УДК 691.32:624.012.45:539.4

А. В. Колесник, О. С. Заєць

ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДО УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Анотація. *Розглянуто можливості застосування високоміцних бетонів, фібробетонів, цементних композитів із підвищеною деформативністю та багатошарових конструктивних систем для підвищення стійкості захисних споруд до короткочасних ударних впливів. Проаналізовано механізми поглинання енергії, розвитку тріщин, локального пошкодження і залишкової несучої здатності. Запропоновано критерії порівняння матеріалів, які враховують не лише міцність на стиск, але й в'язкість руйнування, здатність до розсіювання енергії, технологічність та ремонтопридатність. Обґрунтовано необхідність експериментальної перевірки конструктивних рішень за репрезентативних сценаріїв навантаження.*

Ключові слова: *захисні споруди, ударне навантаження, фібробетон, високоміцний бетон, композитні матеріали, тріщиностійкість, залишкова несуча здатність.*

Abstract. *The paper examines high-strength concrete, fibre-reinforced concrete, ductile cementitious composites and multilayer structural systems as means of improving the impact resistance of protective structures. Energy absorption, crack propagation, local damage and residual load-bearing capacity are considered. Material selection criteria are proposed beyond compressive strength, including fracture toughness, energy dissipation, constructability and repairability. The importance of experimental validation under representative impact scenarios is emphasized.*

Keywords: protective *structures, impact loading, fibre-reinforced concrete, high-strength concrete, composite materials, crack resistance, residual load-bearing capacity.*

Вступ

Сучасні захисні споруди цивільного та спеціального призначення мають забезпечувати не лише нормативну несучу здатність за статичних дій, але й достатню стійкість до короткочасних динамічних впливів. Ударні навантаження відрізняються високою швидкістю прикладання зусилля, локальністю контакту та можливістю швидкого утворення тріщин і відколів. За таких умов традиційний показник міцності бетону на стиск не повністю характеризує його фактичну поведінку [1–3]. Потреба в систематизації технічних властивостей сучасних цементних і композитних матеріалів та формування підходу до їх порівняння за показниками ударостійкості. Методологічну основу становлять аналіз наукових публікацій, нормативних положень і порівняння характерних механізмів деформування матеріалів [1–8].

Будівельні захисні конструкції, що сприймають короткочасні динамічні впливи. Взаємозв'язок складу, структури й механічних характеристик сучасних будівельних матеріалів із характером пошкодження та збереженням функціональності конструкцій після удару.

Основна частина

За ударної взаємодії напруження поширюються у матеріалі у вигляді хвиль; розподіл деформацій залежить від тривалості імпульсу, геометрії елемента, умов закріплення та властивостей контактних поверхонь. У бетоні можливі утворення локальної зони зминання, радіальних і кільцевих тріщин, відколювання поверхневих шарів та прогресуюче зниження жорсткості. Тому оцінка лише максимального навантаження без аналізу характеру пошкоджень може призводити до неповних інженерних висновків [3–5].

Доцільно розмежовувати глобальну роботу конструкції (прогин, загальна несуча здатність, стійкість) і локальну відповідь матеріалу в зоні контакту (тріщиноутворення, відкол,

продавлювання). Для захисної споруди принциповим є також критерій залишкової працездатності: можливість виконувати основні функції після одиничного впливу та доступність подальшого обстеження і ремонту.

Високоміцні бетони характеризуються щільною структурою цементного каменю та підвищеним опором стиску. Ультрависокоміцні фіброармовані цементні композити (UHPC/UHPFRC) додатково поєднують низьку пористість, дрібнодисперсні компоненти й дисперсне армування. Така структура потенційно обмежує проникнення агресивних речовин і сприяє контролю ширини тріщин [4; 6].

Водночас зростання міцності на стиск не гарантує пропорційного підвищення ударної в'язкості. Матеріал із високою міцністю, але недостатньою здатністю до пластичного деформування може демонструвати крихкий характер руйнування. Тому для ударостійких елементів важливе поєднання високої міцності матриці з механізмами стримування тріщин, насамперед фібровим армуванням, а також належним конструктивним армуванням [3–6].

Практичними обмеженнями використання UHPC є підвищені вимоги до точності дозування, якості заповнювачів, технології перемішування, догляду за бетоном і контролю однорідності. Економічна доцільність має визначатися для конкретного об'єкта з урахуванням не тільки вартості матеріалу, а й можливої економії маси, строку служби та витрат на ремонт.

Дисперсне армування сталевими, полімерними, базальтовими або іншими волокнами може змінювати характер руйнування цементного композиту. Волокна перетинають тріщини, передають зусилля між їх берегами та забезпечують додаткове поглинання енергії в процесі висмикування або деформування. Особливо важливим є збереження певного опору розтягу після появи першої тріщини [4; 5; 7].

Ефективність фібри визначається не лише її об'ємним вмістом, але й формою, довжиною, орієнтацією, міцністю зчеплення з матрицею та рівномірністю розподілу. Надлишковий вміст волокон без належного технологічного забезпечення може погіршити легкоукладальність суміші та спричинити неоднорідність. Отже, оптимізація складу має спиратися на випробування, а не на формальне збільшення кількості армувального компонента.

Окремий інтерес становлять інженерні цементні композити з контрольованим множинним тріщиноутворенням (ECC). Їхня перевага полягає у здатності до значних деформацій розтягу з утворенням численних дрібних тріщин замість однієї магістральної. Проте можливість застосування таких матеріалів у конкретних захисних конструкціях потребує підтвердження довговічності, вогнестійкості та сумісності з іншими елементами [8].

Перспективним напрямом є комбінування матеріалів із різними функціями в межах однієї конструкції: жорсткого несучого шару, шару з підвищеною здатністю до розсіювання енергії та облицювання, що обмежує поширення локальних пошкоджень. У такій системі результат визначається не сумою характеристик окремих матеріалів, а їх спільною роботою, якістю контакту, анкеровкою та умовами деформування.

Зовнішнє підсилення волокнистими полімерними композитами (FRP) може підвищувати опір окремим видам деформацій і сприяти утриманню уламків пошкодженого поверхневого шару. Водночас полімерні матриці чутливі до температури та умов пожежі, а ефективність підсилення істотно залежить від зчеплення з основою. Тому FRP не слід розглядати як універсальну заміну традиційного армування або як самодостатню гарантію ударостійкості [3; 9].

Для наявних споруд вибір технології підсилення має починатися з інструментального обстеження, встановлення причин дефектів і перевірки стану опорних зон. Матеріал підсилення повинен бути сумісним з основною конструкцією за деформативністю, умовами експлуатації та вимогами пожежної безпеки.

Для порівняння конструктивних рішень пропонується застосовувати багатокритеріальну оцінку. До механічних показників належать міцність на стиск і розтяг, модуль пружності, енергія руйнування, залишкова міцність після тріщиноутворення та характер локального пошкодження. Експлуатаційні показники охоплюють водонепроникність, морозостійкість, корозійну стійкість армування, вогнестійкість і ремонтопридатність [1; 3; 5].

Для лабораторного зіставлення доцільно застосовувати однакові геометричні параметри зразків, контрольовані умови тверднення та порівнювані схеми навантаження. Результати мають містити не лише пікове зусилля, але й криву «навантаження — переміщення», енергію деформування, ширину й характер тріщин та залишкові деформації. Без єдиної методики випробувань порівняння числових показників різних досліджень може бути некоректним.

У проєктній практиці доцільно поєднувати розрахункове моделювання з експериментальною верифікацією. Числова модель має враховувати нелінійну роботу бетону при розтягу й стиску, можливе розкриття тріщин, контактні умови та чутливість результатів до параметрів матеріалу. Нормативні вимоги до захисних споруд визначаються відповідними чинними документами України; застосування нового матеріалу не скасовує необхідності перевірки конструкції за всіма належними граничними станами [1; 2].

Першочерговими сферами використання сучасних цементних композитів можуть бути збірні захисні елементи, ремонтні накладки, локальні ділянки підвищеної тріщиностійкості та конструкції, де зменшення маси поєднується з вимогами довговічності. Для кожного випадку потрібне окреме техніко-економічне обґрунтування з урахуванням доступності матеріалів, кваліфікації виконавців та можливості контролю якості на будівельному майданчику.

Важливо відокремлювати встановлені експериментально характеристики матеріалу від прогнозованої стійкості реальної споруди. Навіть перспективний склад бетону не гарантує належної поведінки конструкції без раціонального армування, коректного проєктування вузлів, належного виконання робіт і технічного нагляду. Запропонований підхід має дослідницький характер і не замінює спеціалізованого розрахунку конкретної захисної споруди.

Висновки

Стійкість захисних конструкцій до ударних навантажень визначається сукупністю міцнісних, деформаційних і енергетичних характеристик матеріалу, а також конструктивною схемою, умовами закріплення та якістю виконання робіт. Орієнтація лише на міцність бетону на стиск є недостатньою для обґрунтованого вибору матеріалу.

Найбільш перспективними напрямами є застосування фіброармованих високоміцних цементних композитів, матеріалів із контрольованим тріщиноутворенням та багатошарових систем, у яких поєднано несучу здатність і здатність до розсіювання енергії. Ефективність кожного рішення повинна підтверджуватися випробуваннями й розрахунками для відповідних умов експлуатації.

Для подальших досліджень доцільно розробити порівняльну програму випробувань із фіксацією енергії деформування, залишкової несучої здатності та ремонтопридатності. Результати можуть бути використані при виборі матеріалів для проєктування, реконструкції та відновлення захисних споруд цивільного й спеціального призначення.

Список використаних джерел:

1. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Мінрегіон України, 2023.

2. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2. Проєктування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд.

3. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Основи бетонознавства. Київ : Основа, 2007.

4. Bentur A., Mindess S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. 2nd ed. London : Taylor & Francis, 2007.

5. ACI Committee 544. Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete (ACI 544.4R-18). American Concrete Institute, 2018.

6. Richard P., Cheyrezy M. Composition of Reactive Powder Concretes. Cement and Concrete Research. 1995. Vol. 25, No. 7. P. 1501–1511. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00144-2.

7. Banthia N., Trottier J.-F. Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers, Part I: Bond-Slip Mechanisms. ACI Materials Journal. 1994. Vol. 91, No. 5. P. 435–446.

8. Li V. C. On Engineered Cementitious Composites (ECC): A Review of the Material and Its Applications. Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1, No. 3. P. 215–230. DOI: 10.3151/jact.1.215.

9. Teng J. G., Chen J. F., Smith S. T., Lam L. FRP-Strengthened RC Structures. Chichester : Wiley, 2002.

Колесник Андрій Вікторович – викладач військової кафедри, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна; e-mail: andrey.enginer@gmail.com.

Заєць Олександр Сергійович – студент групи 3Б-25б Вінницького національного технічного університету e-mail: andrey.enginer@gmail.com.

Kolesnyk Andrii – Lecturer at the Military Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: andrey.enginer@gmail.com.

Zayets Oleksandr . – student of group 3B-25b at Vinnytsia National Technical University e-mail: andrey.enginer@gmail.com.