

АРМУВАННЯ ДРУКОВАНИХ БЕТОННИХ 3D-ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Технологія (3D Concrete Printing, 3DCP) дозволяє зменшити витрати матеріалів на 30–60% та прискорити зведення будівель. Однак головна проблема, що стримує її промислове впровадження в Україні, – відсутність повноцінної нормативної бази (проектування-будівництва-експлуатації). Наприклад, чинний ДБН [1] не враховує анізотропію властивостей пошарово виготовленого бетону та специфіку армування в адитивному процесі. Без армування, друківані бетонні 3D-елементи мають низьку несучу здатність на згин і розрив (до 80% нижче, ніж у монолітних аналогів) [3]. Тому актуальним є дослідження армування друківаних бетонних 3D-елементів, що забезпечують жорсткість і тріщиностійкість згідно з граничними станами, визначеними в Eurocode [2] та ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1. Дослідження базується на трьох напрямках:

1) Аналіз виробничих циклів – вивчено 5 промислових 3D-принтерів (COBOD, Vertico, Twente Additive Manufacturing) та технологічні паузи між шарами (5–30 хв), які впливають на міцність зчеплення [3].

2) Лабораторні випробування зразків (куби 100×100×100 мм, призми 400×100×100 мм) за методиками ДСТУ Б В.2.7-214:2009 та EN 12390-3. Досліджено чотири типи армування: стержневе, фіброве, гібридне та вбудовування сітки в процесі друку.

3) Чисельне моделювання в ANSYS Mechanical з використанням моделі пластичності Concrete Damaged Plasticity (CDP) з урахуванням анізотропії міцності міжшарових швів [3].

Метод ручного встановлення стрижнів у спеціально підготовлені пази з подальшою фіксацією епоксидним клеєм дозволяє підвищити міцність балок на згин у 2,3 рази. Проте цей підхід не забезпечує монолітності конструкції, оскільки не запобігає утворенню поздовжніх тріщин уздовж міжшарових границь [4]. Фіброве армування підвищує тріщиностійкість на 45% (за даними випробувань на розколювання), однак не створює суцільного армування – міцність на згин зростає лише на 30% порівняно з неармованим зразком [5]. Гібридна схема (нижня стержнева арматура 2Ø12 + фібра 40 кг/м³ + поперечні стержні 2Ø8, встановлені в 3D-друковані отвори) забезпечує несучу здатність, еквівалентну монолітній балці згідно з розрахунком [1]. Відносний прогин досягається при навантаженні 95% від граничного, що відповідає вимогам за другою групою граничних станів [2]. Встановлення арматурної сітки (Ø4, чарунка 50×50 мм) безпосередньо в процесі друку через інтегрований робот-маніпулятор дає найкращі результати: міцність на згин – 92% у порівнянні із монолітною конструкцією, а час армування скорочується на 70% [3].

Промислове впровадження запропонованих рішень потребує проведення низки випробувань залізобетонних 3D-елементів для типізації та уніфікації технічних рішень при проектуванні і будівництві будівель і споруд, результати яких стануть підґрунтям для актуалізації нормативної бази. Зокрема, рекомендується адаптувати гібридне армування (стержні А400С у поєднанні зі сталеву фібру) як найбільш сумісне з поточною практикою [1, 5]. На основі результатів тестувань пропонується доповнити ДСТУ [1] розділом «3D-друковані залізобетонні конструкції», передбачивши: понижувальний коефіцієнт міцності для зон міжшарових швів [3], збільшення мінімального захисного шару арматури до 25 мм [4] та впровадження обов'язкового контролю зчеплення шарів методом відриву зі зсувом для кожної партії суміші [3, 5].

Список літератури

1. **ДБН В.2.6-98:2009.** Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ, 2009. 76 с.
2. **ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010.** Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд. Київ, 2012. 313 с.
3. **Marchment T., Sanjayan J., Xia M.** Method for reinforcing 3D printed concrete. Automation in Construction. 2021. Vol. 120. Art. 103389. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102992.
4. **Демчина Б., Столярчук П., Палій О.** 3D друк балок із можливістю влаштування поперечного армування. Будівельні конструкції. 2024. Вип. 14. С. 57–66.
5. **Delavar M. R., Aslani F., Sercombe T.** Cracking behaviour in 3D concrete printed fibre-reinforced cementitious composites. Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 114. Art. 114312. DOI: 10.1016/j.job.2025.114312.