

ВИКОРИСТАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ВІДХОДІВ БЛОЧНОГО КАМЕНЮ ЯК ЗАМІСНИКА КЛІНКЕРУ В ЦЕМЕНТНИХ СИСТЕМАХ ВІДПОВІДНО ДО ПРИНЦИПІВ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ ЄС

Сучасна будівельна галузь перебуває під подвійним тиском: з одного боку, це необхідність утилізації великотоннажних дрібнодисперсних відходів, що утворюються при обробці природного каменю; з іншого – це екологічний імператив щодо декарбонізації виробництва цементу. Оскільки виробництво клінкеру є одним із найбільших джерел антропогенних викидів CO₂ (близько 8% світових викидів), стратегічна мета полягає у максимальному заміщенні клінкеру альтернативними в'язучими та наповнювачами.

Ця стратегія повністю відповідає принципам Циркулярної Економіки (ЦЕ) ЄС, яка вимагає перетворення відходів на цінну вторинну сировину (Secondary Raw Materials, SCMs). Заміщення клінкеру мікродисперсними відходами каменю є одним із найбільш прямих та економічно обґрунтованих шляхів реалізації ЦЕ у будівельному секторі.

Природний камінь (граніт, мармур, вапняк) генерує значні обсяги шламу та відсівів, що характеризуються високою чистотою, але низькою або відсутньою пуцоланічною активністю (через кристалічну структуру основних мінералів, таких як кварц і польовий шпат). Ця відсутність хімічної реактивності диктує, що основна функція даного типу SCMs має бути фізичною – робота у якості інертного або малоактивного мікронаповнювача.

З цієї позиції, традиційні критерії оцінки SCMs, засновані на хімічній активності, є недостатніми. Технологічна ефективність використання дрібнодисперсних відходів каменю визначається їхньою здатністю оптимізувати фізичну структуру цементного каменю за рахунок покращення гранулометрії суміші.

Перший ключовий механізм – це ефект оптимізації зернового складу (filler effect). Частинки відходів, за умови їх достатньо тонкого подрібнення (ідеально менше за середній розмір зерна цементу), заповнюють порожнини між більшими цементними частинками. Це призводить до значного збільшення щільності пакування твердої фази.

Цей процес, у свою чергу, має вирішальний вплив на мікроструктуру. За рахунок щільнішого пакування, суттєво зменшується обсяг та розмір великих пор, зокрема капілярної пористості, а також мінімізується об'єм найбільш вразливої зони – контактної зони (ITZ) між заповнювачем та цементним каменем. Результатом є структурно більш однорідна та менш проникна матриця, що позитивно позначається на довговічності.

Другий важливий механізм – нуклеаційний ефект. Дрібні частинки каменю, навіть будучи хімічно інертними, слугують центрами гетерогенної кристалізації для продуктів гідратації цементу (зокрема гідросилікатів кальцію, C-S-H). Наявність цих центрів прискорює кінетику гідратації цементу, особливо на ранніх стадіях, що може призводити до швидшого набору початкової міцності.

Економічна та екологічна доцільність заміщення клінкеру є очевидною. Завдяки позитивному структурному впливу, можливе заміщення 5%-20% клінкеру мікронаповнювачем без втрати проєктної міцності, а в деяких випадках – зі збільшенням показників на довгих термінах. Це прямо пропорційно знижує собівартість та скорочує емісію CO₂ на кожну одиницю виробленого цементу чи бетону.

Технологічна ефективність, однак, залежить від дотримання жорсткого реологічного балансу. Висока питома поверхня мікронаповнювачів різко збільшує водопотребу суміші, що є головним технологічним ризиком. Тому успішна інтеграція вимагає обов'язкового використання високоефективних суперпластифікаторів, які диспергують частинки та дозволяють зберегти низьке водоцементне відношення, що є необхідною умовою для забезпечення високої міцності та довговічності.

З погляду законодавчої відповідності, використання відходів каменю як мікронаповнювачів повністю гармонізується з європейським стандартом EN 197-1, який регламентує склад цементу і дозволяє заміщення клінкеру мінеральними наповнювачами (зокрема, вапняком) у складі цементів типу СЕМ II/A-L або II/B-L. Це полегшує сертифікацію кінцевої продукції та її прийняття на європейському ринку.

Таким чином, використання дрібнодисперсних відходів блочного каменю як замісника клінкеру є технологічно обґрунтованим та екологічно необхідним рішенням. Воно трансформує екологічно обтяжливий відхід у функціональний компонент бетону (SCM), що забезпечує мікроструктурне ущільнення, прискорення гідратації та пряму декарбонізацію виробництва, відповідаючи принципам ЦЕ ЄС.

Подальші теоретичні дослідження мають бути спрямовані на розробку точних прогностичних моделей, що пов'язують ступінь подрібнення відходів (питома поверхня) з оптимальною дозою суперпластифікатора, а також на оцінку довгострокової стійкості таких композиційних цементів до агресивних впливів (наприклад, карбонізація), що є критичним для забезпечення довговічності будівельних конструкцій відповідно до вимог стандартів.