МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування факультету)

Кафедра композиційних матеріалів, хімії та технологій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)
бакалавр
(ступінь вищої освіти)

на тему Обґрунтування вибору природних наповнювачів для бетонів
(назва теми)

Виконав: студент 4 курсу, групи БАД-212

Спеціальності 132 – «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація):
«Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
МАНДИЧ О.О.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник МІТЯЄВ О.А.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент НЄСТЄРОВ О.В.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Будівництва, архітектури та дизайну
Кафедра Композиційних матеріалів, хімії та технологій
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 132 Матеріалознавство
Освітня програма Композиційні та порошкові матеріали, покриття

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри КМХТ
_____Іван АКІМОВ
«__20__» ____квітня___2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

МАНДИЧ Олександр Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема проєкту (роботи) Обґрунтування вибору природних наповнювачів для бетонів
Керівник проєкту (роботи) д.т.н., проф. МІТЯЄВ Олександр Анатолійович
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)
Затверджені наказом закладу вищої освіти від « 17» 04 2026 р., № 173
2.Строк подання студентом проєкту (роботи) 20.05.2026
3.Вихідні дані до проєкту (роботи) технічне завдання: обґрунтувати вибір природних наповнювачів для різних типів бетонів

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): підібрати природні наповнювачі для декількох видів бетонів в залежності від їх впливу на властивості та надійність готового виробу

5.Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів): презентація до роботи 1 слайд: титульний; 2 слайд Мета роботи; 3-16 Інформаційні слайди; 17 слайд Висновок; 18 Дякую за увагу!

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	МІТЯЄВ О.А., проф.	20.04.26	27.04.26
2	МІТЯЄВ О.А., проф.	27.04.26	05.05.26
3	МІТЯЄВ О.А., проф.	05.05.26	20.05.26
Нормо-контроль	ПЕТРУША Ю.Ю., доц.	20.05.26	25.05.26

7. Дата видачі завдання «20» квітня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Вступ, розділ 1	27.04.2026	Виконано
2	Розділ 2	05.05.2026	Виконано
3	Розділ 3, презентація	20.05.2026	Виконано
4	Попередній захист	26.05.2026	Виконано

Студент _____ Олександр МАНДИЧ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ Олександр МІТЯЄВ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи бакалавра «Обґрунтування вибору природних наповнювачів для бетонів»: 36 с., 8 рис., 3 табл., 16 джерел.

БЕТОН, ПРИРОДНИЙ НАПОВНЮВАЧ, МЕТАКАОЛІН, КВАРЦОВЕ БОРОШНО, ПУЦОЛАНИ.

Предметом дослідження є модифікація складу бетону природними добавками.

Мета роботи – обґрунтувати вибір природних наповнювачів для бетонів в умовах відбудови України.

Пояснювальна записка містить усі необхідні етапи роботи для прогнозування властивостей полімерного волокнистого композиту.

Результати. Глибоке розуміння фізико-хімічної природи та мінералогії дисперсних наповнювачів дозволяє керувати процесами структуроутворення бетону на мікро- та нанорівнях. Оптимальний підбір гранулометрії, мінерального складу та пуцоланової активності дисперсної фази є основою для створення ультрависокоміцних (UHPC), екологічних («зелених») та довговічних бетонів нового покоління.

Вибір між кварцовими, вапняковими чи пуцолановими наповнювачами завжди залежить від умов експлуатації споруди. Наприклад, для бетонів морських гідротехнічних споруд критично важливим є пуцолановий наповнювач (мікрокремнезем/метакаолін), який зв’язує вільне вапно і блокує проникнення сульфатів та хлоридів углиб конструкції. Для звичайних збірних залізобетонних виробів ефективнішим є мелений вапняк, який інтенсифікує набір міцності на початкових етапах. Для виготовляння газобетонів доцільніше використовувати в якості наповнювача – кварцове борошно.

ЗМІСТ

Вступ 6
1 Аналіз сучасного стану використання природних наповнювачів у технології бетону 7
1.1. Актуальність розробки нових бетонних сумішей з природними наповнювачами в умовах повоєнного відновлення України 7
1.2 Класифікація бетонів 8
1.3 Модифікація структури бетону природними добавками 12
2 Фізико-хімічні властивості наповнювачів бетонів 16
2.1 Хімічно активні (пуцоланові та гідравлічні) наповнювачі 16
2.2 Хімічно інертні наповнювачі та мікронаповнювачі 19
3 Обґрунтування вибору природних наповнювачів та їх вплив на властивості бетонних сумішей 23
3.1 Порівняльний аналіз механізмів впливу 23
3.2 Основні види природних наповнювачів для бетонів 25
3.2.1 Бетонні суміші з додаванням природного вапняку 26
3.2.2 Бетонні суміші з пуцолановими наповнювачами 27
3.2.3 Бетонні суміші з кварцевим борошном 29
3.3 Обґрунтування вибору природних наповнювачів 31
Висновки 35
Перелік джерел посилань 36

ВСТУП

Сучасне капітальне будівництво характеризується постійним зростанням обсягів споживання бетону як основного конструкційного матеріалу. Проте традиційний підхід до проєктування бетонних сумішей, що базується на масовому використанні дефіцитних або дорогих первинних ресурсів, дедалі частіше стикається з економічними та екологічними обмеженнями. Ефективне керування властивостями композиту передбачає жорсткий контроль над процесами структуроутворення на всіх етапах його тужавлення та твердіння. Оскільки заповнювачі зазвичай складають до 70–80% об’єму бетону, саме вони виступають головним чинником формування мікроструктури та кінцевих експлуатаційних властивостей штучного каменю.

Ефективне проектування складу бетону вимагає вибору наповнювача відповідно до цільового призначення конструкції. У цьому контексті обґрунтування використання місцевих або альтернативних природних наповнювачів (зокрема пористих гірських порід, відсівів дроблення, кварцових та карбонатних пісків оптимізованого гранулометричного складу) є надзвичайно актуальним. Це дозволяє не лише знизити матеріаломісткість і собівартість готової продукції, але й цілеспрямовано модифікувати матрицю бетону, забезпечуючи задані параметри міцності, тріщиностійкості та довговічності. Водночас оцінка деструктивних процесів у тілі бетону все частіше базується на неруйнівних методах контролю, які характеризуються високою надійністю, точністю та дозволяють мінімізувати трудові й матеріалі витрати як на стадії лабораторних випробувань, так і під час експлуатації споруд.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці рекомендацій щодо підбору оптимальних природних наповнювачів для отримання високоякісних бетонів, що дозволить зменшити використання

імпортної чи дефіцитної сировини та знизити собівартість будівельних робіт без втрати експлуатаційних властивостей бетонних конструкцій.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНИХ НАПОВНЮВАЧІВ У ТЕХНОЛОГІЇ БЕТОНУ

У сучасному матеріалознавстві особлива увага приділяється створенню інноваційних видів цементу та бетонів із пролонгованим терміном служби та високими експлуатаційними параметрами. Саме тому актуальним трендом є розробка екологічно безпечних та енергоефективних композиційних в'яжучих. Такі матеріали забезпечують покращені фізико-механічні властивості конструкцій, зокрема підвищену міцність, водонепроникність, а також хімічну та морозостійкість.

1.1. Актуальність розробки нових бетонних сумішей з природними наповнювачами в умовах повоєнного відновлення України

Повномасштабна війна в Україні призвела до безпрецедентних руйнувань житлового фонду, промислових об'єктів та критичної інфраструктури. Масштаби майбутнього відновлення є найбільшими в Європі з часів Другої світової війни. Очевидно, що традиційні підходи до виробництва будівельних матеріалів не зможуть повною мірою задовольнити колосальний попит через дефіцит потужностей, високу вартість класичної сировини та логістичні колапси. У цих реаліях розробка нових бетонних сумішей із використанням місцевих природних наповнювачів та відходів руйнувань стає не просто науковим трендом, а стратегічною необхідністю для виживання та відбудови країни.

Традиційне виробництво високомаркових бетонів базується на використанні дефіцитних або віддалених сировинних ресурсів (наприклад, гранітного щебню певних фракцій, якісного річкового піску, високоактивного

клінкеру) [1-3]. Воєнні дії порушили звичні логістичні ланцюжки: чимало кар’єрів та заводів опинилися в зоні бойових дій, на окупованих територіях або зазнали руйнувань.

Використання місцевих природних наповнювачів (дрібнозернистих пісків, вапнякових відсівів, суглинків, черепашнику, каоліну, крейди) може дозволити:

– мінімізувати логістичні витрати, адже матеріал буде видобуватися та перероблятися безпосередньо в регіоні будівництва;

– знизити собівартість квадратного метра будівництва через те що дешевша локальна сировина суттєво зменшить кінцеву вартість бетону, що критично важливо при обмеженому бюджеті на відновлення.

Також досить важливо враховувати і екологічний аспект в реаліях воєнного стану. Всі ми бачимо що сьогодні майже всі міста України завалені мільйонами тон будівельного сміття – залишками зруйнованих обстрілами житлових будинків та промислових споруд. Просто вивозити ці об'єми на звалища екологічно катастрофічно та економічно невигідно.

Отже нові рецептури бетонів мають комбінувати природні наповнювачі з рециклінговими матеріалами (подрібненим вторинним бетоном, цегляним боєм). Місцева мінеральна сировина (наприклад, природні пуцоланові добавки) у таких сумішах виступатимуть стабілізаторами структури, допомагаючи компенсувати зниження міцності, яке зазвичай виникає при використанні вторинних агрегатів [4]. Це дозволить очистити українські міста від завалів і одночасно перетворити сміття на цінний будівельний ресурс.

1.2 Класифікація бетонів

Класифікація бетонів за типом в’яжучої речовини є однією з найважливіших у будівельному матеріалознавстві, оскільки саме від природи

в’яжучого залежать основні фізико-хімічні, міцнісні та експлуатаційні властивості готового бетону, а також сфера його застосування.

За цією ознакою бетони поділяють на такі основні групи [3]:

1. Цементні бетони

Це найбільш розповсюджена та універсальна група бетонів, в яких в якості в'яжучої речовини використовують різні види цементів:

– портландцемент (ПЦ) та його різновиди: є основою для класичних важких і легких бетонів, які застосовуються у зведенні житлових, промислових та інфраструктурних об’єктів;

– шлакопортландцемент (ШПЦ) та пуцолановий цемент: використовуються для конструкцій, що працюють в умовах підвищеної вологості або під впливом агресивних середовищ (наприклад, гідротехнічні та підземні споруди);

– глиноземистий цемент: застосовується для створення жаростійких (вогнетривких) бетонів, а також для аварійно-відновлювальних робіт завдяки здатності швидко набирати міцність.

2. Силікатні бетони

В'яжучою речовиною тут виступає суміш вапна та тонкомеленого кремнеземистого компонента (найчастіше кварцового піску). Особливість технології: твердіння таких бетонів відбувається виключно в автоклавах під дією високого тиску (від 0,8 до 1,2 МПа) та температури (175…200°С), де утворюються стійкі гідросилікати кальцію. Найвідомішим силікатним бетоном є автоклавний газобетон (ніздрюватий бетон), який масово використовується у вигляді стінових блоків для сучасного житлового будівництва.

3. Гіпсові бетони

Виготовляються на основі будівельного гіпсу, ангідриту або гіпсоцементно-пуцоланових в’яжучих (ГЦПВ). Вони мають порівняно невисоку щільність, хороші тепло- та звукоізоляційні показники, але характеризуються низькою водостійкістю. Для підвищення водостійкості використовують саме ГЦПВ. Використовуються для виготовлення внутрішніх перегородок, підвісних

стель, панелей, деталей архітектурного декору, а також формування самовирівнювальних стяжок для підлоги всередині сухих приміщень. Найвідоміший представник – це арболітобетон, який досить широко використовується у будівництві.

4. Шлаколужні бетони

Це інноваційні та екологічні бетони, де в'яжучим є продукт взаємодії мелених доменних шлаків (або інших алюмосилікатних матеріалів) з розчинами лужних металів (наприклад, силікату натрію – «рідкого скла» або гідроксиду натрію). Такі бетони належать до матеріалів із низьким вуглецевим слідом (безклінкерні бетони). Мають надзвичайно високу міцність, підвищену корозійну стійкість до дії кислот, сульфатів та високу морозостійкість. Застосовуються у будівництві в агресивних хімічних середовищах та для утилізація промислових відходів.

5. Полімербетони та бетонополімери

У цих матеріалах мінеральне в'яжуче повністю або частково замінене на органічні полімери:

– полімербетони, в них в'яжучим компонентом виступають синтетичні смоли (епоксидні, поліефірні, фуранові тощо) без додавання води. Мають високу міцність на розтяг, хімічну стійкість та водонепроникність;

– бетонополімери – це звичайні цементні бетони, які після затвердіння просочують рідкими мономерами з їх подальшою полімеризацією, вони використовуються як ремонтні суміші, для підлоги в хімічних цехах, для покриття злітних смуг, а також для декоративних виробів («штучний камінь»).

Класичний портландцемент є вкрай енергоємним матеріалом (через потребу випалу клінкеру при температурі близько 1450°C), що супроводжується величезними викидами (CO_2) та високим споживанням електроенергії. В умовах хронічного дефіциту потужностей в українській енергосистемі, спричиненого обстрілами, промисловість не може дозволити собі колишні обсяги енерговитрат. Розробка композиційних в'яжучих, де частина цементу замінюється на мелені природні наповнювачі (активні

мінеральні добавки), які не потребують термічної обробки, дозволить скоротити споживання електроенергії та газу на виробництві та зменшити загальну енергоємність виготовлення будівельних конструкцій та забезпечення довговічності та експлуатаційних характеристик об’єктів.

1.3 Модифікація структури бетону природними добавками

Сучасне капітальне будівництво та реконструкцію об’єктів неможливо уявити без застосування модифікованих бетонів, що містять комплексні хімічні та мінеральні компоненти. Під модифікуванням цементних систем розуміють цілеспрямоване регулювання їхніх експлуатаційних параметрів за допомогою ресурсозберігаючих технологічних методів. До основних із них належать: введення хімічних добавок, наповнювачів і мінеральних модифікаторів, інтеграція полімерів, оптимізація гранулометричного складу заповнювачів, а також фізико-хімічна активація в’яжучого. Ефективне керування властивостями композиту передбачає контроль над процесами структуроутворення на всіх етапах його тужавлення та твердіння [3-5].

Сьогодні поняття «модифікування бетону» суттєво транслювалося [4-5]. Якщо раніше частка бетонів із добавками становила лише 10…15% від загального обсягу, то нині цей показник практично досяг 100%. Стрімкий прогрес у технології бетонів упродовж останніх сорока років став можливим саме завдяки створенню та масовому впровадженню високоефективних добавок різної природи [4]. Поштовхом до таких масштабних досліджень стали жорсткі вимоги виробництва та гостра потреба в забезпеченні довговічності будівельних конструкцій.

Сучасні технічні вимоги адаптовані до розрахункових методів проєктування. Зокрема, інтенсифікація темпів зведення споруд вимагає скорочення тривалості лабораторних випробувань матеріалу. Водночас оцінка

деструктивних процесів у тілі бетону все частіше базується на неруйнівних методах контролю, які характеризуються високою надійністю, точністю та дозволяють мінімізувати трудові й матеріальні витрати [4].

Нові типи бетонів не повинні поступатися за якістю класичним аналогам. Сучасне матеріалознавство доводить, що правильне введення мікродисперсних природних наповнювачів оптимізує пористість цементного каменю. Завдяки ущільненню структури на мікрорівні будуть досягатися високі показники механічних та експлуатаційних властивостей що вкрай важливо для відбудови підвальних приміщень, бомбосховищ та гідротехнічних споруд.

Модифікація властивостей сучасних цементних композитів традиційно базується на введенні до їхнього складу функціональних добавок різного спектра дії. У цьому контексті природні мінеральні компоненти стали незамінним складником високотехнологічних бетонів. Механізм їхньої дії полягає у фізико-хімічному наповненні матриці: мікродисперсні частинки добавок виконують роль центрів кристалізації гідратних новоутворень та ущільнюють капілярно-пористу структуру цементного каменю.

Завдяки оптимізації гранскладу та проявленню пуцоланової активності, такі компоненти дозволяють частково замінити клінкерну частину цементу. Як наслідок, суттєво підвищується щільність матеріалу, що безпосередньо зумовлює зростання його міцнісних показників, подовження терміну експлуатації та гарантує високу корозійну стійкість бетону в умовах агресивних хімічних чи атмосферних впливів. Попри очевидні технологічні переваги, більшість сучасних методів виготовлення високоміцних бетонів супроводжуються високими фінансовими витратами. Це пов’язано з дефіцитом та значною вартістю кондиційних сировинних матеріалів, компонентів хімічного синтезу та імпортних пластифікаторів. Висока собівартість готової продукції суттєво знижує її конкурентоспроможність на ринку будівельних послуг, що змушує виробників шукати альтернативні та більш рентабельні рішення. Ресурсозбереження та екологічна оптимізація виробництва. Дієвим інструментом подолання зазначеної економічної проблеми є перехід до

проектування складів бетонів на основі місцевих сировинних ресурсів і регіональної мінеральної бази. Інтеграція локальних природних матеріалів та супутніх продуктів промисловості у технологічний цикл дає змогу розв'язати комплекс взаємопов’язаних завдань. Залучення місцевої мінеральної сировини та техногенних відходів мінімізує логістичні витрати та знижує базову собівартість бетонних сумішей. Утилізація промислових відходів у складі будівельних композитів зменшує навантаження на довкілля, сприяє очищенню територій від техногенних накопичень та знижує викиди вуглекислого газу (CO_2), пов’язані з декарбонізацією вапняку під час випалу клінкеру. Зменшення частки портландцементу в суміші шляхом його заміни на низькоенергоємні мінеральні добавки, які не потребують високотемпературної обробки, дозволяє кардинально знизити загальну енергоємність виробництва бетону як композиційного матеріалу.

Поліпшення фізико-механічних характеристик бетонів досягається за рахунок введення до складу добавок різного характеру впливу. Природні добавки є невід’ємним компонентом сучасних бетонів. Їх використання дозволяє знизити кількість клінкерного цементу, підвищити щільність структури і, як наслідок, міцність, довговічність і стійкість бетонів в агресивному середовищі.

Більшість існуючих технологій виробництва бетонів потребує використання дорогих сировинних матеріалів, що негативно впливає на вартість самого матеріалу та його конкурентоспроможність.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є розроблення високоякісних бетонів на основі місцевих природних ресурсів. Використання в якості добавок місцевої мінеральної сировини забезпечує зниження собівартості матеріалу, а використання відходів виробництва допомагає вирішити питання охорони навколишнього середовища. Зменшення кількості цементу в бетонній суміші та часткова заміна його на добавки, на виробництво яких витрачається мінімум енергії, зменшує загальну енергоємність виробництва бетону як композиційного матеріалу.

У якості природних добавок досить часто використовують карбонатні породи, проте в Україні при виробництві цементів загальнобудівельного призначення практично використовується в якості основного компонента найчастіше вапняк-черепашник, а така карбонатна порода, як крейда, взагалі не використовується. Використання крейди ускладнене її основними властивостями: підвищеною липкістю, гідрофільністю, високою питомою поверхнею. Однак досить великі запаси крейди з високим вмістом карбонату кальцію, який здатний брати участь у структуроутворенні цементного композиту і бетону, а також слабка цементація частинок з високою питомою поверхнею, створюють передумови для використання меленої крейди в якості мінеральної добавки для бетонних сумішей і бетонів.

2 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПОВНЮВАЧІВ БЕТОНІВ

У сучасному матеріалознавстві перехід від трикомпонентного бетону (цемент – вода – заповнювачі) до багатокомпонентних систем є головним інструментом створення високотехнологічних композитів. Ключову роль у цьому процесі відіграють дисперсні наповнювачі – тонкомелені мінеральні речовини з розміром частинок менше ніж 0,14 мм (переважно від 1 мкм до 50 мкм).

Ефективність дії цих компонентів у цементних системах визначається комплексом їхніх фізико-хімічних та мінералогічних характеристик, які безпосередньо впливають на кінетику гідратації, мікроструктуру цементного каменю та довговічність готового бетону.

За характером фізико-хімічної взаємодії з компонентами цементного клінкеру дисперсні наповнювачі поділяють на дві основні групи наповнювачів: хімічно активні (пуцоланові та гідравлічні) та хімічно інертні (наповнювачі-мікронаповнювачі). Для розуміння впливу елементів кожної з цих груп на властивості бетонних сумішей та вже готових бетонів ми розглянемо їх більш детально.

2.1 Хімічно активні (пуцоланові та гідравлічні) наповнювачі

Сучасний розвиток технології високотехнологічних та ультращільних бетонів базується на концепції спрямованого мікроструктурного моделювання цементного каменю. Ключовим інструментом цього процесу є введення до складу дисперсних систем хімічно активних мінеральних модифікаторів пуцоланового та гідравлічного типу [5, 6]. Фізико-хімічна специфіка зазначених матеріалів обумовлена їхнім генезисом та фазовим складом: вони

характеризуються високим вмістом реакційноздатних, термодинамічно нестабільних аморфних і склоподібних оксидів кремнію SiO_2 та оксиду алюмінію Al_2O_3 [6, 7].

Класичний процес гідратації основних клінкерних мінералів портландцементу – аліту (C_3S) та беліту (C_2S) – супроводжується інтенсивним виділенням гідроксиду кальцію ($Ca(OH)_2$), відомого у мінералогії як портландит [4]. Залежно від мінерального складу цементу, кількість портландиту в тверднучій пасті через 28 діб може досягати 20…25% від загального обсягу новоутворень [8, 9].

З позицій механіки руйнування та тривалої стійкості композитів, портландит є найбільш уразливим елементом матриці з кількох причин:

– низька власна міцність через те що кристали $Ca(OH)_2$ формуються у вигляді великих пластинчастих або призматичних конгломератів із вираженою спайністю, які мають слабку адгезію до зерен заповнювача та гідросилікатної матриці [7, 9]. Вони концентруються переважно в зоні контактного шару (інтерфейсі), утворюючи зони локального послаблення структури [5, 10];

– висока розчинність та вилуговування, яка має місце через те що портландит характеризується високою розчинністю у воді порівняно з іншими гідратними фазами. За наявності фільтраційних процесів або капілярного підсосу відбувається вимивання іонів Ca^{2+} (процес корозії I типу або «біла смерть» бетону), що призводить до зростання капілярної пористості та деструкції штучного каменю [4, 11];

– хімічна уразливість, яка з’являється через те що кристалічний гідроксид кальцію легко вступає в обмінні реакції з агресивними сульфатними, хлоридними та кислими середовищами, які є типовими для підземних вод, промислових стоків та морської води [11, 12]. Наприклад, при сульфатній атаці взаємодія портландиту з гіпсом та алюмінатами призводить до утворення вторинного етрингіту («цементної бацили»), кристалізаційний тиск якого перевищує міцність бетону на розтяг і викликає його масштабне розтріскування [4, 12].

Для нівелювання негативного впливу портландиту в систему необхідно вводити активні природні наповнювачі, що містять аморфний кремнезем. Принцип їхньої дії базується на зв'язуванні вільного гідроксиду кальцію в термодинамічно стабільні та низько розчинні сполуки низько основних гідросилікатів кальцію типу C-S-H(I) та C-S-H(II) [5, 8].

Узагальнений хімізм пуцоланової реакції можна представити наступним фундаментальним рівнянням:

$$\text{Активний [аморфний] } SiO_2 + Ca(OH)_2 + nH_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow xCaO \cdot SiO_2 \cdot yH_2O \rightarrow (C\text{-}S\text{-}H) \qquad (2.1)$$

У випадку присутності реакційно здатного оксиду алюмінію (Al_2O_3), наприклад, при використанні метакаоліну чи високоглиноземистих зол, паралельно протікають процеси синтезу гідроалюмосилікатів кальцію ($2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$), яку досить часто в літературних даних можна знайти в скороченому вигляді, який записується як (C_2ASH_8), що додатково призводить до ущільнення бетонів та зниження кількості пористості [5, 10].

Завдяки цьому механізму пуцоланові наповнювачі забезпечують три ефекти підвищення міцності бетонів:

- хімічний перев'язок за рахунок перетворення хімічно нестабільного $Ca(OH)_2$ на міцний, стійкий «цементуючий гель» (C-S-H);
- мікроструктурне ущільнення за рахунок того що новоутворені гідросилікати мають значно менший розмір кристалів та вищу питому поверхню, завдяки чому вони закупорюють мікропори та капіляри в об'ємі бетонів, трансформуючи їх структуру з грубопористої на дрібнопористу [5];
- оптимізація контактної зони за рахунок чого відбувається зменшується товщина контактної зони що призводить до зниження пористості навколо наповнювачів, що значною мірою підвищує міцність бетону при згині та розтягу [7, 9].

Серед найбільш ефективних представників цієї групи наповнювачів у сучасному матеріалознавстві виділяють мікрокремнезем (ультрадисперсний побічний продукт феросплавного виробництва з вмістом аморфного SiO_2 понад 85…90%), метакаолін (продукт дегідратації каолінітових глин), а також золи-винесення ТЕС і мелений доменний гранульований шлак [6, 9, 10].

2.2 Хімічно інертні наповнювачі та мікронаповнювачі

Концепція підвищення ефективності цементних систем за допомогою дисперсних мінеральних компонентів охоплює використання не лише хімічно активних пуцоланів, а й великої групи так званих хімічно інертних наповнювачів [5, 6]. До цієї категорії належать тонкомелені породи (вапняк, кварцовий пісок, гранітні відсіви, мармурове борошно, екологічні відходи обробки каміння), які характеризуються стабільною кристалічною структурою. За звичайних умов експлуатації (Т = 15...25^0 С) вони не вступають у безпосередню хімічну взаємодію з водою замішування або мінералами цементного розчину [6, 13]. Попри свою хімічну пасивність, такі мікронаповнювачі суттєво трансформують властивості як свіже приготованої бетонної суміші, так і затверділого штучного каменю.

Головний механізм впливу кристалічних наповнювачів базується на законах колоїдної хімії та фізики дисперсних систем. Процес тонкого подрібнення мінеральної сировини супроводжується руйнуванням міжатомних і міжмолекулярних зв’язків у кристалічній ґратці порід [5]. Як наслідок, отримані мікрочастинки набувають високої поверхневої енергії та нескомпенсованого електрокінетичного потенціалу [13, 14].

Цей зумовлює проявляння декількох фундаментальних ефектів:

– ефект гетерогенного зародкоутворення, або утворення центрів кристалізації, при цьому частинки мікронаповнювача, рівномірно розподілені у

міжзерновому просторі цементу, володіють високою адсорбційною здатністю. Вони виконують роль підкладок або штучних центрів кристалізації, на поверхні яких починають інтенсивно осаджуватися первинні гідратні новоутворення цементу (переважно гідросилікати кальцію C-S-H та портландит) [6, 15]. Це прискорює кінетику ранньої гідратації розчину, оптимізує просторове зростання кристалічної гратки та запобігає формуванню великих, крихких монокристалів $Ca(OH)_2$ [14];

– топологічний ефект або ефект «розбавлення» цементу, при якому часткове заміщення цементу на інертні наповнювачі збільшує фактичну відстань між зорієнтованими зернами розчину у цементному тісті, що забезпечує більш повноцінне та рівномірне їх змочування водою (ефект екранування), інтенсифікуючи ступінь гідратації в'яжучого [6, 16];

– реологічна матрична стабілізація: тонкі кристалічні фракції (зокрема, карбонатні) адсорбують на своїй поверхні надлишкову вільну воду, утримуючи її в капілярній системі суміші. Це запобігає відділенню води, сегрегації (розшаруванню) важкого бетону та покращує його легке укладання [5, 16];

– ефект просторового пакування (Packing effect) та мікронаукова специфіка кальциту, якщо розглянути це з позицій мікроструктурного аналізу, то інертні мікронаповнювачі діють як фізичні стабілізатори порового простору (технологія Filler technology). Маючи гранулометрію, меншу за середній розмір зерен портландцементу ($d < 30$ μm), вони механічно заповнюють пустоти між цементними частинками, витісняючи звідти воду. Це призводить до значного ущільнення капілярно-порової структури на нано- та мікрорівнях, зниження загальної пористості матеріалу і, як наслідок, до росту міцності бетону на стискання [14, 15].

Сучасні дослідження вносять суттєве застереження щодо абсолютної інертності деяких кристалічних наповнювачів, зокрема кальциту ($CaCO_3$, мелений вапняк). На початкових етапах гідратації тонкодисперсний кальцит здатний вступати в обмежену топохімічну взаємодію з головною алюмінатною фазою цементу C_3A (у хімії цементу ці сполуки скорочено позначають літерами

C – (CaO) та A – (Al_2O_3)). Результатом цієї реакції є утворення гідрокарбоалюмінатів кальцію (моно- та трикарбоалюмінатних форм), що показано у рівнянні:

$$3CaO\ Al_2O_3 + CaCO_3 + 11H_2O \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CO_2 \cdot 11H_2O \qquad (2.2)$$

Ці кристалічні сполуки термодинамічно стабільніші за моносульфоалюмінати, вони додатково ущільнюють контактну зону між цементним каменем та великим заповнювачем, стабілізуючи структуру бетону в ранні терміни твердіння [6, 15].

Натомість, кварцове борошно при звичайних температурах залишається повністю пасивним, проте стає надзвичайно активним компонентом під час автоклавної обробки штучного каменю (T > 175^0 C та тиск P = 0,8…1,2 МПа) кристалічний кремнезем кварцового борошна (SiO_2) переходить у реакційно здатний стан. Він активно взаємодіє з вільним вапном – гідроксидом кальцію ($Ca(OH)_2$), що виділився при гідратації цементу (або був доданий у суміш), утворюючи міцний і стабільний гідросилікат кальцію. Залежно від співвідношення вихідних компонентів та умов синтезу, основним продуктом цієї реакції є низькоосновний гідросилікат кальцію – тоберморит ($C_5S_6H_5$). Хімічне рівняння цього процесу у загальному вигляді має спрощений варіант рівняння (утворення мінералу тоберморіту):

$$5Ca(OH)_2 + 6SiO_2 + 5H_2O \xrightarrow{\text{автоклав}} 5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot 10H_2O \qquad (2.3)$$

Якщо записувати формулу тоберморіту в класичному хімічному вигляді ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O$), то рівняння буде мати наступний вигляд:

$$5Ca(OH)_2 + 6SiO_2 + 4H_2O \xrightarrow{\text{автоклав}} Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O \qquad (2.4)$$

У матеріалознавстві цей процес часто описують як утворення узагальненої фази гідросилікатів кальцію C-S-H за наступною формулою:

$$Ca^{2+} + 2OH^- + SiO_2 + nH_2O \xrightarrow{\text{автоклав}} xCaO \cdot SiO_2 \cdot yH_2O \qquad (2.5)$$

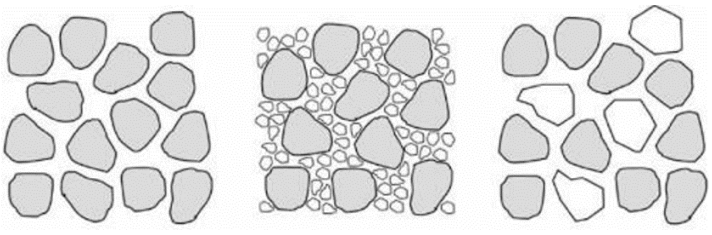
Кристали тоберморит мають волокнисту або пластинчасту структуру, яка міцно зростається з іншими компонентами. Саме ця хімічна реакція забезпечує високу міцність силікатних цегл, автоклавного газобетону та інших матеріалів автоклавного твердіння [5].

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРИРОДНИХ НАПОВНЮВАЧІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

У сучасному будівельному матеріалознавстві проектування високотехнологічних бетонів (особливо високоміцних UHPC та самоущільнювальних SCC) неможливе без використання тонкодисперсних наповнювачів [8, 12]. Вибір між трьома основними типами дисперсних мінеральних добавок – кварцовими (інертними), вапняковими (напівреакційними) та пуцолановими (активними) – має відбуватися на основі глибокого аналізу їхньої фізико-хімічної специфіки, умов експлуатації споруди та вимог до бетонної суміші.

3.1 Порівняльний аналіз механізмів впливу

Ефективність кожного типу наповнювача базується на різному співвідношенні трьох фундаментальних ефектів: ефекту мікронаповнення порожнеч (рис. 3.1), ефекту гетерогенного утворення центрів кристалізації та пуцоланової активності [6, 12].



а б в

а – 100% цемент; б – цемент +дрібні часточки; в – цемент + великі часточки;

Рисунок 3.1 – Ефект просторового пакування в бетонах

Розглянемо з цієї точки зору основні природні наповнювачі, які входять до складу бетонів:

– кварцове борошно діє переважно як механічний ущільнювач структури у ранньому віці. Воно заповнює мікропорожнечі між значно більшими зернами портландцементу, витісняючи капілярну воду та підвищуючи щільність пакування дисперсної системи [12];

– вапняковий мікронаповнювач (кальцит $CaCO_3$), окрім пакування, виявляє виражену поверхневу енергію. Його кристали прискорюють гідратацію клінкеру, виступаючи центрами кристалізації для осадження гідросилікатів кальцію (C-S-H), а також хімічно взаємодіють з алюмінатами цементу (C_3A), формуючи щільні гідрокарбоалюмінати [8, 16];

– пуцоланові наповнювачі (мікрокремнезем, метакаолін) діють на хімічному рівні. Вони вступають у тривалу реакцію з портландитом $Ca(OH)_2$, трансформуючи його у міцний низькоосновний гідросилікатний гель (C-S-H), що кардинально міняє мікроструктуру каменю [5, 16] (рис. 3.2).

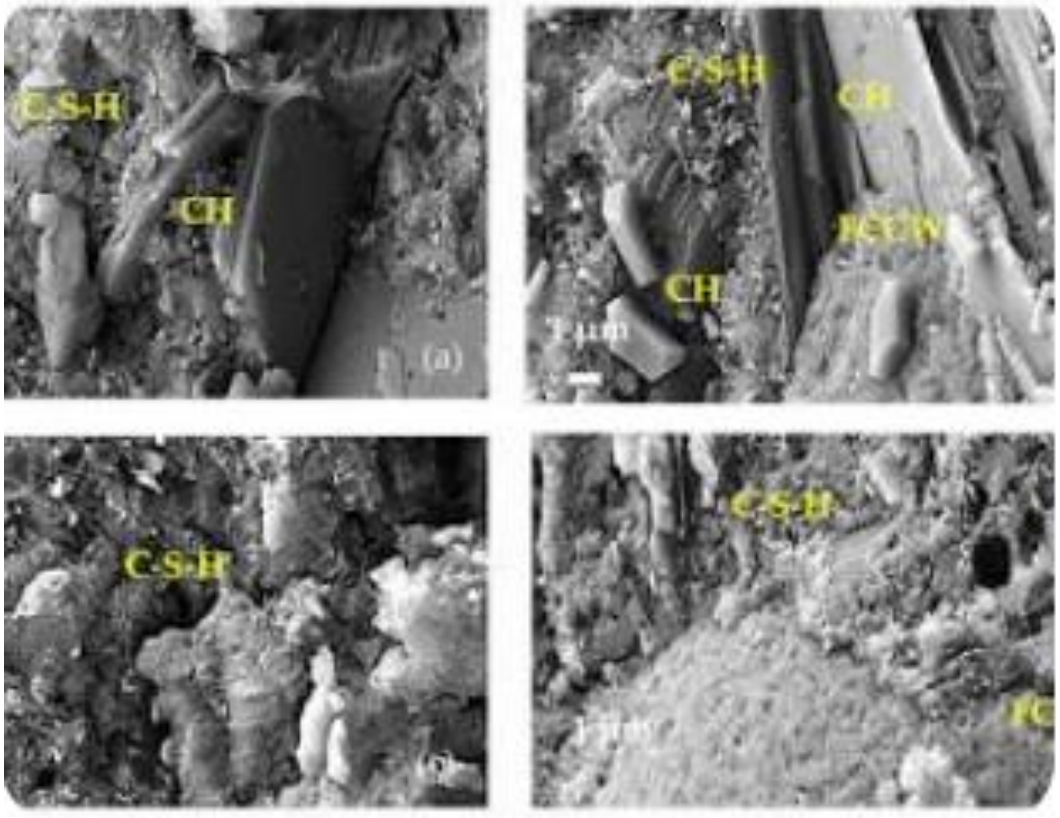


Рисунок 3.2 – Мікроструктура гідратних новоутворень (РЕМ-аналіз) [5]

Для забезпечення максимальної довговічності та експлуатаційної надійності бетонів вибір природного наповнювача повинен базуватися на термодинамічній та фізико-хімічній відповідності між природою мінералу та умовами експлуатації конструкції.

Для наукового обґрунтування вибору природних наповнювачів необхідно розуміти процеси, що відбуваються в структурі цих бетонів, а отже більш детально необхідно розглянути, як саме мінералогічна структура та кристалічна ґратка кожного з елементів наповнювача можуть впливати на формування бетонів. Адже саме з матеріалознавчого боку знання процесів, які відбуваються на мікрорівні між компонентами, що входять до складу композиційних матеріалів, якими і є бетонні суміші, в процесі тверднення можна спрогнозувати якими саме показниками механічних властивостей будуть наділені бетони та який термін довговічності будуть матимуть готові споруди.

3.2 Основні види природних наповнювачів для бетонів

Ефективне проектування складу бетону вимагає вибору наповнювача відповідно до цільового призначення конструкції, оскільки саме параметри заповнювача (його гранулометрія, мінералогічний склад, міцність та характер поверхні) безпосередньо визначають матричну структуру майбутнього композиту. Оптимізація дисперсної фази дає змогу не лише забезпечити задані фізико-механічні характеристики (міцність на стиск, тріщиностійкість), а й спрогнозувати експлуатаційну надійність споруди в конкретних умовах експлуатації.

3.2.1 Бетонні суміші з додаванням природного вапняку

Для приготування таких бетонних сумішей найдоцільніше використовувати природний вапняк, тому що він складається переважно з мінералу кальциту. Його кристалічна ґратка належить до тригональної сингонії (просторова група $R\bar{3}c$). Структура кальциту представляє собою деформовану кубічну ґратку, в якій є іони Ca^{2+} та плоскі трикутні групи CO_3^{2-}. Шари іонів кальцію чергуються з шарами карбонатних груп. Така шаруватість зумовлює досконалу спайність мінералу за ромбоедром (рис. 3.3). Електронегативні кисневі атоми на поверхні карбонатних груп CO_3^{2-} створюють зони високої поверхневої енергії і тим самим вони починають процес адсорбції іонів Ca^{2+} із рідкої фази цементного тіста.

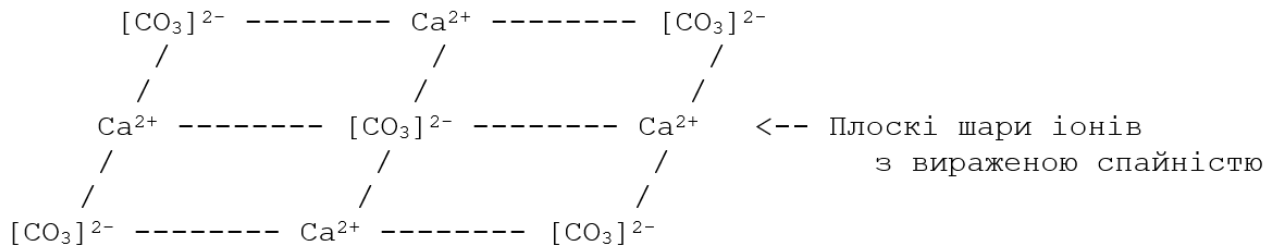


Рисунок 3.3 – Кристалічна гратка кальциту

При тонкому помелі вапняк легко розколюється на ізометричні (округлі, кубоподібні) мікрочастинки з гладкими гранями. В бетонних сумішах мелений вапняк слугує центром кристалізації, тобто він призводить до прискорення ефекту зародкоутворення та сприяє утворенню гідрокарбоалюмінатів кальцію. Оскільки параметри решітки кальциту близькі до параметрів решітки гідроксиду кальцію (портландиту), частинки вапняку стають «шаблоном» для спрямованого росту (епітаксії) гідратних фаз (рис. 3.4). В свою чергу це призводить до інтенсифікації цих процесів саме на ранніх стадіях твердіння, що дозволяє скоротити час термовологої обробки на заводах залізо бетонних

виробів або прискорити процес зняття опалубок в монолітному будівництві [5, 8].

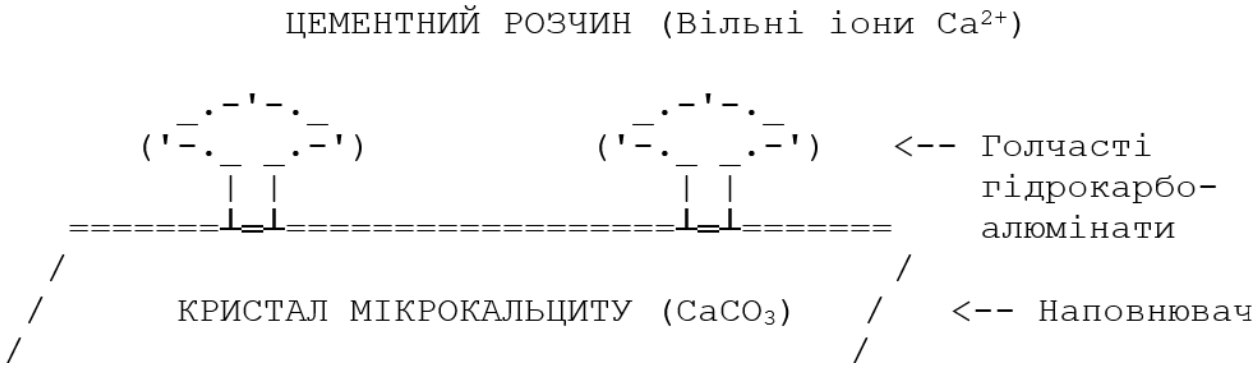


Рисунок 3.4 – Схема спрямованого росту гідратних фаз

Завдяки правильній кубоподібній або осколковій формі з гладкими поверхнями, мікрочастинки кальциту знижують внутрішнє тертя між грубими зернами заповнювача, суттєво покращуючи рухливість бетонного розчину без збільшення водопотреби. Також хімічна взаємодія кальциту з алюмінатами цементу C_3A призводить до утворення ланцюжкових кристалів монокарбоалюмінату, які заповнюють собою пусті простори між цементними зернами, забезпечуючи швидкий набір міцності в першу добу.

3.2.2 Бетонні суміші з пуцолановими наповнювачами

Пуцоланові наповнювачі, до яких відноситься мікрокремнезем та метакаолін усувають в бетонних сумішах вільний портландит $Ca(OH)_2$, який є головним чинником, що призводить до сульфатної та хлоридної корозії [9, 11]. Ультрадисперсні частинки мікрокремнезему повністю блокують капілярні пори, роблячи бетон практично водонепроникним і стійким до стирання та кавітації, саме це явище і є найбільш актуальним для бетонів, що використовуються для будівництва морських портів та водовідливів.

На відміну від кристалічного кварцу, мікрокремнезем (конденсований кремнезем) є повністю аморфним. Його структура не має дальнього порядку. Вона складається з безладно орієнтованих кремнійкисневих тетраедрів $[SiO_4]^{4-}$ } об'єднаних у хаотичну тривимірну сітку (рис. 3.5).

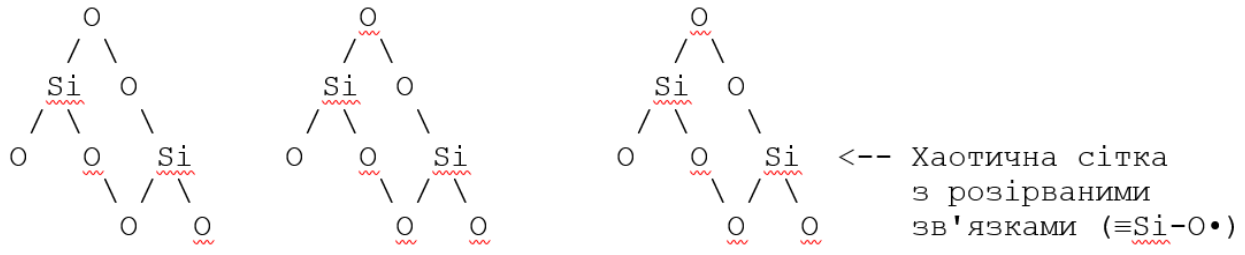


Рисунок 3.5 – Кристалічна будова кремнезему

Через відсутність строгої кристалічної решітки на поверхні сферичних ультрадисперсних частинок (розміром 0,1…0,5 мкм) є величезна кількість вільних, розірваних зв'язків (ненасичених валентностей типу $\equiv Si - O^{\bullet}$. Це зумовлює колосальну хімічну активність матеріалу при контакті з лужним середовищем.

У класичному бетоні без добавок гідратація цементу призводить до утворення великих, пластинчастих кристалів портландиту $Ca(OH)_2$, які мають слабкі зв'язки та легко вимиваються водою.

Коли до бетонної суміші додається аморфний мікрокремнезем, то протікає реакція пуцоланізації. Вільні зв'язки на поверхні цих часток миттєво приєднують до себе іони OH^- та Ca^{2+}, переводячи нестабільний портландит у міцний, низькоосновний гідросилікатний гель (C-S-H) (рис. 3.6).

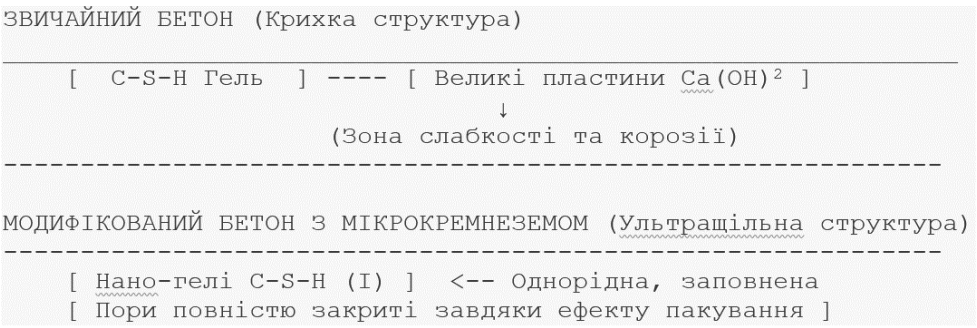


Рисунок 3.6 – Реакція пуцеоланізації

Частинки мікрокремнезему в 100 разів менші за зерна цементу. Вони реалізують ідеальний пакувальний ефект, повністю закриваючи капілярні пори. Це ліквідує перехідну контактну зону навколо щебеню, роблячи бетон непроникним для води, сульфатів та хлоридів. За рахунок пуцоланового ефекту та ультрадисперсності відбувається переформатування пористості – бетони переходять у категорію практично водонепроникних також це призводить до повного блокування процесу дифузію іонів хлору та сульфат-іонів всередину залізобетону, що призводить до значного підвищення корозійної стійкості металевої арматури в бетонах.

Також процеси оптимізації, які відбуваються в контактній зоні «цементний камінь – заповнювач» за рахунок ліквідації крихких прошарків портландиту призводить до значного зростання адгезії, в результаті чого бетони набувають стійкості до динамічних ударів, зношування тертям від стиральних навантажень твердого наносного матеріалу річок та кавітаційного зносу в портових спорудах [10].

3.2.3 Бетонні суміші з кварцевим борошном

Природний наповнювач – кварц, в якому в бетонах за нормальних температур не відбувається ніяких змін а під дією температури більше 175^0 С та тиску більше ніж 0,8МПа починають відбуватися деструктивні процеси в його кристалічній гратці. Він починає вступати в реакцію з вапном, і в процесі цієї реакції утворюється нова речовина – високоміцний низькоосновний гідросилікат кальцію – тоберморит, що забезпечує утворення високоміцного каркасу виробу [6, 15]. Кварцове борошно складається з кристалічного диоксиду кремнію у формі α-кварцу (тригональна сингонія, просторова група $P3_121$). Кристалічна решітка є жорстким каркасом із правильних тетраедрів $[SiO_4]^{4-}$, де кожен атом кисню є спільним для двох тетраедрів (рис. 3.7).

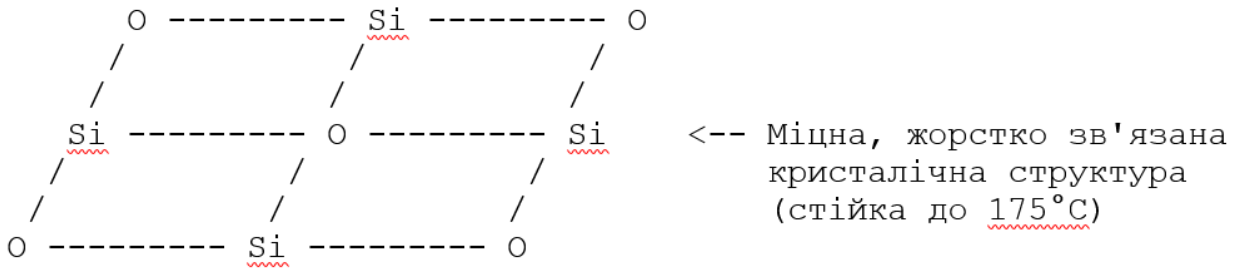


Рисунок 3.7 – Кристалічна решітка кварцевого борошна

Усі хімічні зв’язки всередині решітки повністю компенсовані та симетричні. Саме тому за кімнатних температур кварцове борошно поводиться як абсолютно інертний матеріал («сплячий наповнювач»), який не реагує з водою чи цементом. Для руйнування міцної решітки кварцового борошна суміш піддають автоклавуванню, під час якого енергія теплових коливань стає вищою за енергію зв’язків Si-O, і кварц починає розчинятися з виділенням активної кремнієвої кислоти, яка миттєво реагує з гідроксидом кальцію (вапном) і при цьому кристалізується новий мінерал – тоберморит ($C_5S_6H_5$), який має унікальну шарувато-ланцюжкову кристалічну решітку, схожу на структуру природних амфіболів або азбесту (рис. 3.8).

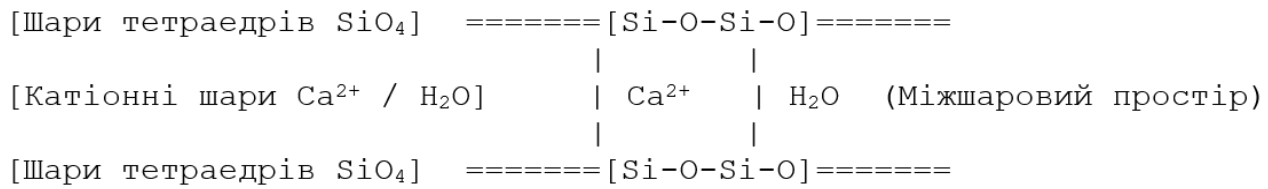


Рисунок 3.8 – Структура кристалу термобориту

Кристали тоберморіту ростуть у вигляді тонких голкоподібних або пластинчастих волокон. Вони хаотично переплітаються у просторі пористого матеріалу, утворюючи міцну просторову «повсть». Цей жорсткий кристалічний зросток забезпечує високу міцність стінок пор автоклавного газобетону при його мінімальній об’ємній вазі.

3.3 Обґрунтування вибору природних наповнювачів

Підсумовуючи наведену інформацію можна сформувати обґрунтовану структурну матрицю поведінки природних наповнювачів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Зведена обґрунтована структурна матриця поведінки природних наповнювачів у бетонах

Наповнювач	Тип кристалічної структури	Поведінка решітки в цементній системі	Головна структурна функція в бетоні
Мелений вапняк (Кальцит)	Іонна решітка, тригональна сингонія з плоскою шаруватістю.	Легко розколюється на округлі частки	Реологічний пластифікатор та інтенсифікатор ранньої міцності (є центром кристалізації).
Мікрокремнезем	Аморфна, хаотична сітка з високою щільністю розірваних зв’язків.	Миттєво вступає в реакцію пуцоланізації за звичайних температур.	Структурний ущільнювач; ліквідує портландит $Ca(OH)_2$ для досягнення водонепроникності.
Кварцове борошно	Каркасна решітка, тригональна сингонія з міцними зв’язками.	Пасивна при кімнатній температурі, руйнується лише в умовах автоклаву	Реакційний компонент для синтезу тоберморит; формування жорсткого мікрокаркаса пористих бетонів.

Також ми можемо обґрунтовано стверджувати про те, що знаючи механізм впливу природних наповнювачів на властивості бетонів, ми можемо виділити три основні ефекти, які відбуваються в бетонних сумішах (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Ефекти та механізми дії наповнювачів на технологічний результат бетонів

Ефект	Механізм дії	Технологічний результат
Ефект мікронаповнення	Мікрочастинки заповнюють пустоти між більшими зернами цементу, витісняючи звідти вільну воду.	Зменшення капілярної пористості, підвищення щільності суміші та міцності каменю.
Ефект «розбавлення» клінкеру	Частина дорогого та енергоємного цементу замінюється екологічним та дешевшим наповнювачем без втрати міцності.	Зниження екзотермії (виділення тепла) при твердінні, що запобігає тріщиноутворенню у масивних конструкціях.
Пуцолановий ефект	Переведення нестабільного $Ca(OH)_2$ у стійкі сполуки C-S-H	Кардинальне підвищення корозійної стійкості, водонепроникності та морозостійкості бетону.

Для системного порівняння та обґрунтування вибору природних наповнювачів для бетонів нижче наведено зведену матрицю впливу наповнювачів на реологічні та фізико-механічні властивості цементних систем за умов нормального твердіння (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Матриця впливу наповнювачів на реологічні та фізико-механічні властивості цементних систем

Критерій оцінки / Тип наповнювача	Кварцове борошно (Кристалічний SiO_2)	Мелений вапняк (Кальцит $CaCO_3$)	Пуцоланові добавки (Аморфний SiO_2, Al_2O_3)
Реакційна здатність ($T = 20^0$ C)	Повністю інертний	Напівреакційний (взаємодія з C_3A)	Висока (зв'язування $Ca(OH)_2$)
Питома поверхня (m^2/кг)	300…600	400…800	15000…25000 (мікрокремнезем)
Вплив на водопотребу суміші	Нейтральний або слабке зниження	Знижує (через пластифікуючий ефект кальциту)	Стрімко підвищує (вимагає значних доз СП)
Кінетика набору міцності (1…3 доби)	Стабільна, без прискорення	Значне прискорення (кінетичний поштовх)	Помірний набір (основний приріст після 7 діб)
Кінцева міцність (28 діб і більше)	Помірне зростання за рахунок щільності	Помірне зростання; стабілізація матриці	Колосальне зростання (формування UHPC)
Корозійна стійкість бетону	Не змінюється	Покращується (за рахунок щільності порового простору)	Максимальна (сульфато- та кислотостійкість)
Енергоємність виробництва	Середня (потребує інтенсивного помолу)	Низька (легко піддається диспергації)	Мінімальна (використання супутніх відходів ТЕС/феросплавів)

Вибір між кварцовими, вапняковими чи пуцолановими наповнювачами завжди залежить від умов експлуатації споруди. Наприклад, для бетонів морських гідротехнічних споруд критично важливим є пуцолановий наповнювач (мікрокремнезем/метакаолін), який зв’язує вільне вапно і блокує проникнення сульфатів та хлоридів углиб конструкції. Для звичайних збірних залізобетонних виробів ефективнішим є мелений вапняк, який інтенсифікує набір міцності на початкових етапах. Для виготовляння газобетонів доцільніше використовувати в якості наповнювача – кварцове борошно.

ВИСНОВКИ

1. Масштабна відбудова України вимагає швидких, дешевих, але водночас якісних та екологічних рішень. Створення нових бетонних сумішей на основі локальних природних ресурсів у поєднанні з переробкою військових руйнувань – це єдиний шлях забезпечити будівельний комплекс необхідною кількістю матеріалів. Такий підхід дозволить не просто повернути людей у відновлені домівки, а й закласти підвалини для нової, зеленішої та енергонезалежної економіки України.

2. Глибоке розуміння фізико-хімічної природи та мінералогії дисперсних наповнювачів дозволяє керувати процесами структуроутворення бетону на мікро- та нанорівнях. Оптимальний підбір гранулометрії, мінерального складу та пуцоланової активності дисперсної фази є основою для створення ультрависокоміцних (UHPC), екологічних («зелених») та довговічних бетонів нового покоління.

3. Вибір між кварцовими, вапняковими чи пуцолановими наповнювачами завжди залежить від умов експлуатації споруди. Наприклад, для бетонів морських гідротехнічних споруд критично важливим є пуцолановий наповнювач (мікрокремнезем/метакаолін), який зв’язує вільне вапно і блокує проникнення сульфатів та хлоридів углиб конструкції. Для звичайних збірних залізобетонних виробів ефективнішим є мелений вапняк, який інтенсифікує набір міцності на початкових етапах. Для виготовляння газобетонів доцільніше використовувати в якості наповнювача – кварцове борошно.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Кривенко П. В. Заповнювачі для бетону : навч. посібник. Київ : ФАДА ЛТД, 2001. 297 с.

2. Бліхарський З. Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд : навч. посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2008. 108 с.

3. Будівельне матеріалознавство : підручник / П. В. Кривенко, К. К. Пушкарьова, В. Б. Барановський та ін. Київ : Ліра-К, 2012. 624 с.

4. В'яжучі речовини : підручник / Р. Ф. Рунова, Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, Ю. Л. Носовський. Київ : Основа, 2012. 448 с.

5. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Будівельне матеріалознавство. Рівне : НУВГП, 2013. 712 с.

6. Taylor H. F. W. Cement Chemistry. 2nd ed. London : Thomas Telford, 1997. 459 p.

7. Malhotra V. M., Mehta P. K. Pozzolanic and Cementitious Materials. London : Taylor & Francis, 2014. 208 p.

8. Волянський О. А. Технологія бетонних і залізобетонних конструкцій : у 2 т. : підручник для студ. вищ. навч. закладів. Київ : Вища школа, 1994. Ч. 1 : Технологія бетону. 271 с.

9. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шпилюк П. С. Бетони і будівельні розчини : підручник. Київ : Основа, 2016. 568 с.

10. Siddique R., Khan M. I. Supplementary Cementing Materials. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2011. 293 p.

11. ДСТУ Б В.2.7-43:2014. Бетони важкі. Технічні умови. Київ : Мінрегіон України, 2015. 43 с.

12. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 675 p.

13. Круглицький М. М. Фізико-хімічна механіка дисперсних структур у будівельних матеріалах. Київ : Наукова думка, 1976. 248 с.

14. Lawrence P., Cyr M., Ringot E. Alternative materials for cement powder: Features and comparative study of 9 mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35, No. 6. P. 1150–1151.

15. Runova R. F., Nosovskyi V. L., Rudenko I. I. Contact processes in dispersed systems of modified concretes. Kyiv : KNUBA, 2013. 180 p.

16. Lothenbach B., Le Saout G., Gallucci E., Scrivener K. Influence of limestone on the hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38, No. 6. P. 848–860.