УДК 691.32

А. В. Бондар

БЕТОННІ КОМПОЗИТИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВТОРИННОГО УЛАМКОУТВОРЕННЯ ПРИ ПОШКОДЖЕННІ БУДІВЕЛЬ УНАСЛІДОК ОБСТРІЛІВ

Анотація. *Розглянуто механізми руйнування бетонних конструкцій під час обстрілів. Зіставлено можливості фібробетонів, ECC і поризованих бетонів щодо стримування тріщин, поглинання енергії та зменшення вторинного уламкоутворення.*

Ключові слова: фібробетон, вторинні уламки, вибухове навантаження, енергопоглинання, захист населення.

Abstract. *Concrete damage mechanisms during shelling are considered. Fibre reinforced concrete, ECC and cellular concrete are compared in terms of crack control, energy absorption and reduction of secondary fragmentation.*

Keywords: fibre reinforced concrete, secondary fragments, blast loading, energy absorption, civilian protection.

Вступ

Пошкодження будівель під час обстрілів супроводжується утворенням вторинних уламків. Небезпечними є як обвалення елементів, так і відколювання бетону з боку приміщення без наскрізного пробиття перешкоди [1, 2]. Захисні властивості визначаються не лише міцністю на стиск, а й тріщиностійкістю та зв'язністю пошкодженого матеріалу.

Мета роботи – обґрунтувати напрями застосування бетонних композитів для зменшення вторинного уламкоутворення при пошкодженні будівель унаслідок обстрілів.

Основні результати дослідження

Виконано аналітичне зіставлення досліджень бетонних композитів за динамічних навантажень [1 – 4]. Власні вибухові випробування не проводилися.

Основні механізми пошкодження конструкцій показано на рисунку 1. Локальне викришування, відколювання та пробиття слід відрізняти від згинального й опорного руйнування, які можуть спричинити обвалення.

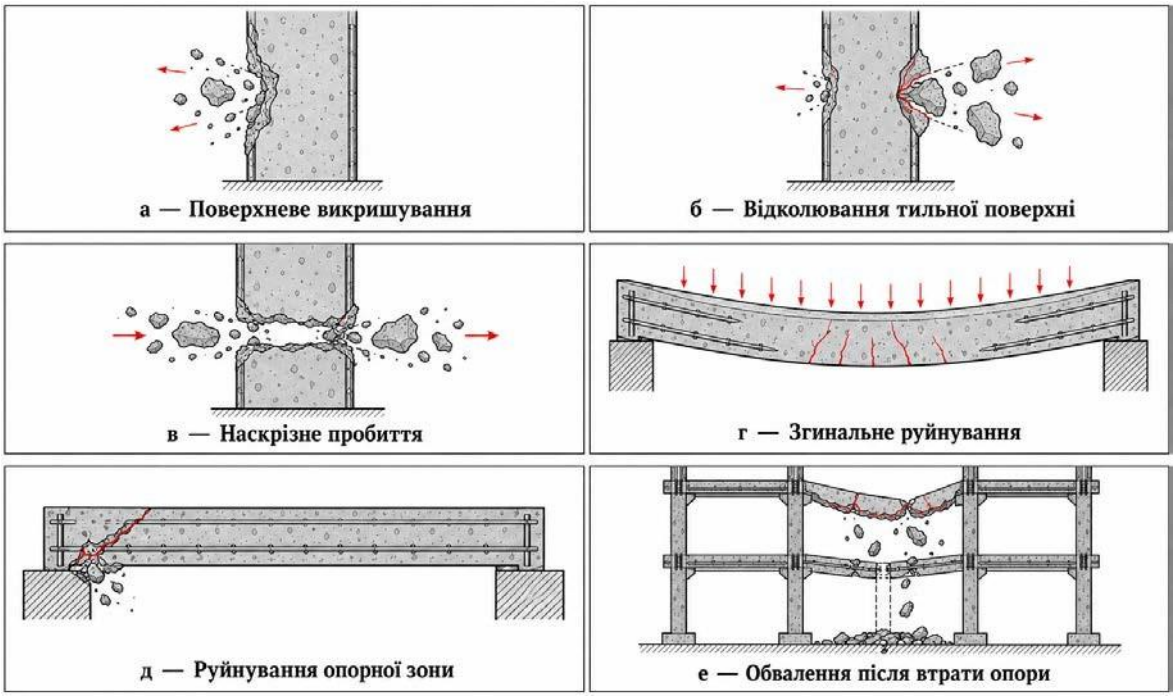

Рисунок 1 – Основні механізми пошкодження бетонних конструкцій: напрямок локального впливу на схемах а-в – зліва направо; тріщини показано червоним

На рисунку 1, а-в розмежовано три локальні механізми. Поверхневе викришування охоплює зону безпосереднього впливу. Відколювання тильної поверхні пов'язане з розтягувальними напруженнями, що виникають під час поширення та відбиття хвиль у бетоні; небезпечні фрагменти відокремлюються з боку приміщення. Наскрізне пробиття означає утворення відкритого каналу через перешкоду. Отже, відсутність наскрізного отвору не виключає вторинного уламкоутворення [1, 2]. Масштаб і деформації на схемах умовні.

Схеми на рисунку 1, г-е характеризують пошкодження елемента та конструктивної системи. За згину тріщини розвиваються у розтягнутій зоні, а в опорній ділянці можливе похиле тріщиноутворення. Втрата опори змінює шляхи передавання зусиль і може спричинити обвалення суміжних елементів. Тому підвищення в'язкості руйнування бетону необхідно поєднувати з перевіркою армування, з'єднань і залишкової несучої здатності.

У сталефібробетоні дисперсні сталеві волокна створюють додаткові зв'язки між берегами тріщин і передають зусилля після порушення суцільності цементної матриці. Взаємодія волокон з матрицею та їх витягування сприяють розсіюванню енергії руйнування. Це створює передумови для обмеження розкриття тріщин і відокремлення частини бетонних фрагментів. Ефективність залежить від геометрії, розподілу й орієнтації волокон, властивостей матриці та навантаження [1].

Надвисокоефективний фібробетон UHPFRC поєднує міцну цементну матрицю з дисперсним армуванням, яке забезпечує опір розвитку тріщин. Його доцільно розглядати для спеціалізованих захисних елементів. Проте висока міцність не усуває можливості локального руйнування: за інтенсивного вибухового впливу у бетонних плитах можуть виникати відколювання та інші пошкодження [2]. Оцінювання матеріалу необхідно здійснювати у складі конкретної конструкції.

Високопластичні цементні композити ECC за відповідного складу здатні формувати систему дрібних тріщин замість швидкого розкриття однієї домінантної тріщини. Це сприяє розподілу деформацій і збереженню цілісності композитного шару. Захист залізобетонних плит шарами ECC від поєднаної дії вибухового навантаження та уламків є предметом сучасних досліджень [3].

Легкі поризовані бетони мають інше функціональне призначення. Пориста структура може поглинати частину енергії через локальне зминання. Самостійне використання такого матеріалу як захисної перешкоди обмежується його міцністю, крихкістю та характеристиками закріплення. Перспективним є застосування у багатошарових системах. Зокрема, експериментально досліджено підвищення вибухостійкості автоклавних газобетонних панелей із покриттям із полісечовини [4].

Функціональне призначення матеріалів узагальнено в таблиці 1, а характерні механізми їх пошкодження наведено на рисунку 2.

Таблиця 1 – Функціональне призначення бетонних композитів [1 – 4]

Матеріал	Механізм роботи	Напрям застосування
Сталефібробетон	Передавання зусиль через тріщини; робота волокон	Армовані елементи з підвищеним опором фрагментації
UHPFRC	Міцна матриця та опір поширенню тріщин	Спеціалізовані захисні елементи
ECC	Множинне дрібне тріщиноутворення	Композитні захисні шари
Поризований бетон	Зминання пористої структури	Енергопоглинальні шари

Порівняння схем на рисунку 2, а-в пояснює роль дисперсного армування. У звичайному бетоні локалізація тріщин створює умови для відокремлення фрагментів. У сталефібробетоні волокна перетинають тріщини та передають зусилля між їх берегами. Частина енергії витрачається на порушення зчеплення й витягування волокон із матриці. Цей механізм може стримувати розкриття тріщин і втрату зв'язності матеріалу, проте не виключає відколювання за інтенсивного навантаження [1]. Для UHPFRC важливе поєднання міцної матриці та ефективної роботи фібри. У ECC акцент зміщується на розподіл деформацій через множинне дрібне тріщиноутворення (рис. 2, г). Замість оцінювання лише граничної міцності доцільно враховувати поведінку матеріалу після утворення першої тріщини [2, 3]. Поризований шар на рисунку 2, д поглинає частину енергії через локальне зминання структури. Його пошкодження саме по собі не свідчить про збереження захисної здатності всієї перешкоди. У багатошаровій системі (рис. 2, е) енергопоглинальний, несучий та утримувальний шари виконують різні функції. Їх сумісну роботу визначають зчеплення, деформативність і закріплення; результати досліджень покритих газобетонних панелей стосуються випробуваних конструктивних рішень [4].

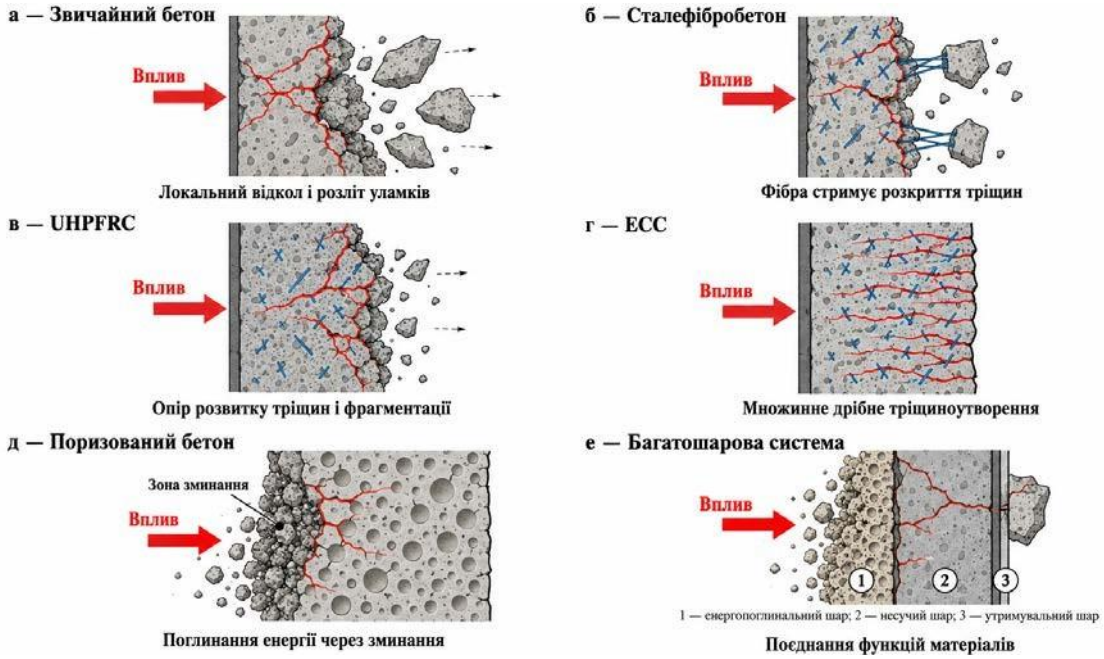

Рисунок 2 – Механізми пошкодження бетонів і композитних систем: червоним позначено тріщини, синім – волокна або утримувальний шар

Висновки

Перспективними матеріалами для стримування тріщин і збереження зв'язності пошкоджених елементів є сталефібробетон, UHPFRC та ECC. Легкі поризовані бетони доцільно досліджувати передусім як енергопоглинальні складові багатошарових систем. Вибір матеріалу необхідно підтверджувати розрахунком і випробуванням конструкції: зменшення локального уламкоутворення саме по собі не гарантує запобігання загальному обваленню будівлі.

Список використаних джерел:

1. Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review. International Journal of Impact Engineering. 2023. Vol. 180. Article 104722. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104722.

2. Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions. International Journal of Impact Engineering. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X16300422.

3. He T., Wang X., Zhou H. Protecting RC Plate Subjected to Combined Effect of Blast and Fragments with ECC. Buildings. 2026. Vol. 16, No. 10. Article 2005. DOI: 10.3390/buildings16102005.

4. Polyurea coating for foamed concrete panel: An efficient way to resist explosion. Defence Technology. 2020. Vol. 16, No. 1. P. 136–149. DOI: 10.1016/j.dt.2019.06.010.

Бондар Альона Василівна – к.т.н., викладач кафедри військової підготовки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, буд. 95, інд. 20021, e-mail: bondarav@vntu.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8098-1181

Bondar Alona – candidate of technical sciences, lecturer at the Department of Military Training, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: bondarav@vntu.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8098-1181