

**Шуляк А.В., здобувач освітнього ступеня «магістр»,
факультет гірничої справи, природокористування та будівництва
Шамрай В.І., к.т.н., доц.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОНАПОВНЮВАЧІВ З ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ВІДХОДІВ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ В БЕТОНАХ

Використання дрібнодисперсних відходів каменеобробки, зокрема гранітного шламу, як мікронаповнювачів у бетонах є напрямком, що має суттєвий, але неоднозначний потенціал. З одного боку, їхня специфічна гранулометрія з надлишком пилоподібних фракцій (стабільно понад 29%) створює фундаментальну реологічну проблему – різке збільшення водопотреби бетонної суміші. З іншого боку, з позиції фізики бетону, ці ж дрібні частинки теоретично можуть виконувати позитивну функцію, ущільнюючи мікроструктуру цементного каменю. Оцінка технологічної ефективності полягає у визначенні балансу між цими негативними реологічними та позитивними структурними ефектами.

Позитивний вплив мікронаповнювачів ґрунтується насамперед на фізичному "ефекті заповнювача" (filler effect). Теоретично, частинки, що є дрібнішими за зерна цементу, заповнюють міжзернові порожнечі в цементній матриці, зменшуючи загальну капілярну пористість. Окрім цього, вони сприяють покращенню контактної зони (Interfacial Transition Zone, ITZ) між заповнювачем та цементним каменем. Додатково, ці частинки можуть діяти як центри кристалізації для продуктів гідратації цементу (C-S-H), сприяючи формуванню більш однорідної та щільної мікроструктури, що, в теорії, має підвищувати міцність та довговічність.

З іншого боку, з позиції фізики бетону, ці дрібні частинки можуть виконувати позитивну функцію мікронаповнювача, якщо реологічна проблема водопотреби вирішена. Теоретичний механізм ("ефект заповнювача") полягає в тому, що частинки розміром, меншим за зерна цементу, заповнюють міжзернові порожнечі у цементному камені. Це призводить до ущільнення мікроструктури, зменшення капілярної пористості та, що особливо важливо, до зміцнення контактної зони (Interfacial Transition Zone, ITZ) між заповнювачем та цементною матрицею. В результаті, очікується підвищення не лише міцності, але й показників довговічності, таких як водонепроникність та морозостійкість.

Окрім чисто фізичного ефекту заповнення, дрібнодисперсні мінеральні частинки відіграють роль центрів кристалізації для продуктів гідратації цементу. Вони діють як гетерогенні зародки для новоутворень, зокрема для гідросилікатів кальцію (C-S-H), прискорюючи процеси гідратації на ранніх етапах. Навіть будучи відносно інертними (на відміну від пуцоланових домішок), ці мікронаповнювачі, завдяки цьому механізму, здатні позитивно впливати на кінетику набору ранньої міцності та сприяти формуванню більш однорідної структури цементного каменю.

З точки зору реології свіжого бетону, вплив мікронаповнювачів є двоїстим. Як зазначалося, вони підвищують водопотребу. Проте, водночас вони значно покращують когезію (зв'язність) суміші та її седиментаційну стійкість. Підвищена кількість дрібних частинок перешкоджає розшаруванню та водовідділенню, що є критично важливим для виробництва високотехнологічних бетонів, наприклад, самоущільнюваних (SCC). Таким чином, технологічна ефективність тут полягає у досягненні балансу, при якому негативний вплив на водопотребу повністю компенсується сучасними високоефективними суперпластифікаторами.

Технологічна ефективність також повинна оцінюватися через економічний та екологічний "ефект розбавлення". Використання дрібнодисперсних відходів як мікронаповнювача дозволяє замінити значну частину найбільш дорогого та енергоємного компонента – портландцементу. Це безпосередньо знижує собівартість бетону та його вуглецевий слід. Ефективність, таким чином, полягає у досягненні проектних характеристик бетону (міцності, довговічності) при суттєво меншій витраті клінкеру.

Отже, технологічна ефективність використання мікронаповнювачів з дрібнодисперсних відходів каменю являє собою складну оптимізаційну задачу. Вона неможлива без застосування сучасних хімічних домішок (суперпластифікаторів), які нівелюють головний недолік відходів – високу водопотребу. При виконанні цієї умови, відходи перетворюються з технологічної проблеми на ефективний інструмент для модифікації структури бетону, що дозволяє одночасно покращити його фізико-механічні властивості, знизити собівартість та вирішити гостру екологічну проблему утилізації промислових відвалів.

Список використаної літератури:

1. Development of geopolymers concrete formulations based on activated stone processing sludge to reduce natural resource consumption / V. Shamrai et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 5, no. 6 (137). P. 41–48. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341720>