

УДК 624.012; 62.505.5

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.176-184>С.В. Королько^{1*}, О.О. Левковський², М.А. Саницький², Т.П. Кропивницька²¹ Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного² Національний університет «Львівська політехніка»

ЗАХИСНІ УКРИТТЯ З ПІДВИЩЕНОЮ УДАРНОЮ МІЦНІСТЮ НА ОСНОВІ ФІБРОБЕТОНІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

У статті розглядаються проблеми традиційних бетонних укриттів, які застосовуються у сучасних умовах воєнних дій і терористичних загроз. Визначено ключові питання обмеженого застосування залізобетону унаслідок його низької ударної міцності та схильності до спалінгу (spalling). Проаналізовано сучасний стан захисних укриттів та фортифікаційних споруд для захисту особового складу, цивільних та військових об'єктів. Запропоновано використання фібробетонів нового покоління з тривимірним мікроармуванням як перспективного матеріалу для створення споруд з підвищеною ударною міцністю та стійкістю до вибухових навантажень. Окрема увага приділяється модульним захисним укриттям типу «Хоббіт-Хаус», що є інноваційним напрямом у створенні сучасних технічних рішень як для захисту цивільного населення, так і для різноманітних бліндажів, опорних пунктів та фортифікаційних споруд.

Ключові слова: крихке руйнування, спалінг, вибухостійкість, фібробетон, ударна міцність, модульні укриття, Хоббіт-Хаус.

Постановка проблеми

Системи цивільного захисту в Україні та світі стикаються з безпрецедентними викликами. Масовані ракетні обстріли, вибухові навантаження, авіаудари вимагають нових підходів до інженерного захисту людей. Традиційний залізобетон, що десятиліттями був основою захисних споруд, показав низьку ефективність у протистоянні до високошвидкісних ударів [1, 2, 3]. Найбільшою проблемою є крихке руйнування матеріалу. Розвиток сучасних композиційних захисних матеріалів, зокрема фібробетонів нового покоління, відкриває нові можливості для підвищення надійності укриттів.

Бетонні укриття в Україні є одним із ключових елементів захисту цивільного населення та об'єктів критичної інфраструктури. З початком активних бойових дій, особливо у 2023–2025 роках, через постійні атаки ракетами, дронами-камікадзе (БПЛА типу Shahed) та артилерією актуальність будівництва укриттів значно зросла [4, 5]. Такі укриття переважно будують з армованого бетону, що має товсті стіни та перекриття і дозволяє витримувати вибухову хвилю, уламки та навіть часткове завалення [3, 5]. Часто для цивільного захисту активно використовуються старі

радянські захисні споруди (сховища ПРУ), проте їх стан та особливо умови перебування цивільного населення в укритті не завжди відповідають вимогам.

У деяких випадках використовуються модульні конструкції, які можна швидко встановити у районах з підвищеною небезпекою, проте їх кількість є недостатньою, особливо в зонах бойових дій.

Традиційні бетони класу С20/25 і вище характеризуються низькими показниками міцності та крихким характером руйнування. Часто при виготовленні звичайних залізобетонних укриттів не враховуються такі характеристики, як ударна міцність, тріщиностійкість та спалінг. Ці показники відіграють першочергову роль стійкості бетонних укриттів під час високошвидкісного удару. Внаслідок дії удару чи вибухової хвилі основна частина енергії поглинається матеріалом, що призводить до швидкого поширення тріщин. В умовах вибуху з внутрішньої поверхні конструкції відшаровуються та викидаються уламки бетону. Цей ефект створює додатковий фактор ураження, небезпечний для людей. Після серії ударів чи вибухів несуча здатність конструкцій різко знижується, а відновлення укриттів у польових умовах є практично недоцільним та складним завданням [8].

Article history: Income 25 September 2025; Revised 30 September 2025; Accepted 30 October 2025; Print 05 December 2025

Королько С.В. ORCID ID: 0000-0002-3683-1506, Левковський О.О. ORCID ID: 0000-0001-5941-0477,
Саницький М.А. ORCID ID: 0000-0002-8609-6079, Кропивницька Т.П. ORCID ID: 0000-0003-0396-852X

* Corresponding author korolkos@ukr.net

© Королько С.В., Левковський О.О., Саницький М.А., Кропивницька Т.П.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

Узагальнюючи вищенаведене, виникає потреба у розробленні сучасних гібридних захисних укріплень та споруд підвищеної ударної міцності на основі фібробетонів нового покоління, які б забезпечували підвищені показники міцності до ударних навантажень та стійкості до тріщиноутворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасних захисних споруд свідчить, що більшою мірою вони монтуються на основі складальних модулів, які створені з урахуванням сучасних вимог щодо стійкості до ударної хвилі. Серед них – мобільні укриття із залізобетону, спеціальні контейнери, труби великого діаметра або бетонні кільця з перепрофільованих елементів [5, 8, 12]. У багатьох місцях з'явилися «модульні укриття» з товстостінного бетону або металу, які розраховані на короткочасне перебування під час обстрілу. Разом з тим, їх кількість в Україні, враховуючи постійні атаки ворога та умови перебування в цих укриттях, є недостатньо ефективними.

Особливістю укриттів в Україні є їх адаптація до різних типів загроз від артобстрілів, ракет, а також до атак БПЛА. Значну роль відіграє доступність та швидкість спорудження укриттів, тому багато бетонних конструкцій є розбірними з можливістю швидкого демонтажу для переміщення в інше місце. У цивільному секторі спостерігається використання напівзаглиблених конструкцій із додатковими захисними екранами.

Значна увага покладається на відновлення та модернізацію існуючих споруд для цивільного захисту, які б відповідали сучасним вимогам щодо міцності та стійкості до ударних навантажень [8, 9].

В цьому плані активно почали працювати школи та заклади освіти. Зведення укрить та захисних споруд для шкіл і навчальних закладів достатньо ефективно запрацювало в більшості регіонів країни. За інформацією представників ДСНС, майже 80% шкіл уже обладнано діючими бомбосховищами та укриттями [16]. При цьому саме діти та освітяни залишаються вразливою категорією, яка потребує особливого захисту в умовах повітряних атак та надзвичайних ситуацій.

У військовій сфері актуальними є використання зміцнених бліндажів, опорних пунктів, командних та спостережних засобів [17, 18]. У цих випадках активно застосовуються традиційні збірні бетонні блоки, плити, залізобетонні конструкції, колоди з дерева, габіони, земляні насипи, а також модульні броньовані елементи, здатні витримати артилерійські обстріли та удари дронів-камікадзе, на рис. 1 подано типові укриття бліндажів та захисних бетонних споруд.



Рис. 1. Загальний вигляд діючих захисних споруд:
а – типові бліндажі в заглибленнях;
б – залізобетонне укриття

Міцність таких захисних споруд, а тим паче деревних колод та габіонних елементів не завжди відповідає необхідним вимогам за показниками та вимогам європейських стандартів [6, 7]. Так, міцність залізобетонного звичайного укриття досягає класу бетону не вище С20/25. Така конструкція не може забезпечити довготривалий захист після багаторазових ударів. Згідно із стандартами на вогневі споруди ВС1, ВС3 передбачено тільки вимоги щодо міцності бетону на стиск з використанням базових компонентів: цементу, піску, залізних армованих конструкцій та щебеню.

У зв'язку з цим, одним із завдань, які стоять перед військово-промисловим комплексом України, є створення сучасних монолітних укрить з підвищеною ударною міцністю на основі фібробетонів нового покоління, які здатні витримувати прямі удари артснарядів та атак БПЛА, забезпечуючи при цьому максимальний захист особового складу, техніки та цивільного населення.

Сучасні українські бліндажі часто мають багатоповову структуру – поєднання дерева, бетону, геотекстилю, піску та арматури. Вони забезпечуються вентиляцією, електроживленням та мають окремі виходи. В умовах позиційної війни особливо актуальні капітальні підземні укриття, які витримують навіть кілька прямих попадань.

На відміну від типових захисних укрить, в Україні пропонуються високозахищені конструкції, такі як: укриття «ТРО-модулів», спеціальні конструкції для захисту особового складу, залізобетонні капоніри для техніки, бліндажі з бетонних «блоків Лего» та швидкозбірні елементи, які легко перевозити та монтувати. Порівнюючи українські укриття із закордонними аналогами, слід зазначити, що в багатьох арміях НАТО також застосовуються модульні, швидкокомтовані конструкції, наприклад, з HESCO-блоків, «ARPA shelter systems», кам'яно-земляних укріплень [12]. Однак у країнах Заходу більший акцент робиться на логістичну мобільність, стандартизованість та інтеграцію укриття в інженерні системи (електрика, вентиляція, фільтрація повітря тощо... В Ізраїлі для захисту цивільного населення широко використовуються так звані залізобетонні мамоди – укриття у багатоквартирних будинках [12, 14, 15]. Разом з тим,

в ізраїльській армії для захисту особового складу застосовують пересувні захисні модулі, здатні витримувати удари ракет класу «Град». У країнах Балтії, які готуються до можливих конфліктів, укриття облаштовуються заздалегідь у рамках стратегічного планування території.

Натомість в Україні розвиток сучасних укриттів здебільшого спрямований як оперативна відповідь на наявні загрози. Варто зазначити, що використання сучасних композитних матеріалів (базальтовий фібробетон, полімерні елементи, геосинтетика) в українських умовах стає дедалі поширенішим, що у поєднанні з традиційними матеріалами забезпечує оптимальний баланс захисту укриття, швидкості будівництва та вартості.

Традиційний залізобетон, що десятиліттями був основою захисних укриттів та споруд, показав низьку ефективність у протистоянні з високомодульними захисними конструкціями. Найбільшою проблемою в бетонних захисних спорудах є крихке руйнування матеріалу, зумовлене низькою ударною міцністю та явищем спалінгу [13].

Ударна міцність – це здатність матеріалу чинити опір раптовому короточасному навантаженню або удару. Вона показує, скільки енергії може поглинути матеріал при ударі перед тим як зруйнуватись. Вимірюється ударна міцність за допомогою спеціальних тестових випробувань (наприклад, випробування за методом «Шарпі»). Чим більша ударна міцність, тим краща стійкість матеріалу до утворення тріщин. Внаслідок ударного навантаження в бетоні проявляється також явище спалінгу (spalling).

Спалінг – це відшарування або відколювання окремих частинок матеріалу з його поверхні внаслідок сильного механічного або теплового впливу. Спалінг може виникати при ударі або вибуху (броня, бетон, метал, армування, кераміка), раптовому нагріванні або охолодженні окремих шарів конструкції, виникненню внутрішнього тиску та напружень. Найчастіше це трапляється з бетоном, коли волога проникає всередину, викликаючи корозію арматури. При цьому розширення сталі внаслідок іржавіння призводить до утворення мікротріщин на поверхні, які згодом розкриваються, посилюючи подальше руйнування [11, 12, 13].

Явище спалінгу особливо небезпечне для захисних споруд і проявляється, коли уламки внутрішньої поверхні захисного укриття можуть відколюватися з внутрішнього боку. Під час потрапляння снаряда у таку конструкцію зовнішня поверхня перешкоди частково гасить частину кінетичної енергії, руйнуючи поверхневу зону бетону. Після цього іде зона спалінгу, яка під високими стискаючими зусиллями може спричинити розриви на внутрішньому боці захисного матеріалу. При цьому уламки (спали) матеріалу відриваються і

набувають швидкості від поділу енергії. Ці уламки летять всередину з високою швидкістю та можуть пробити захист і поранити особовий склад.

Розгляд сучасних підходів щодо захисту особового складу та створення моделей армованих захисних споруд вимагає застосування сучасних фібробетонів та нових технічних рішень. Перш за все, підвищення стійкості захисних споруд визначається на основі імовірнісної оцінки впливу частоти й інтенсивності ударних навантажень для різних сценаріїв ураження, ймовірності пробиття, сплавлення чи відколювання частинок (spall), пошкодження несучих елементів, ризик загоряння, допустимі деформації та залишкова несуча здатність.

Однією з ключових проблем при створенні тривимірних бетонних конструкцій є недостатня їх стійкість до тріщиноутворення під впливом ударних навантажень [9, 10, 11].

Традиційні методи армування не завжди можуть забезпечити рівномірне зміцнення системи в об'ємі матеріалу. Саме тому фібропідсилення розглядається як перспективна технологія для поліпшення механічних характеристик бетону. Фібра створює внутрішню тривимірну просторову структуру, що підвищує жорсткість конструкції. Металева, полімерна або базальтова фібри виконують роль мікроармування та знижують ризик утворення мікротріщин. Поєднання тривимірної структури фібробетону сприяє рівномірному розподілу навантаження в різних напрямках. Важливо оптимально підібрати тип, довжину, концентрацію та вид фібри для забезпечення необхідної міцності й пластичності бетону, оскільки не завжди рівномірний розподіл фібри або її агломерація в окремих зонах може спричинити ослаблення конструкції, тому важливо забезпечити необхідні методи змішування та укладання бетону, щоб гарантувати рівномірність армування. Загалом, використання фібри в тривимірних бетонних структурах є ефективним засобом зміцнення структури та зменшення явища спалінгу.

Серед типових систем підвищення захисних функцій фібробетонів на перший план висувається так звана багатошарова концепція підвищення ударної міцності та тріщиностійкості. Типовий вигляд двошарової конструкції подано на (рис. 2). Стрілки на рисунку показують напрямок удару і траєкторію руху уламків, а зона спалінгу в основному направлена в бік від основного фронту удару. Багатошарові рознесені шари різних матеріалів поетапно гасять кінетичну енергію удару. Особливо це проявляється з використанням амортизуючих та енергоабсорбуючих вставок [3, 4, 5, 19].

Використання багатошарових матеріалів забезпечує зменшення просторового навантаження на основну конструкцію та забезпечує стійкість

бетонної споруди в цілому. У зв'язку з цим, використовуються технології спал-лайнера - підкладки між зовнішнім та внутрішнім шарами. Це фіксує (гальмує) уламки, знижує їх енергію та розліт. При цьому внутрішня захисна конструкція повинна зберігати каркасну структуру навіть при багаторазовому ударному навантаженні та захищати викид уламків всередину тіла.

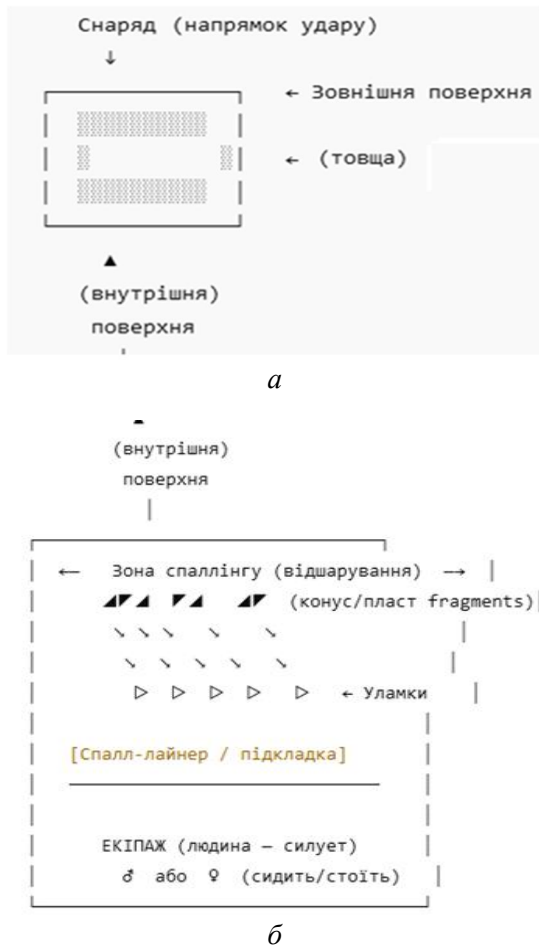


Рис. 2. Типова двохшарова модель укриття
а – типовий шар дворівневого захисту;
б – зона спалінгу в матеріалі бетону із спал-лайнеровою підкладкою

Часто в якості додаткових перешкод перед основною бетонною конструкцією використовують додаткові захисні матеріали, сітки, троси, зовнішні екрани сакрифіційні панелі, монолітні оболонки з додаткового армованого бетону та композитів або внутрішні енергоакумулюючі шари для поглинання ударної хвилі [3, 19].

Розвиток сучасних захисних матеріалів з використанням фібробетонів нового покоління, що характеризуються підвищеною стійкістю до ударних навантажень в просторовій структурі внутрішнього захисного шару, відкриває нові можливості захисних споруд, які б забезпечували підвищені показники тріщиностійкості до ударних навантажень внаслідок виникнення явища спалінгу.

Мета досліджень

Метою статті є аналіз сучасного стану діючих та новітніх сучасних захисних бетонних укриттів та фортифікаційних споруд із врахуванням явища спалінгу та застосуванням фібробетонів нового покоління для захисту особового складу, які відповідають сучасним вимогам за міцністю та стійкістю до ударних навантажень.

Виклад основного матеріалу

Фібробетони нового покоління можна віднести до композиційних матеріалів, у яких рівномірно розподілені волокна, що забезпечують тривимірне армування структури. Застосування сталевих, поліпропіленових, базальтових та гібридних фібри дозволяє поєднати міцність, вогнестійкість та енергопоглинання від ударних навантажень. До переваг фібробетонів можна віднести підвищену ударну міцність, зниження ймовірності спалінгу та збереження несучої здатності після серії ударів.

Для вивчення властивостей традиційного залізобетону і фіброармованого бетону нового покоління проведено порівняння їх параметрів, які наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри залізобетону та фібробетону

Параметр	Залізобетон	Фібробетон нового покоління
Ударна міцність	Низька, крихке руйнування	Високе енергопоглинання у 2–4 рази більше
Стійкість до спалінгу	Високий ризик відшарування уламків	Знижений ризик, фібра утримує уламки
Тріщиностійкість	Низька	Висока, завдяки мікроармуванню
Довговічність	Знижується після серії ударів	Зберігає міцність навіть після багаторазових ударних навантажень

Актуальним є вивчення залежності розвитку явища спалінгу від ударної хвилі. Для аналізу порівняльних досліджень та ризиків тріщиноутворення введено коефіцієнт сапалінгу R , який характеризує співвідношення $\sigma_{t,max} / f_{t,dyn}$.

У зв'язку з цим проведено порівняльні дослідження коефіцієнта сапалінгу від величини пікового надлишкового тиску p_s (рис. 3). Представлений графік показує залежність показника ризику сапалінгу $R = \sigma_{t,max} / f_{t,dyn}$ від пікового надлишкового тиску p_s вибухової хвилі. Так для звичайного залізобетону поріг сапалінгу R більше 1 проявляється при надлишковому тиску $p_{s,crit}$, який у порівнянні з статичним тиском вдвічі більший за динамічний тиск $f_{t,dyn}$.

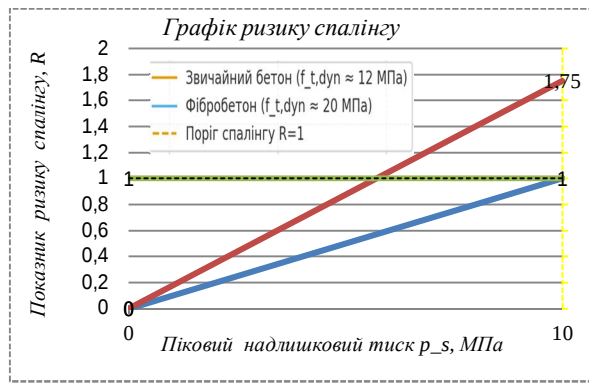


Рис. 3. Залежність показника ризику спалінгу R від пікового надлишкового тиску p_s , МПа, де: R – поріг салінгу; p_s – піковий надлишковий тиск

При сталому вдвічі більшому співвідношенні пікового статичного надлишкового тиску $p_{s,стат}$, МПа та динамічного тиску $f_{t,dyn}$, МПа можна відобразити типову картину оцінки ризику салінгу в залізобетонних конструкціях та фібробетонах нового покоління

$$p_{s,crit} = f_{t,dyn} / 2.$$

Так, для звичайного залізобетону при статистичному навантаженні співвідношення $f_{t,dyn} = 10$ МПа, а $p_{s,crit} \approx 6,0$ МПа. Тоді як для фібробетону при цих же умовах $f_{t,dyn}$ буде становити 20 МПа, а $p_{s,crit}$ відповідно 10 МПа. Підвищення динамічного навантаження $f_{t,dyn}$ за рахунок використання армуючих волокон змщує поріг кривої праворуч та зменшує ймовірність спалінгу при фіксованому надлишковому тиску p_s .

В результаті порівняльних досліджень механізму впливу ударної хвилі на будівлі та споруди та аналізу руйнівних ефектів, що виникають внаслідок вибухів або інших джерел, що створюють ударні хвилі, можна передбачити появу спалінгу. Результати досліджень можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо проектування будівель, підвищення їх стійкості до вибухових навантажень та мінімізації наслідків руйнувань.

Ударна хвиля – це область різкого стискання атмосферного тиску з висотою, яка у вигляді сферичної хвилі розповсюджується в усі боки від місця вибуху зі швидкістю, що перевищує швидкість звуку. В результаті ударної хвилі близько до джерела виникає зона сильних руйнувань (надлишковий тиск у фронті ударної хвилі становить від 30 до 50 кПа) [5, 19]. У цій зоні наземні будинки і споруди одержують сильні руйнування, утворюються місцеві завали, виникають суцільні і масові пожежі. Більшість сховищ буде збережена, проте в окремих сховищах можуть бути завалені входи і виходи. Застосування

фібробетонів нового покоління дає змогу підвищити міцність захисних укриттів під час ураження вибуховою хвилею.

Фібробетони нового покоління формуються шляхом введення сталевих, полімерних, базальтових та гібридних волокон, які створюють тривимірне мікроармування. Це суттєво підвищує ударну міцність та енергопоглинальну здатність бетону. В умовах сучасних загроз, актуальним є підвищення ударної в'язкості бетонів, що використовуються для їх зведення. Показник ударної в'язкості (англ. impact toughness) характеризує здатність матеріалу поглинати енергію при ударному навантаженні до моменту руйнування. Так, для звичайного важкого бетону класу С32/40 ударна в'язкість є відносно низькою через крихкий характер матеріалу. За даними досліджень [17], значення ударної в'язкості можуть коливатися для звичайного бетону С32/40 близько 1–3 кДж/м², а енергія руйнування при одиничному ударі ≈ 5 –15 Дж (залежно від типу випробування). Натомість, для дисперсно-армованих фібробетонів (з сталевую, базальтовою або комбінованою фіброю) ударна в'язкість зростає від 8 до 30 кДж/м². Тобто, величина енергії руйнування може зростати в межах від 3 до 10 разів. Особливо високі показники досягаються при використанні сталевих фібри в кількості 0,5–1,5% за об'ємом та з довжиною волокон від 20 до 50 мм.

Застосування фібри знижує ризик утворення спалінгу, утримуючи уламки та гальмуючи розвиток тріщин. Додатковими перевагами є сумісність з сучасними суперпластифікаторами та нанодобавками, підвищена тріщиностійкість, довговічність і можливість виготовлення самоущільнювальних та швидкотверднучих сумішей.

У сучасному будівництві споруд дедалі ширше застосовуються суперпластифікатори нового покоління (гіперпластифікатори), основою яких зазвичай є полікарбоксилатні етери. Ці хімічні добавки призначені для значного підвищення рухливості бетонної суміші без збільшення водоцементного співвідношення. Завдяки електростатичному відштовхуванню та стеричному ефекту, ці гіперпластифікатори забезпечують стабільну дисперсію цементних частинок, що у свою чергу сприяє рівномірному твердненню та зменшенню усадки. Це особливо важливо при виготовленні високоміцних, самоущільнюючих і довговічних фібробетонів, які використовуються в сучасних захисних спорудах [8, 10, 11]. Крім того, застосування гіперпластифікаторів дозволяє зменшити кількість цементу в суміші, знижуючи витрати на матеріали та екологічне навантаження [8, 9]. Ще однією перевагою є подовжений час збереження рухливості бетонної суміші, що полегшує транспортування та укладання бетону на великих

об'єктах. Сучасні дослідження та інноваційні розробки зосереджені на удосконаленні структури полікарбонатів для підвищення сумісності з різними типами цементу, що відкриває нові перспективи для інновацій у бетонних технологіях та створення на їх основі нових композитних матеріалів, які можна назвати балістичними бетонами нового покоління.

Поряд з основними характеристиками сучасні високоміцні фібробетони для захисних укриттів повинні відповідати класу в межах С30/37...С45/55. Це важкий бетон, що використовується для споруд із підвищеними вимогами до міцності та довговічності. Такий бетон забезпечує високу опірність до механічних ударних навантажень та агресивних впливів середовища. Основними аспектами формування фібробетонів нового покоління з підвищеною ударною в'язкістю є об'єктивний підбір складу бетону, його параметри рухливості та кінцеві характеристики сформованої конструкції.

В якості в'язучого компоненту для фібробетону рекомендовано використовувати портландцементи СЕМ II/A-S 42,5 R ПрАТ «Івано-Франківськцемент», кварцовий пісок, гранітний або базальтовий щебінь фракції 5-20 мм, а також полікарбонатний суперпластифікатор, мінеральні добавки, сталеву фібру (30-60 мм) та полімерні або базальтові волокна. При цьому найбільш ефективним є використання комбінованих видів фібри, які забезпечують формування комплексної матриці бетону. Матриця містить як сталі, так і мікрофіброві волокна. Типові представники фібру з різним ефектом дії представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Дія різних типів фібру на матрицю бетону

Тип фібри	Дія фібри в матриці бетону
Сталева фібру (30-60 мм)	Підвищує енергоємність руйнування, гасить тріщини
Базальтова фібру	Підвищує термічну стійкість та тріщиностійкість
Поліпропіленова фібру	Знижує утворення мікротріщин, особливо при нагріванні

Використання багатофракційних заповнювачів, покращує щільність структури бетону та зменшує кількість мікропор і капілярів, зменшуючи зону локалізації напружень при ударі. Вони зменшують пористість, підвищують зв'язок цементного каменю та заповнювача, знижують водоцементне відношення ($B/C \leq 0,38$), що сприяє зменшенню капілярної пористості, підвищенню щільності цементного каменю та надзвичайно важливо при ударному навантаженні. При цьому в зовнішньому армуванні у практиці фортифікації застосовують фібробетон в комплексі із зовнішнім шаром полімербетону або їх комбінування з амортизуючими прошарками (гумові мати, ізоляція).

До основних показників ударостійкого балістичного бетону класу С45/55 можна віднести фібробетони з міцністю на стиск: ≥ 55 МПа, модулем пружності ≥ 35 ГПа, міцністю на розтяг при згині ≥ 8 МПа.

При цьому балістичні бетони проявляють високу тріщиностійкість та зниження ефекту спалінгу. Для об'єктивного порівняльного аналізу стійкості традиційних залізобетонних укриттів та сучасних фіброармованих захисних споруд наведено їх основні параметри в умовних балах (рис. 4). Аналіз основних характеристик бетонів показує, що фіброармовані бетони нового покоління у порівнянні з традиційним залізобетоном в декілька разів перевищують свої показники за більшістю основних їх характеристик.

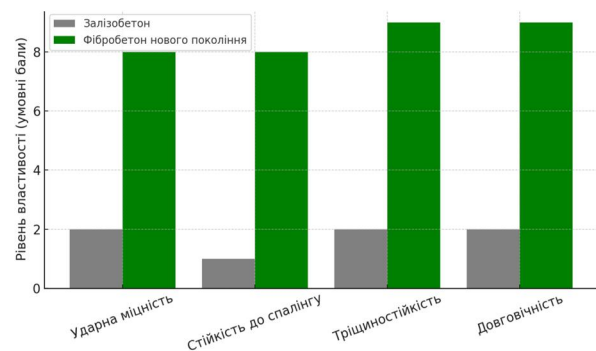


Рис. 4. Порівняльна характеристика традиційного та фіброармованого бетону нового покоління

Застосування інноваційних технологій та сучасних технічних рішень як для захисту цивільного населення, так і при виготовленні різноманітних бліндажів, опорних пунктів та фортифікаційних споруд у військовій справі активно використовується сучасними підприємствами, зокрема компанією «Hobbit House», яка спеціалізується на виробництві модульних захисних укриттів для цивільного захисту. Такі бетонні захисні укриття відзначаються високою міцністю та швидким монтажем [15, 19]. Ці укриття призначені для індивідуального та масового захисту населення, а також для використання підприємствами та енергетичними компаніями (рис. 5).



Рис. 5. Захисне укриття «Будинок Хоббіта»: а – типовий вигляд, б – напівзаглиблене укриття

Модульні укриття Hobbit House здатні витримувати повітряну ударну хвилю тиском 100, 200 або 300 кілопаскалів, що втричі перевищує державний

стандарт для укриттів цивільного захисту [19]. Для порівняння, ударна хвиля тиском 100 кПа може зрушити танк з місця та є смертельною для людини.

До переваг таких укриттів можна віднести модульність (укриття складаються з окремих модулів), що дозволяє швидко збирати конструкцію на місці, встановлювати та адаптувати її до необхідної місткості та призначення. Ця конструкція обладнана наземними вертикальними ребрами жорсткості (контрфорсами) згідно з нормами ДСТУ 9195:2022, що підвищує їхню стійкість до зовнішніх навантажень та універсальність конструкції. Такі укриття можуть бути використані як для особистого захисту, так і для захисту закладів освіти, підприємств та інших об'єктів інфраструктури.

Модульні оболонкові конструкції типу «Hobbit House» є інноваційним рішенням для швидкого будівництва укриттів. Сегментні елементи, які виготовлені з фібробетонів нового покоління, забезпечують підвищену стійкість до вибухових хвиль та ударних навантажень. Модульність дозволяє швидко розгортати споруди у зонах бойових дій, а також здійснювати їх ремонт і модернізацію.

В результаті аналізу застосування фібробетону з підвищеними характеристиками стійкості до ударних навантажень та зниженим показником салінгу можна запропонувати наступні перспективні шляхи розвитку:

1. Використання 3D-друку для виготовлення фібробетонів та їх швидкого будівництва і монтажу фібробетонних елементів конструкції.

2. Підвищення енергоефективності та комфортності укриттів.

3. Стандартизація модульних рішень для військових технологій та цивільного захисту.

Висновки

1. У статті проведено комплексний аналіз сучасного стану захисних укриттів та показано, що використання фібробетонів нового покоління дозволяє значно підвищити їх ударну міцність та стійкість до вибухових навантажень.

2. Явище спалінгу у фібробетонних конструкціях може бути зведене до мінімуму завдяки введенню фібри та оптимізації складів модифікованих бетонів.

3. Впровадження нових технічних рішень з використанням багатошарових фібробетонних матеріалів та демпферованих підкладок підвищить ефективність комплексної системи захисту ударопоглинаючих балістичних фібробетонів.

4. Модульні рішення на основі фібробетонів оболонкового типу «Хоббіт Хаус» відкривають нові можливості у створенні сучасних захисних і фортифікаційних споруд.

5. Створення гібридних високоміцних фібробетонів можна віднести до сучасних балістичних

бетонів нового покоління, які створюють більш якісніші та надійніші умови для збереження життя і захисту особового складу від типових загроз в умовах війни.

Список літератури

1. Юрченко В., Соколовський І. Шляхи удосконалення інженерно-технічних заходів цивільного захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах особливого періоду. *Науковий вісник: Державне управління*. 2023. № 1 (13). [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1\(13\)-291-312](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1(13)-291-312)
2. Беліков А. С., Налисько М. М., Подкопась С.В.З., Шиба О. В., Журбенко В. М. Використання захисних модульних споруд та захист населення в умовах воєнного стану на території України. *Український журнал будівництва та архітектури*. № 2 (026). 2025, К. КНУБА. С. 7-17. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.07.1138>
3. Neville A.M. *Properties of Concrete*. Pearson Education, 2011. <http://www.pearsoned.co.uk>
4. Jacobsen E.K., Kristoffersen M., Dey S., Borvik T.. Sustainable shielding: Ballistic performance of low-carbon concrete. *Construction and Building Materials* 415. 2024. 135103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135103
5. Мартиновський К., Плоский В., Михальченко С., Скочко В. Аналіз впливу дії ударної хвилі на будівлі і споруди. *Build-Master-Class-2024 : International scientific conference of young scientists*, Kyiv, 5-7 november 2024 Kyiv : KNUBA, 2024. С. 207-208. DOI: 10.59647/978-617-520-936-3/1
6. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту : [Введений у дію з 01-11- 2023]. К.: Мінеріон України, 2023. 112 с.
7. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-7:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи (EN 1991-1-7:2006/A1:2014, IDT). Зміна № 2:2018.
8. Moein M., Saradar A., Rahmati K., Hatami Shirkouh A., Sadrinejad I., Aramali V., Karakouzian M. Investigation of Impact Resistance of High-Strength Portland Cement Concrete Containing Steel Fibers. *Materials* 2022, 15, 7157. <https://doi.org/10.3390/ma15207157>
9. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Shyiko O., Bobetsky Y., Volianiuk A. High strength steel fiber reinforced concrete for fortification protected structures. *Theory and Building Practice*. 2023. Vol. 5, № 1. pp. 37–42. <https://doi.org/10.23939/jtbp2023.01.037>
10. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Vakhula O., Bobetsky Y. Nanomodified ultra high-performance fiber reinforced cementitious composites with enhanced operational characteristics. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Vol. 438. pp. 362–371. DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_36
11. Королько С.В., Саницький М.А., Кропивницька Т.П., та інші Перспективи використання високоміцних фібробетонів як основи формування захисних укриттів та фортифікаційних споруд під час російсько-української війни. *Військово-технічний збірник*. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.25-33>
12. Han S., Kim G., Han S., Lee Y., Eu H., Choi Y. J. Residual impact resistance of hybrid fiber-reinforced cementitious composites after thermal degradation. *Construction and Building Materials*. Vol. 472, 18 April 2025, 141002 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141002>

13. Esaker M., Thermou G. E., Neves L. Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 180, October 2023, 104722 DOI: doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104722

14. Malik T.V., Kovalyov, Yu. M. Kalashnikova V. V., Nerusheva V. M. Multi-criteria optimization of civil shelters design in Ukraine taking into account israeli experience № 2 2023. DOI: https://doi.org/10.30857/2617-0272.2023.2.15

15. Левковський О.О. Левковська І. М. "Модульне захисне сховище". Пат. на корисну модель № 151558 Номер заявки u202201417 Дата подання заявки - 03.05.2022, Опубліковано 10.08.2022.

16. https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3954589

17. Волощенко О.І., Косенко В.С., Ковбаса О.Ю., Черних І.В., Капля І.О. Методичний підхід щодо визначення стійкості конструкцій покриття польових фортифікаційних споруд до ударновивбухової дії сучасної ракетної зброї. *Вісник: Опір матеріалів і теорія споруд*. 2023. КНУБА № 111 С. 178-187. doi: 10.32347/2410-2547.2023.111.178-187

18. Коцюрuba В.І., Білик А.С., Бзот В.Б., Дзевєрін І.Г. Захист об'єктів критичної інфраструктури України від прямих влучань ракет за допомогою підземного розташування. *Журнал ISSN 2073-6321. Ядерна та радіаційна безпека*. 2(98). 2023. С. 69-79. DOI: https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).07

19. https://hobbithouse.com.ua/

References

1. Yurchenko V. and Sokolovskiy I. (2023), "Shliakhy udoskonalennia inzhenerno-tehnichnykh zakhodiv tsyvilnoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury v umovakh osoblyvoho periodu" [Ways to improve engineering and technical measures for the protection of civil infrastructure facilities in the conditions of a special period]. *Scientific Bulletin: Public Administration*, No. 1(13). https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1(13)-291-312 [in Ukrainian]

2. Bielikov A.S., Nalysko M.M., Podkopaiev S.V., Shyba O.V. and Zhurbanko V.M. (2025), "Vykorystannia zakhysnykh modulnykh sporud ta zakhyst naselennia v umovakh voiennoho stanu na terytorii Ukrainy" [Use of modular shelters and shelters for the population in conditions of martial law on the territory of Ukraine]. *Ukrainian Journal of Construction and Architecture*, № 2(026), pp. 7–17. DOI: https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.07.1138 [in Ukrainian]

3. Neville A.M. Properties of Concrete. Pearson Education, 2011. http://www.pearsoned.co.uk

4 Jacobsen E.K., Kristoffersen M., Dey S., Borvik T.. Sustainable shielding: Ballistic performance of low-carbon concrete. *Construction and Building Materials* 415 (2024) 135103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135103

5. Martynovskiy K., Ploskiy V., Mykhalchenko S. and Skochko V. "Analiz vplyvu dii udarnoi khvyli na budivli i sporudy" [Analysis of the impact of shock waves on buildings and structures]. In *Build-Master – 2024: International Scientific Conference of Young Scientists*, Kyiv, 5–7 November 2024. KNUBA, 2024, pp. 207-208. DOI: 10.59647/978-617-520-936-3/1 [in Ukrainian]

6. (2023), DBN V.2.2-5:2023. Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu [Civil defense structures]. Kyiv: *Minregion Ukrainy*. 112 p. [in Ukrainian]

7. (2018), DSTU-N B EN 1991-1-7:2010. "Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-7: General actions – Accidental actions" [Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-7: General actions – Accidental actions]. Kyiv. (Amendment No. 2). [in Ukrainian]

8. Moein M., Saradar A., Rahmati K., Hatami Shirkouh A., Sadrinejad I., Aramali V. and Karakouzian M. (2022), Investigation of Impact Resistance of High-Strength Portland Cement Concrete Containing Steel Fibers. *Materials*, 15, 7157. https://doi.org/10.3390/ma15207157

9. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Shyiko O., Bobetsky Y. and Volianiuk A. (2023), High strength steel fiber reinforced concrete for fortification protected structures. *Theory and Building Practice*. Vol. 5, № 1. pp. 37–42. https://doi.org/10.23939/jtbp2023.01.037

10. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Vakhula O. and Bobetsky Y. (2023), Nanomodified ultra high-performance fiber reinforced cementitious composites with enhanced operational characteristics. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 438 pp. 362–371 DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_36

11. Korolko S.V., Sanytsky M.A., Kropyvnytska T.P. and et. "Perspektyvy vykorystannia vysokomitsnykh fibrobetoniv yak osnovy formuvannia zakhysnykh ukryttiv ta fortyfikatsiinykh sporud pid chas rosiisko-ukrainskoi viiny" [Prospects for the use of high-strength fiber concrete as a basis for the formation of protective shelters and fortification structures during the Russian-Ukrainian war]. *Military-Technical Collection*, 2023, pp. 25–33. DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.25-33 [in Ukrainian]

12. Han S., Kim G., Han S., Lee Y., Eu H. and Choi Y.J. (2025), Residual impact resistance of hybrid fiber-reinforced cementitious composites after thermal degradation. *Construction and Building Materials*. Vol. 472, 141002. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141002

13. Esaker M., Thermou G.E. and Neves L. (2023), Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 180, October 2023, 104722. doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104722

14. Malik T.V., Kovalyov Yu.M., Kalashnikova V.V. and, Nerusheva V.M. (2023), Multi-criteria optimization of civil shelters design in Ukraine taking into account Israeli experience. No. 2. DOI: https://doi.org/10.30857/2617-0272.2023.2.15

15. Levkovskiy O.O. and Levkovska I.M. (2022), "Modulne zakhysne skhovyshche. Utility Model Patent No. 151558, Application u202201417, Filed 03.05.2022, Published 10.08.2022" [Modular folding storage. Utility Model Patent No. 151558, Application u202201417, Filed 05/03/2022, Published 08/10/2022]. [in Ukrainian]

16. *Ukrinform*. Ukrainian News Agency. https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3954589 [in Ukrainian]

17. Voloshchenko O.I., Kosenko V.S., Kovbasa O.Yu., Chernykh I.V. and Kaplia I.O. (2023), "Metodychnyi pidkhid shchodo vyznachennia stiikosti konstruksii pokryttia polovoykh fortyfikatsiinykh sporud do udarnovybukhovoї dii

suchasnoi raketnoi zbroi" [Methodological approach to determining the strength of the construction of the floor of the fortification structure for the impact of modern rocket weapons]. *Visnyk: Material and theoretical support of structures*, KNUBA, No. 111, pp. 178–187. DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.178-187 [in Ukrainian]

18. Kotsiuruba V.I., Bielyk A.S., Bzot V.B. and Dzeverin I.H. (2023), "Zakhyst ob'ektiv krytychnoi infrastruktury Ukrainy

vid priamykh vluchan raket za dopomohoiu pidzemnoho rozmishchennia" [Destruction of Ukraine's indoor infrastructure targets by direct missile hits using underground deployment]. *Yaderna ta Radiatsiina Bezpeka*, No.2 (98), pp. 69-79. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).07) [in Ukrainian]

19. Hobbit House Project. <https://hobbithouse.com.ua/> [in Ukrainian]

PROTECTIVE COVERINGS WITH INCREASED IMPACT STRENGTH BASED ON NEW GENERATION FIBER-REINFORCED CONCRETES

S.V. Korolko, O.O. Levkovskiy, M.A. Sanytskyi, T.P. Kropyvnytska

The article examines the shortcomings of traditional concrete shelters used in modern conditions of warfare and increasing terrorist threats. The main problems associated with the limited use of reinforced concrete are identified, in particular its low impact strength and susceptibility to spalling under explosive loads. The current state and effectiveness of existing fortification structures designed to protect personnel, civilians, and critical military facilities are analyzed. The causes of premature failure of concrete structures under intensive dynamic effects are discussed. The necessity of transitioning to the use of new-generation materials capable of providing enhanced safety and durability is substantiated.

The paper proposes the use of fiber-reinforced concretes with three-dimensional micro-reinforcement as a promising material for creating structures with improved energy absorption capacity and high explosion resistance. It is shown that the incorporation of micro- and nanofibers into the concrete matrix significantly reduces the risk of cracking and local failure under impact loading. Special attention is given to modular protective shelters of the "Hobbit House" type, which represent an innovative approach to designing dual-purpose structures. Such constructions combine mobility, ease of installation, and excellent performance characteristics. They can be effectively used not only in the military sphere but also in civil protection during emergencies and typical threat situations. The prospects for implementing new structural solutions based on the combination of fiber-reinforced concrete with other composite materials are considered.

Keywords: brittle failure, spalling, blast resistance, fiber-reinforced concrete, impact strength, modular shelters, Hobbit House, composite materials, micro-reinforcement, fortification structures.