УДК 692; 691.32; 666.972.16; 620.18

С.О. ВОЛКОВ, д-р філос., ст. викл., М.А. ВАВДІЙЧИК, студент
Криворізький національний університет

НАНОМАТЕРІАЛИ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Нанотехнологія – це технологія створення матеріалів і структур із частинок розміром менше 100 нм, що дозволяє отримувати об'єкти з принципово новими властивостями, та суттєво покращити характеристики традиційних матеріалів, зокрема бетону. Серед найпоширеніших наноматеріалів, що застосовуються у бетонних сумішах, виділяють нанокремнезем (SiO_2), нанооксиди (Al_2O_3, TiO_2), вуглецеві нанотрубки та оксид графену. Вони характеризуються високими механічними та фізико-хімічними властивостями, що забезпечує підвищення міцності, довговічності та стійкості матеріалів до зовнішніх впливів. Введення нанодобавок у бетонні суміші сприяє покращенню їх структури на мікрорівні. Наночастинки заповнюють пори між цементними зернами, а також активізують процеси гідратації цементу. Крім того, застосування пластифікаторів дозволяє зменшити водоцементне відношення, підвищити рухливість суміші та забезпечити більш щільну структуру затверділого бетону. Особливим різновидом є нанобетон, який містить наноініціатори (зокрема вуглецеві нанотрубки). Вони сприяють формуванню щільної кристалічної структури за рахунок процесу дисперсного самоармування. Це забезпечує значне підвищення фізико-механічних властивостей: міцність може зростати до 150 %, морозостійкість – до 50 %, а також підвищується стійкість до високих температур, кислот, лугів і біологічного впливу. Окрім цього, зменшується водопоглинання, ймовірність утворення тріщин і підвищується адгезія до арматури. Важливим аспектом є вплив дозування наноматеріалів на механічні характеристики бетону. Дослідження показують, що навіть незначні кількості добавок (десяті або одиниці відсотка) забезпечують суттєвий ефект, причому наведені значення є приблизними та залежать від складу суміші. Так, при введенні нанокремнезему (SiO_2) у кількості 1–3 % міцність на стиск зростає приблизно на 12,5–18,75 %, а оптимальне значення спостерігається близько 2 %. Для нанооксиду алюмінію (Al_2O_3) максимальний ефект досягається при дозуванні близько 1 % (до 18,75 %), після чого спостерігається зниження ефективності. Найбільш значний вплив має оксид графену: при дозуванні 0,10 % приріст міцності на стиск може досягати близько 23,75 %. Аналогічні залежності спостерігаються і для інших характеристик. Міцність на розтяг при розколюванні зростає до 20 % для SiO_2 (при 2 %), до 14,29 % для Al_2O_3 (при 1 %) та до 22,86 % для оксиду графену (при 0,10 %). Міцність на вигин також підвищується: до 20 % для SiO_2, до 12 % для Al_2O_3 та до 40 % для оксиду графену при оптимальних дозуваннях.

Ущільнення перехідної зони (ITZ) наночастинками підвищує адгезію арматури до бетону на 30%, що у поєднанні з низькою проникністю суміші забезпечує безпрецедентний антикорозійний захист. Економічний аналіз показує, що попри вищу вартість нанодобавок, інтегральний показник вартості життєвого циклу (LCC) конструкції знижується за рахунок зменшення матеріаломісткості (бетону та сталі) та подовження терміну безремонтної експлуатації. Таким чином, використання наноматеріалів у бетонних сумішах є ефективним способом підвищення їх експлуатаційних характеристик. Оптимальний підбір виду та концентрації нанодобавок дозволяє суттєво покращити міцність, довговічність і надійність будівельних конструкцій, що визначає перспективність подальших досліджень у цьому напрямі. Використання наномодифікаторів є ключовим інструментом декарбонізації будівництва. Підвищення міцності бетону на 20-30% дозволяє пропорційно зменшити перерізи несучих залізобетонних конструкцій та витрати клінкерного цементу, що суттєво знижує вуглецевий слід об'єкта.

Список літератури

1. **Бричанський А.О., Мороз Д.В., Бондар О. В., Черепаха Д. В.** Аналіз нанофібробетону і нанотехнологій у виготовленні бетону. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)*. 2023.

2. **Згалат-Лозинська Л.О., Згалат-Лозинський О.Б.** Активізація використання наноматеріалів та нанотехнологій як напрям інноваційної діяльності у будівництві. *Будівельне виробництво*. 2019. №68. С. 30–38 DOI: 10.36750/252422555.68.30238.

3. **Dhairiyasamy R., Gabiriel D., Varshney D., Singh S.** Optimizing nanomaterial dosages in concrete for structural applications using experimental design techniques. *Sci Rep*. 2025. 15, 22375. DOI: 10.1038/s41598-025-05265-w.