2004.

7. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

7.1. Контроль якості модифікованої швидкотверднучих ремонтних сумішей проводять згідно з ДСТУ Б В.2.7-185:2009, ДСТУ Б В.2.7-187:2009, ДСТУ Б В.2.7-112.

Допускається за вимогою споживача додатково проводити фізико-механічні випробування цементів за EN 196.

7.2. Хімічний аналіз модифікованих швидкотверднучих ремонтних сумішей здійснюють згідно з методами ДСТУ Б В.2.7-202:2009 або європейськими методиками визначення кальцію оксиду (CaO).

7.3. Наявність ознак хибного тужавіння перевіряють за галузевою інструкцією.

8. ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ

8.1. Модифіковані швидкотверднучі ремонтні суміші транспортують згідно з ДБН Г.1-4, ДСТУ Б В.2.7-112 усіма видами транспорту із дотриманням правил перевезення вантажу.

8.2. Умови вантажно-розвантажувальних робіт та транспортування повинні забезпечувати збереження модифікованих швидкотверднучих ремонтних сумішей від забруднення.

8.3. Транспортування і зберігання модифікованої швидкотверднучої ремонтної суміші повинно відповідати вимогам ДБН Г.1-4.

9. ГАРАНТІЇ ВИРОБНИКА

9.1. Виробник гарантує відповідність модифікованих швидкотверднучих ремонтних сумішей вимогам даних технічних умов за умови дотримання правил транспортування, зберігання та використання.

9.2. Гарантійний термін зберігання модифікованих швидкотверднучих ремонтних сумішей – 60 діб від дати відвантаження. Поставка алюмосилікатних та лужних компонентів здійснюється комплектно, але без їх змішування.

Додаток В



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «Теріос»

Гунченко С.В.

«__» _____ 2020 р.

АКТ

про впровадження швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші для
замонолічування закладних анкерних деталей

Ми, що нижче підписалися, директор ТОВ «Теріос» Гунченко С.В. та представники Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., проф. Саницький М.А., к.т.н., доц. Кропивницька Т.П., аспірант Камінський А.Т. склали даний акт про те, що в червні 2020 р. ТОВ «Теріос» здійснено апробацію швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші ШРБС АН-1 ТУ У 23.5-02071010-178:2020 для замонолічування закладних анкерних деталей під час відновлення фундаменту колон на території елеватору **ТОВ "АГРІНГРУП"** за **адресою:** Харківська область, Барвінківський район, місто Барвінкове, вулиця Соборна 24. Загальний об'єм швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші склав 1000 кг.

Для одержання швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші застосовували лужний портландцемент АСЕМ 42,5 R, органо-мінеральну добавку на основі золи винесення Бурштинської ТЕЦ та полікарбоксилатного суперпластифікатора PCE MasterGlenium ACE 430 BASF. В якості дрібного заповнювача використано кварцовий пісок фракції до 0,63 мм.

Швидкотверднучу безусадочну ремонтну суміш готували у змішувачі типу ЗЛ-300 К на ПП «Терміт». Результати випробувань швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші ШРБС АН-1 на основі лужного портландцементу представлені у табл. 1.

Таблиця 1

**Результати випробувань швидкотверднучої ремонтної
безусадочної суміші ШРБС АН-1**

Показник	Значення	
В/Ц	0,34	
Середня густина, кг/ м ³	2162	
Термін придатності, хв	20	
Осідання конуса, мм	70	
Міцність на згин/стиск, МПа, у віці, діб	6 год	3,0/12,0
	1	7,5/28,0
	28	11,5/78,4
Міцність зчеплення з основою, МПа	4,5	
Усадка, мм/м	0,02-0,04	
Марка за морозостійкістю	F400	

Високоєфективні склади швидкотверднучої безусадочної ремонтної суміші на основі лужного портландцементу з органо-мінеральною добавкою (зола-винесення + полікарбоксилатний суперпластифікатор) забезпечують високу швидкість тверднення, понижені деформації усадки-розширення ($\Delta l/l=0,05-0,08\%$), адгезію, морозостійкість, а також довговічність.

Акт підписали:

директор ТОВ «Теріос»

Гунченко С.В.

Представники Національного університету «Львівська політехніка»:

д. т. н., професор

Саницький М. А.

к. т. н., доцент

Кропивницька Т. П.

аспірант

Камінський А.Т.

Додаток Г



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ТОВ «Теріос»
 Гунченко С.В.
 19 05 2020 р.

АКТ

про впровадження швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші ШРБС РМ-2 на основі лужного композиційного портландцементу

Ми, що нижче підписалися, директор ТОВ Теріос Гунченко С.В. та представники Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., проф. Саницький М.А., к.т.н., доц. Кропивницька Т.П., аспірант Камінський А.Т. склали даний акт про те, що в травні 2020 р. проведено впровадження дослідної партії швидкотверднучої безусадочної ремонтної суміші ШРБС РМ-2 ТУ У 23.5-02071010-178:2020 для відновлення структурно-пошкоджених елементів бетонних конструкцій фундаменту силосів на території елеватору **ТОВ "АГРИНГРУП"** за адресою: Харківська область, Барвінківський район, місто Барвінкове, вулиця Соборна 24. Загальний об'єм швидкотверднучої ремонтної безусадочної суміші склав 2000 кг.

Для одержання швидкотверднучої безусадочної ремонтної суміші застосовували лужний композиційний портландцемент з високою ранньою міцністю АСЕМ П/В-М(S-P-L) 42,5R, кварцовий поліфракційний пісок (Mк=1,87) та полікарбоксилатний пластифікатор PCE Sika 1020. Швидкотверднучу безусадочну ремонтну суміш готували у змішувачі типу ЗЛ-300 К на ПП «Терміт» та доставляли в герметичних відрах.

Показники якості швидкотверднучої безусадочної ремонтної суміші на основі лужного композиційного портландцементу: термін придатності - 30 хв, консистенція (осідання плунжера) – 23 мм, рання міцність на стиск – 22,4 МПа, проектна міцність – 52,9 МПа, міцність зчеплення з основою – 3,8 МПа, усадка – 0,2-0,3 мм/м, марка за морозостійкістю F300

Супроводжуючий контроль на всіх етапах проведення робіт показав, що технологія ремонту будівельних конструкцій цементною композицією із добавкою алюмінату натрію дозволяє відновити пошкоджені залізобетонні конструкції. Отримуємо можливість для відновлення та реставрації пошкодженого бетону, особливо це стосується щільноармованих конструкцій складної форми.

Директор ТОВ «Теріос»

д. т. н., професор

к. т. н., доцент
 аспірант

Гунченко С.В.

Саницький М. А.

Кропивницька Т. П.
 Камінський А.Т.

Додаток Д



АКТ

про впровадження швидкотверднучої розширної ремонтної суміші на основі лужного портландцементу

Ми, що нижче підписалися, представники ПП «Терміт» – директор Камінський Т.В. та представники Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., проф. Саницький М.А., к.т.н., доц. Кропивницька Т.П. аспірант Камінський А.Т. склали даний акт про те, що в вересні 2019 р. проведено впровадження дослідної партії швидкотверднучої розширної ремонтної суміші для герметизації швів між блоками фундаменту та при введенні комунікацій в будівлю в кількості 1600 кг.

В якості компонентів для спеціальних ремонтних розширних сумішей застосовано модифікований лужний портландцемент АСЕМ 42,5 та комплексну розширну добавку «CaO - Na[Al(OH)₄] – CaSO₄·2H₂O». Розширна ремонтна суміш характеризувалась наступними показниками: термін придатності – 20-30 хв, міцність на стиск через 2 доби – 26,0 МПа, проектна міцність – 45–49 МПа, міцність зчеплення з основою 2,5–3,0 МПа. Технологія виконання ремонтних робіт дозволяє здійснити герметизацію конструкцій із середини приміщення.

В процесі ремонту відновлено герметичність підвальної частини житлової будівлі (м. Львів, вул. Пасічна, 167). При цьому було вирішено технологічні завдання забезпечення герметичності та водонепроникності. Технологія проведення робіт не відрізнялась від стандартної, прийнятої на ПП «Терміт».

Акт підписали:
від ПП «Терміт»
виконроб

Сенчишин М.М

від Національного університету «Львівська політехніка»

д. т. н., професор
к. т. н., доцент
аспірант

Саницький М. А.
Кропивницька Т. П.
Камінський А.Т.

Додаток Е



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ТОВ «РУУФ»

Сало М.В.

«21» березня 2019 р.

АКТ

про впровадження гідроізоляційної безусадочної ремонтної суміші

Ми, що нижче підписалися, директор ТОВ «РУУФ» Сало М.В. та представники Національного університету «Львівська політехніка» к.т.н., доц. Кропивницька Т.П. та аспірант Камінський А.Т. склали даний акт про те, що в березні 2019 р. ТОВ «РУУФ» здійснено апробацію гідроізоляційної безусадочної ремонтної суміші з добавкою на основі $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ ТМ «Мегатрон» при виконанні гідроізоляції фундаменту (площа 440 м^2) офісного центру (м. Львів, пл. Петрушевича, 5) із вирішенням завдання підвищеної водонепроникності та корозійної стійкості. Загальний об'єм гідроізоляційної безусадочної ремонтної суміші склав 750 кг.

Для одержання гідроізоляційної безусадочної ремонтної суміші застосовували портландцемент композиційний класу міцності 32,5, добавку на основі $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ ТМ «Мегатрон», органо-мінеральну добавку (зола винесення + полікарбоксилатний суперпластифікатор PCE Sika 1020) та кварцовий пісок ($M_k=1,87$).

Довговічність покриття забезпечується поєднанням органо-мінеральної добавки та лужного алюмінійвмісного активатора $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$. Гідроізоляційна ремонтна суміш з добавкою на основі $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ ТМ «Мегатрон» характеризувалась наступними показниками: термін придатності – 60 хв, консистенція (осідання плунжера) – 32 мм, рання міцність на стиск через 1 добу – 14,5 МПа, проектна міцність – 44,6 МПа, міцність зчеплення з основою – 3,4 МПа, усадка – 0,3 мм/м, марка за водонепроникністю W14 та підвищеною корозійною стійкістю ($K_{s0}=1,2$). Технологія виконання ремонтних робіт дозволяє здійснити нанесення модифікованої ремонтної суміші на поверхню фундаменту для створення водонепроникного та довговічного гідроізоляційного покриття.

Акт підписали:
директор ТОВ «РУУФ»

Сало М.В.

Представники Національного університету «Львівська політехніка»:

к. т. н., доцент

Кропивницька Т. П.

аспірант

Камінський А.Т.

Додаток Є

2 Програмний комплекс АВК-5 (3.4.1)
Будова - Капітальний ремонт
Об'єкт - Капітальний ремонт

- 2 -

1_СД_ЛСКЛ_2-1-1

Розрахунок одиничної вартості

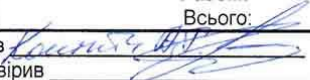
РН20-18-11 Готування ремонтних безусадочних сумішей на основі лужного портландцементу (РБС-3)

Склад робіт: Дозування та завантаження складових з перемішуванням. Видача готового матеріалу. Очищення змішувачів з промиванням водою.

Вимірник : 100м3

Складений в поточних цінах станом на 10 вересня 2020 року

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата				
		Витрати труда робітників - будівельників	люд.-год	398,4	16,83	6705,07
		Середній розряд робіт - 2,0				
2		Вартість експлуатації машин і механізмів				
	СН211-901-1	Розчинозмішувачі пересувні, місткість 150 л	маш.-год	44,95	18,40	827,08
			люд.-год	47,1975	14,79	698,07
		Середній розряд робіт - 3,0				
		Разом:				827,08
		в т.ч. зарплата машиністів				698,07
4		Вартість матеріалів, виробів і конструкцій				
	C111-3321	Полікарбоксилатний пластифікатор PCE (BASF)	т	0,03	118414,93	3552,45
	C111-6241	Тетрагіроксоалюмінат натрію Na[Al(OH)4]	т	0,39	71529,71	27896,59
	C111-13171	СЕМ II/A-LL 42.5 R	т	30	3263,22	97896,60
	C111-15711	Нітрат кальцію	т	0,039	35797,76	1396,11
	C142-10-2	Вода	м3	105	8,55	897,75
	C1421-9551-11	Пісок кварцевий Мк=1,87	т	123	270,60	33283,80
	C1421-9699-41	Зола винесення	м3	3	586,51	1759,53
		Разом:				166682,83
		Всього:				174214,98

Склад 
Перевірів _____

Продовження додатку Є

2 Програмний комплекс АВК-5 (3.4.1)
 Будова - Капітальний ремонт
 Об'єкт - Капітальний ремонт

- 1 -

1_СД_ЛСКЛ_2-1-1

Розрахунок одиничної вартості

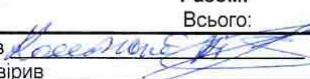
РН20-18-12 Готування ремонтних розширних сумішей на основі лужного портландцементу

Склад робіт: Дозування та завантаження складових з перемішуванням. Видача готового матеріалу. Очищення змішувачів з промиванням водою.

Вимірник : 100м3

Складений в поточних цінах станом на 10 вересня 2020 року

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата				
		Витрати труда робітників - будівельників	люд.-год	398,4	16,83	6705,07
		Середній розряд робіт - 2,0				
2		Вартість експлуатації машин і механізмів				
	СН211-901-1	Розчинозмішувачі пересувні, місткість 150 л	маш.-год	44,95	18,40	827,08
			люд.-год	47,1975	14,79	698,07
		Середній розряд робіт - 3,0				
		Разом:				827,08
		в т.ч. зарплата машиністів				698,07
4		Вартість матеріалів, виробів і конструкцій				
	С111-253-1	Вапно будівельне негашене, сорт 1	т	7,5	20493,99	153704,93
	С111-2191	Двоводний гіпс	т	11	998,82	10987,02
	С111-6241	Тетрагіроксоалюмінат натрію Na[Al(OH)4]	т	0,035	71529,71	2503,54
	С111-13171	СЕМ ІІ/А-LL 42.5 R	т	26	3263,22	84843,72
	С142-10-2	Вода	м3	105	8,55	897,75
	С1421-9551-11	Пісок кварцевий Мк=1,87	т	53,4	270,60	14450,04
		Разом:				267386,99
		Всього:				274919,14

Склад 
 Перевірів _____

Додаток Ж



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор

з науково-педагогічної роботи

Давидчак О.Р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Камінського А.Т. на тему
«Ремонтні суміші із підвищеними експлуатаційними властивостями на основі
лужного портландцементу»

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 Камінського А.Т. впроваджені в науковий процес на кафедрі будівельного виробництва, зокрема «Виробнича база будівництва», «Сучасні будівельні матеріали і методи досліджень», «Наукові дослідження в будівництві», що викладаються для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія. Використовуються результати дисертаційної роботи щодо досліджень фізико-механічних властивостей основних складників лужних цементів та оптимізації складів ремонтних сумішей з високими експлуатаційними властивостями, а також дослідження впливу лужних активаторів тверднення на показники якості ремонтних сумішей на основі лужного портландцементу, що дозволяє отримати високу ранню міцність.

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.