

oscillations of the sprung body and oscillations of unsprung masses are calculated from these input data. For each suspension, its kinematics, twisting angles of torsions, forces in damping devices and the amount of movement of their working bodies and deformation of rubber joints and tires are calculated. Next, the magnitude and sign of the change in the total energy of the sprung body and the sprung system at each moment of time is determined. Based on the additional energy calculated using the efficiency coefficients of the engine and transmission, the additional power supplied by the power plant and, accordingly, additional fuel consumption are determined.

Thus, it is possible to evaluate and compare with each other the reduction in the range of the armored combat vehicle, which is caused by the fluctuations of the sprung body and the operation of the suspension system, depending on the type and characteristics of the suspension, when driving in specific road conditions, at the given speed modes. With the help of the developed methodology, it is possible to carry out structural and parametric optimization of the suspension kinematics and the characteristics of its elastic elements and damping devices, in order to reduce fuel consumption and increase the autonomy of the armored combat vehicle. This technique will be useful in assessing the expediency of using the energy recovery system of the suspension system, depending on the purpose and conditions of operation of combat armored vehicles.

**Keywords:** armored combat vehicle, suspension system, vibration energy of the suspension body, energy losses in the suspension, autonomy, fuel consumption, road conditions, speed modes.

УДК: 624.012; 62.505.5

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.25-33>

С.В. Королько<sup>1</sup>, М.А. Саницький<sup>2</sup>, Т.П. Кропивницька<sup>2</sup>, А.О. Дзюба<sup>1</sup>, Ю.В. Шабатура<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

<sup>2</sup> Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Article history: Received 20 March 2023; Revised 23 March 2023; Accepted 31 March 2023

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ФІБРОБЕТОНІВ ЯК ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЗАХИСНИХ УКРИТТІВ ТА ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД ПІД ЧАС РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ

Проведено всебічний огляд сучасного стану захисних укриттів та фортифікаційних споруд на основі фібробетонів. Проаналізовано перспективи використання фібри для створення захисних бетонних конструкцій та фортифікаційних споруд оболонкового типу, військових і цивільних об'єктів відповідно до вимог стандартів. Досліджено вплив базальтової та сталеві фібри на стійкісні і міцнісні характеристики високоміцного армованого бетону. Встановлено, що введення базальтової фібри до складу цементуючої системи суттєво покращує міцність на розтяг при згині та стиск, підвищує тріщиностійкість та ударну міцність високоміцного бетону порівняно з традиційним армованим бетоном. Проведено порівняльний розрахунок необхідної товщини армованих фібробетонних плит для захисту від куль та снарядів.

**Ключові слова:** фібробетон, гібридний бетон, базальтові та поліпропіленові волокна, фортифікаційні споруди, сталеві арматура, фізико-механічні властивості.

### Постановка проблеми

Повномасштабна збройна агресія російської федерації проти України стала наслідком так званої восьмирічної “гібридної” війни в Україні. Починаючи ще з 2014 року, в результаті агресії росії на східних теренах України, а особливо збройного наступу 24.02.2022 року із застосуванням ворогом ракет призвело до значних руйнувань об'єктів цивільної інфраструктури, ушкоджень зазнали військові та цивільні об'єкти, зруйновано багато будівель та споруд.

Одним із суттєвих елементів стримування військової агресії та захисту від ураження військових і цивільних об'єктів є якісний стан захисних укриттів,

споруд та конструкцій [1]. Від надійності захисних укриттів залежить витривалість оборонних елементів на полі бою та їх стійкість як укриттів для захисту цивільного населення. Тому одним із завдань, які стоять перед Військово-промисловим комплексом України, є підтримання в належному стані, відновлення та модернізація існуючих, а також створення нових сучасних захисних споруд, укриттів, бліндажів, які б відповідали новітнім вимогам щодо міцності та стійкості до ударних навантажень [1, 3, 13, 14].

Враховуючи масштаби збройної агресії росії, Збройні сили України для боротьби з ворогом потребують створення нових мобільних фортифікаційних споруд, що вимагає значних ресурсів для їх

виготовлення та проведення робіт з відновлення зруйнованих будівель. Глобальною стає потреба у створенні нового житла, яке б передбачало наявність споруд подвійного призначення. При цьому все це відбувається в умовах порушеної загальної інфраструктури в державі.

Одним із найбільш використовуваних будівельних матеріалів для оборонних споруд є залізобетон. На його основі виготовляють захисні споруди, опорні пункти, бліндажі, фортифікаційні загороження, які не завжди можуть витримувати значні ударні навантаження від дії куль і снарядів різної потужності. Арматура в традиційних бетонних елементах забезпечує стійкість конструкції в цілому, але погано працює в умовах багаторазових точкових навантажень ударного характеру.

З цього погляду актуальним є питання формування бетонних захисних споруд за сучасними принципами створення ефективних матеріалів з використанням гібридних видів фібри на мезо- та мікрорівнях [8, 9]. Шляхом використання дисперсних волокнистих матеріалів та модифікування бетонів органо-мінеральними і пластифікувальними добавками різної дії можна отримати фібробетони з підвищеними показниками міцності та стійкості до ударних навантажень. Це вимагає відповідного вибору спеціальних технологій приготування бетонних сумішей під час створення нових захисних бетонних укріплень та виконання ремонтних і відновлювальних робіт.

Узагальнюючи вищенаведене, виникає не обхідність розроблення сучасних гібридних залізобетонних захисних укріплень та споруд з використанням сталевих арматур та тонкодисперсних фібр, які б забезпечували підвищені показники стійкості залізобетонних елементів до тріщиноутворення та ударних навантажень.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Одним із недоліків використання захисних укріплень, бліндажів, опорних пунктів на основі традиційного залізобетону є відносно низькі параметри стійкості бетонних укріплень під час численних обстрілів з різних видів озброєння.

Відомо, що залізобетон як конструкційний матеріал широко використовується в укріпленнях та захисних спорудах для різноманітних підземних укріплень та ангарів. Разом з тим, залежно від рівня напружено-деформованого стану системи властивості залізобетону суттєво відрізняються від інших типів матеріалів. Значна неоднорідність армованого бетону, анізотропія та просторова нелінійність, тріщиноутворення та ряд властивостей залізобетону виявляються вже на початкових стадіях формування структури. Внаслідок зростання рівня навантаженості спостерігається відмінність деформативних властивостей

бетону і арматури [2, 3, 6, 10, 11]. Це викликає перерозподіл напружень, зменшується інтегральна жорсткість перерізів, збільшується переміщення, змінюються внутрішні зусилля між окремими ділянками конструкції.

Значною небезпекою під час обстрілів захисних споруд артилерією та стрілецькою зброєю є поранення особового складу уламками вколотого бетону [1, 12]. Для зменшення небезпеки утворення уламків бетону часто використовують багат шарові покриття, які мають підвищену ударну стійкість. Так бетонна плита, що армована суцільним листом, або плита, армована подвійною сіткою з поперечною арматурою, зазнає менших ушкоджень, проте вимагає значної металоемності конструкції та ускладнює процес виготовлення таких бетонів [2, 3]. У роботах Бабица С.М. показано [5], що під час руйнування армованих бетонних захисних конструкцій під час ударних навантажень бетон повинен мати високу міцність і низький модуль пружних деформацій.

Зведення фортифікаційних споруд неможливе без урахування їх реакції на динамічні навантаження [13]. Так внаслідок високошвидкісних ударних навантажень під час обстрілів традиційних бетонних елементів відбувається деформація стиску й зсуву шарів та сколів бетону в найслабших місцях з утворенням значної кількості вихідних відколотих частин неправильної форми [8, 12]. При подальшому проникненні кулі в товщу бетону утворюються локальні тріщини, що призводить до руйнування конструкції. Наявність фіброволокон по всьому об'єму матеріалу забезпечує рівномірний перерозподіл напружень та створює нові покращені властивості такого матеріалу. Волокна у фібробетоні знижують або повністю виключають розтріскування від пластичної усадки, а наявність полімерних композицій дозволяє підвищити в'язкість і тріщиностійкість системи та забезпечує стійкість конструкції до масштабного руйнування внаслідок підвищеної пластичної деформації. При цьому збільшується також міцність, морозостійкість, водонепроникність та довговічність фібробетону [8].

Щоб зменшити напружений стан та підвищити довговічність бетону, широко використовуються природні та штучні фіброві волокна. Найбільш широко застосовують поліпропіленові та базальтові фіброві волокна [12].

Авторами [8, 11, 12] показано, що введення від 0,2 до 1,0 мас.% мікрофібри у бетоні забезпечує підвищення міцності на стиск на 20-40%, на згин у 1,5-2,0 раза. При осьовому розриві міцність зростає на 55-65%, модуль пружності – на 20-25%, опір до ударних навантажень збільшується на 10-12%. Міцність на стиск зразків-кубів високоміцного фібробетону, модифікованого полімерними композиціями,

до складу яких входять активні мінеральні добавки, полімери та пластифікатори, досягає 80–120 МПа [8].

Збройні сили України в умовах повно масштабної війни потребують нових конструктивних рішень, методів моделювання та проектування нових фортифікаційних споруд та спеціальних об'єктів оболонкового типу з використанням сучасних будівельних матеріалів і технологій зведення таких споруд [4].

Широко відомим у фахових колах є спільний проєкт компанії ТзОВ «Індустрія ЛВ» і ТзОВ «Хоббіт Хаус» – так званий «Будинок Хоббіта» (рис. 1).

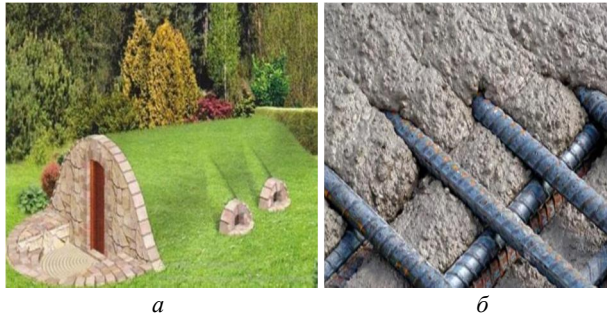


Рис. 1. Захисне укриття «Будинок Хоббіта»: а) – зовнішній вигляд; б) – залізобетонна конструкція

Це модульні захисні сховища, які спроектовані з використанням сучасних технологій та матеріалів для захисту людей від ураження. Бетони класу міцності В35–В40 застосовуються у військовому будівництві для зведення об'єктів, стійких до впливу уражаючих факторів. Це можуть бути бункери, у тому числі із захистом від ядерної зброї.

Подібний досвід формування невеликих оболонкових укриттів поширений у закордонній практиці. Багато країн мають розвинену систему укриттів та сховищ для захисту цивільного населення. Так, зокрема у Фінляндії, Швеції та Швейцарії найбільше розроблені системи різноманітних укриттів. Через високу ймовірність обстрілів та вимоги якнайшвидшого реагування для забезпечення захисту людей в Ізраїлі використовуються чимало типів укриттів, які розподілені за розмірами і призначенням.

Найбільш захищена система має назву «Міклат» – бомбосховище. «Мамад» – це індивідуальне залізобетонне приміщення, параметри якого повинні відповідати вимогам державних будівельних норм. «Мамак» – це спільне укриття у багатоквартирному житловому будинку, наприклад спеціально влаштована сходові клітка. «Маман» – це захисне укриття в цивільних будівлях (наприклад школах чи офісах). Технічні вимоги до захищених приміщень регулярно оновлюються під контролем держави. «Мамад» повинен витримати вибух, уламки від дії звичайної зброї, а також забезпечити захист від хімічних та біологічних видів ураження.

В результаті масованих атак по українських містах стала гострою необхідність в облаштуванні

різного роду укриттів та захисних споруд. Згідно з наказом № 440 від 19.07.2022 року «Про затвердження змін до деяких нормативно-правових актів Міністерства внутрішніх справ України у сфері утримання та експлуатації захисних будівель та споруд цивільного захисту» та додатків до нього, а також рекомендацій щодо організації укриття, обов'язково у будинках висотного типу передбачено наявність захисних споруд або споруд подвійного призначення, таких як підвали, паркінги тощо. Такі споруди повинні забезпечуватись усіма необхідними засобами для тимчасового захисту населення.

Під час вторгнення росії понад 45% укриттів за технічним станом були непридатні для використання. Відсутність вентиляції та підвищена вологість не могли забезпечити довготривалий захист. У захисних спорудах могли укритися лише 10% населення.

В умовах воєнного стану під час збройної агресії ворога важливою задачею є підвищення надійності оборонних споруд та фортифікації у місцях проведення бойових дій. Відповідно до цього Кабінетом Міністрів ухвалено рішення щодо невідкладного будівництва військових інженерно-технічних фортифікаційних споруд для потреб оборони. Так Генеральним штабом ЗСУ та відповідними ОВА було поставлено завдання забезпечити будівництво військових інженерно-технічних фортифікаційних споруд для потреб оборони в окремих областях. Це рішення має забезпечити оперативне зведення фортифікаційних споруд для оборонних потреб там, де це необхідно.

Аналізуючи закордонний досвід виготовлення фортифікаційних споруд та захисних укриттів, фахівці країн НАТО пропонують широко застосовувати сучасні високоміцні матеріали на основі полімерів та елементів хвилястої сталі. При розробці таких споруд основним завданням є забезпечення максимального захисту особового складу від різних засобів ураження, а в їх конструкції враховувати несучу здатність матеріалу.

Будівництво захисних об'єктів зазвичай планується здійснювати в кілька етапів за принципом нарощування ступеня захисту військ від засобів ураження противника. При обмеженому часі в першу чергу зводяться тільки основні засоби укриття, які згодом дообладнуються більш потужними фортифікаційними спорудами [6].

Застосування ефективних захисних укриттів та бліндажів на блокпостах та укріпленнях вимагає створення надійних високоміцних та витривалих матеріалів, основою яких залишається бетон.

Згідно з вимогами проєкту НДІ Міноборони вогневі споруди ВС-1, ВС-3 виготовляють з важкого бетону класу міцності С32/40, рухливістю суміші не менше Р4 та їх наступного армування сталевими сітками на основі арматурного прокату А 500С і

А 240С згідно з ДСТУ 3760:2006. Стандарт на вогневі споруди також передбачає вимоги до способу виготовлення такого роду укріплень, кількості арматури та її розташування в конструкції.

Для виготовлення залізобетонних захисних матеріалів більш ефективним є створення гібридних високоміцних бетонів з використанням фібри різної природи з наступним формуванням залізобетонної плити відповідних розмірів [7]. При цьому стандарт передбачає виготовлення збірних залізобетонних елементів фортифікаційних споруд стінових панелей типу СП-1, СП-2 та плит перекриття ПП-1 товщиною не менше 300 мм з використанням пластифікаторів та активних хімічних додатків.

Важливою складовою виготовлення вогневих і фортифікаційних споруд є допустима гранична маса виготовлених плит, що збільшує вагу конструкції та знижує можливості транспортування таких бетонних плит на вогневі позиції, а також ускладнює проведення монтажних робіт. З цієї точки зору, за рахунок використання високоміцних гібридних бетонних структур, що містять арматуру (масштабний фактор) та фібру (мікрофактор), з'являються нові можливості для покращення характеристик бетонної конструкції, або зменшення її ефективної товщини задля забезпечення необхідних показників за стандартом [5, 7, 14].

Узагальнення результатів досліджень у сфері технології високоміцних бетонів свідчать, що забезпечення підвищених показників міцності, довговічності та ударної в'язкості вимагає комплексного підходу з метою створення упорядкованої структури бетону шляхом модифікування його органічними та мінеральними компонентами та тривимірного зміцнення цементної матриці дисперсним армуванням фібровими матеріалами [2, 7, 9, 14].

Дослідженням фібробетону та його впровадженням у будівельну галузь займалися багато вчених: Бабич Є.М., Білозір В.В., Дорошенко Ю.М., Дробішинець С.Я., Гетун Г.В., Дворкін Л.Й., Никифорова Т.Д., Лисенко Є.Ф. та ін.

Слід зазначити, що в процесі формування суміші за рахунок модифікування бетону органічними дошками та оптимізацією його гранулометричного складу і низькомодульними дисперсними волокнами на основі фібри відбувається більш плавна зміна енергетичного стану системи на початкових та завершальних стадіях гідратації цементної матриці з наступним мінімальним впливом на процеси тріщиноутворення.

Завдяки використанню фракціонованого заповнювача та ультрадисперсних мінеральних добавок підвищується однорідність суміші, зростає кількість контактних зон між мінеральними добавками та портландцементом, що суттєво визначає фізико-механічні показники міцності гібридного фібробетону [10, 14].

Використання різних математичних моделей на основі теорії тонких оболонок [4, 14] буде визначати раціональну просторову структуру оболонкових конструкцій для їх застосування в якості фортифікаційних споруд з урахуванням появи тріщин для різного типу фібр. Такі моделі навантажень у просторовій системі можуть бути використані для розроблення нових технологій сучасної фортифікації та забезпечення надійного захисту військових об'єктів.

## Формулювання мети статті

Метою статті є аналіз сучасного стану захисних укриттів і фортифікаційних споруд та розроблення і дослідження високоміцних гібридних фібробетонів для захисту особового складу та техніки від ураження, які відповідають сучасним вимогам за міцністю і стійкістю до ударних навантажень.

## Виклад основного матеріалу

Для розроблення і дослідження високоміцних гібридних фібробетонів із заданими реологічними та фізико-механічними властивостями важливим є регулювання дисперсності бетонної суміші шляхом введення пластифікаторів та активних мінеральних додатків, раціонального підбору складу бетону і введенням фібри.

З метою одержання високоміцного гібридного фібробетону використано портландцемент загального будівельного призначення СЕМ І 42,5 R ПрАТ "Івано-Франківськцемент" згідно з ДСТУ Б EN 197-1:2015. В якості заповнювачів застосовано кварцовий пісок Жовківського родовища з модулем крупності  $M_{кр}=2,1$ ; як крупний заповнювач використано гранітний щебінь із стандартною фракцією 5–20 мм. Для збільшення рухливості використано суперпластифікатор на основі полікарбоксилату та активну мінеральну добавку – мікрокремнезем (МК). Для підвищення механічних характеристик фібробетонів та збільшення опору до статичних і динамічних навантажень під час формування плит застосовано гофровану сталеву сітку діаметром 2,5 мм з розмірами вічка 35x35 мм, а також ультрадисперсну поліпропіленову фібру ТМ "Альпі" та базальтову фібру ТМ "Технобазальт" з розмірами 12x0,020 мм та 12x0,018 мм відповідно. Фізико-механічні характеристики використаних фібр [15, 16] наведено в табл. 1.

Таблиця 1

### Характеристика фібр

Тип армувального матеріалу	Характеристика			
	Густина, г/см <sup>3</sup>	Модуль пружності, ГПа	Міцність на розрив, ГПа	Відносне видовження при розтягу, %
Базальт	2,9	79-110	1,1-1,4	1,5-3,0
Поліпропілен	0,91	3,5-4	0,3-0,4	19-20

Ступінь армування високоміцного фібробетону фіброю для запроєктованих складів становив 0,8% від маси цементу. В якості контрольного зразка використано бетон класу міцності С 32/40 номінального складу 1:1,35:2,71 з витратою цементу СЕМ І 42,5 R – 385 кг на 1 м<sup>3</sup> бетонної суміші.

З метою порівняльних досліджень авторами сформовано серію зразків досліджуваних бетонів з рухливістю бетонної суміші Р4 відповідно до вимог ДСТУ БВ 2.7-214:2009. При цьому використано склади бетонів без фібри (БД), з базальтовою (БФ) та поліпропіленою (ППФ) фібрами. Через 2, 7 та 28 діб тверднення зразки високоміцного бетону піддавали випробуванням на згин та стиск. Міцність на згин визначали на стандартних балочках 4x4x16, а міцність на стиск досліджували на стандартних кубах фібробетону. Результати досліджень міцності фібробетону на згин та стиск наведено на рис. 2, 3.

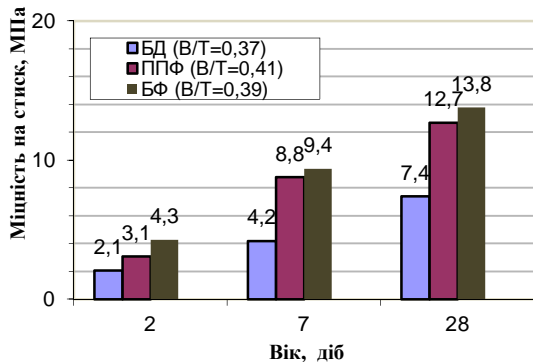


Рис. 2. Міцність на згин зразків фібробетону

Аналізуючи результати випробувань, слід зауважити, що міцність на згин досліджуваних зразків бетонів з фібровими волокнами суттєво зростає у всі терміни тверднення. Як видно з рис. 2, у порівнянні з бетоном без фібри міцність на згин зразків фібробетону на другу добу збільшується на 1,0 та 2,2 МПа, відповідно. На 7 та 28 добу міцність на згин фібробетонів з поліпропіленом та базальтом зростає, відповідно на 4,6 та 5,2 МПа, а на 28 добу на 5,3 та 6,4 МПа, відповідно.

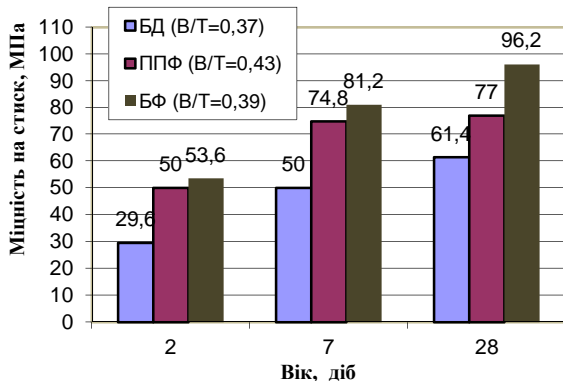


Рис. 3. Міцність на стиск зразків фібробетону

Це свідчить про значне підвищення ефективності використання фібри до дії згинальних навантажень. Слід зауважити, що водопотреба бетонних сумішей з фіброю зростає з 0,37 до 0,39 та 0,41% у порівнянні з бетоном без фібри.

Автори зазначають, що міцність досліджуваних зразків бетону на 28 добу з фіброю на стиск зростає з меншою інтенсивністю у всі терміни тверднення. Як видно з рис. 3, у порівнянні з бетоном без фібри 61,4 МПа найбільша міцність на стиск зразків фібробетону у віці 28 діб становить 77,0 та 96,2 МПа.

Згідно з наведеними результатами міцності отримані фібробетони можна віднести до класу міцності С50/60 і вище. Як видно з табл. 1, основним показником підвищеної міцності на стиск та згин базальтової фібри у порівнянні з поліпропіленою фіброю є вища міцність відповідних волокон на розрив. Це суттєво визначатиме кінцеві показники міцності фібробетону.

Більш ефективним матеріалом в якості мікрофібри є базальтові волокна, які в порівнянні з поліпропіленовими мають більший модуль пружності, незважаючи на меншу величину видовження. Такі базальтові фіброві волокна будуть мати більшу здатність до зворотної пружної деформації, що є позитивним при дії високошвидкісного удару.

Базальтові волокна за параметром ціна/якість виявляються кращими, ніж поліпропіленові. Вони мають вищу кислотостійкість, більший опір до стирання, більшу величину модуля пружності та діапазон робочих температур, суттєво меншу густину у порівнянні з металевією арматурою.

Часто при влаштуванні та укріпленні польових позицій, захисних тимчасових споруд у першу чергу використовуються матеріали, що знаходяться безпосередньо біля місця проведення робіт, і ті, що не вимагають значних затрат часу, сил і засобів на їх підготовку. На відміну від відкритих вогневих позицій, що в основному захищають від ураження стрілецькою зброєю, закриті вогневі позиції захищають також і від нависного ураження. Такі споруди вимагають значних механічних навантажень на опори та повинні мати достатньо міцні стіни і фундамент.

Для влаштування таких споруд застосовується поєднання різних додаткових захисних броньових матеріалів, залізобетону та підземних конструкцій. Для розрахунку захисної дії перешкоди необхідно мати дані про характер дії звичайних засобів ураження, снарядів, мін та стрілецької зброї. Якщо снаряд чи міна потрапляє в перешкоду великої товщини і проникає в неї на деяку глибину, вона витрачає свою кінетичну енергію на подолання опору матеріалу і зупиняється в ній. Глибина проникнення



кулі в уражену частину перешкоди [14], визначається за емпіричною формулою

$$h_{np} = \lambda \cdot K_{np} \cdot \frac{P}{d^2} \cdot V \cdot \cos(\alpha),$$

де  $h_{np}$  – глибина проникнення снаряда, що вимірюється перпендикулярно до поверхні перешкоди та кінця головної частини снаряда, м;

$\lambda$  – коефіцієнт, що залежить від форми головної частини снаряда;  $\lambda=1,3$  при розрахунку дії снаряда на залізобетон (у решті випадків  $\lambda=1$ );

$K_{np}$  – коефіцієнт податливості матеріалу, іноді скорочено називається коефіцієнтом проникнення;

$P$  – вага снаряда в кг;

$d$  – діаметр снаряда (калібр) в м;

$V$  – швидкість снаряда в момент удару (кінцева швидкість) м/с;

$\cos(\alpha)$  – кут зустрічі з перешкодою, тобто кут між віссю снаряда в точці удару (точці зустрічі) та перпендикуляром до поверхні перешкоди.

З метою визначення мінімальної товщини фібробетонної плити в якості захисної конструкції до проникаючої дії кулі звичайної стрілецької зброї калібру 7,62 мм авторами проведено математичний розрахунок необхідної товщини. Спираючись на рекомендації [14] та загально відомі характеристики кулі калібру 7,62 мм (вага кулі  $P$  –  $16,3 \cdot 10^{-3}$  кг, її діаметр  $D$  –  $7,62 \cdot 10^{-3}$  м та початкова швидкість  $V$  – 815 м/с), випущеної з АКМ-74, та маючи коефіцієнт податливості фібробетону  $K_{np}$ , -  $1,2 \cdot 10^{-6}$  [14], можна розрахувати необхідну товщину фібробетону.

Втратою швидкості при подоланні відстані перед перешкодою знехтуємо та вважаємо, що швидкість руху кулі перед перешкодою буде рівна початковій та становить 815 м/с. Тоді

$$h_{np} = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{16,3 \cdot 10^{-3}}{(7,62 \cdot 10^{-3})^2} \cdot 815 \cdot 1,$$

$$h_{np} = 274,54 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 27,5 \text{ см.}$$

За розрахунковими даними, товщина бетонної перешкоди для захисту від куль калібру 7,62 мм повинна бути не меншою 27,5 см. Тобто, при обстрілі з цього виду озброєння такі бетонні захисні споруди повинні забезпечувати необхідний захист від ураження. Розрахункові дані добре корелюються з вимогами до вогневих споруд ВС-1 та ВС-3, де мінімальна товщина захисних плит укриття повинна бути не меншою 30 см.

Будівництво багатьох фортифікаційних споруд та укриттів неможливе без урахування їх реакції на динамічні навантаження, в тому числі на дію високошвидкісного удару. Для реалізації практичних досліджень ударної міцності при високих швидкостях проведено випробування експериментального зразка високоміцного гібридного фібробетону в польових

умовах. Для виготовлення типового зразка гібридної фібробетонної захисної споруди використано базальтову фібру та гофровану сталеву сітку. Для дослідження масштабного фактора стійкості гібридних фібробетонів використовували технологічні рекомендації з формування бетонних захисних споруд типу вогневих споруд ВС-1, ВС-3.

На початковому етапі було сформовано фібробетонну плиту розмірами 400x400x100 мм з сталеву сіткою, яка представлена на рис. 4.



Рис. 4. Зразок фібробетонної плити

Після витримування 28 діб у нормальних умовах фібробетонну плиту піддавали дії високошвидкісного удару пострілом кулі калібру 7,62 мм з АКМ-74 на відстані 25 м. На рис. 5 представлено результати обстрілу фібробетонної плити.



Рис. 5. Загальний вигляд плити з ураженою ділянкою під час дії високошвидкісного удару

Як видно з рис. 5, зразок гібридного фібробетону з використанням базальтової фібри під час обстрілу одиничним пострілом зберіг свою форму та не зруйнувався.

Випробуваннями встановлено, що після дії швидкісного удару на поверхні плити утворилася лунка з глибиною проникнення 23 мм та найбільшим діаметром у протилежних напрямках 76 мм. Слід зауважити, що цю ділянку ураження можна умовно поділити на дві частини. Першій верхній

частині ділянки притаманна грубозерниста структура, яка характеризується відколюванням окремих грубих частинок бетону та руйнуванням поверхні конструкції (рис. 6). При цьому спостерігається розрив металевої арматури в цих ділянках. У другій частині в центрі ураження спостерігаємо біліший відтінок, який свідчить про дрібнодисперсне руйнування частинок бетону на поверхні та стійкість бетонної плити в цілому без виявлення магістральних тріщин.



Рис. 6. Уражена ділянка фібробетону під час дії високошвидкісного удару

Після повторних обстрілів зразка на основі армованого фібробетону встановлено, що перша магістральна тріщина на плиті утворюється лише після 3-го пострілу. Це свідчить про вищий ступінь захисту таких конструкцій. Результати досліджень вказують на те, що уламки ушкодженого бетону більшою мірою утримуються між собою і не розлітаються.

Для сталеної сітки характерні висока міцність і високий модуль пружності при розтягуванні. Очевидно, що впровадження металевої сітки в матрицю для таких високоміцних фібробетонів повинно забезпечити отримання гібридних захисних матеріалів з підвищеною міцністю за рахунок використання базальтової фібри з урахуванням масштабного характеру порівняно з міцністю традиційних армованих залізобетонних споруд.

### Висновки

Проаналізовано сучасний стан захисних укриттів та фортифікаційних споруд, окреслено сучасні можливості використання конструкцій оболонкового типу та базальтових фібр для покращення стійкості бетонних укріплень як під час спорудження будинків для захисту цивільного населення, так і для створення бліндажів, укріплень та вогневих споруд для захисту особового складу.

Дослідження фізико-механічних властивостей фібробетонів, модифікованих пластифікаторами та активними мінеральними добавками з використанням

базальтових та поліпропіленових волокон показали, що їх введення позитивно впливає на міцнісні характеристики бетонів. Міцність на стиск фібробетону на 28 добу зростає, відповідно, з 61,4 до 77,0 та 96,2 МПа, а міцність на згин – з 7,4 до 12,7 та 13,8 МПа, відповідно.

Використання арматурної сітки в комплексі з базальтовою фіброю забезпечує підвищену стійкість фібробетону до дії високошвидкісного удару за рахунок підвищення щільності цементувальної матриці в результаті зниження водопотреби, а також внаслідок просторового тривимірного армування дисперсною базальтовою фіброю. В результаті взаємного поєднання міцнісних характеристик бетонної матриці на мікро- та макрорівнях у гібридних фібробетонах створюється можливість зниження товщини залізобетонних елементів та зменшення ваги захисної споруди при дотриманні вимог стандартів до таких укріплень. Збільшення міцності цементного каменю відбувається за рахунок зменшення концентрації напруг у місцях локальних напружень та перерозподілу енергії по всьому об'єму матеріалу.

Проведені дослідження сучасних гібридних високоміцних бетонів з базальтовою фіброю створюють нові можливості для створення захисних бетонних укріплень та фортифікаційних споруд.

### Список літератури

1. Білик А.С., Пікуль А.В., Нужний В.В., Шайдюк М.В. Кафедра металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА для захисту Батьківщини. *Матеріали МНТК «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції»*, 2-3 червня 2016. С. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4989952>
2. Скорук О. Міцність та тріщиностійкість сталевих фібробетонних плит, опертих по контуру при повторних навантаженнях. *Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія*. 2016. № 3. С. 83–93. URL: [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/pidt\\_2016\\_3\\_12.pdf](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/pidt_2016_3_12.pdf)
3. Афанасьєва Л.В. Залізобетонні конструкції в умовах високошвидкісного удару. *Містобудування та територіальне планування*. Наук.-техн. зб. К : КНУБА, 2016. № 61. С. 108–113. URL: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/2016/201661.pdf>
4. Убайдуллаєв Ю.Н. Модель вибору раціональної орієнтації арматури в залізобетонних оболонкових конструкціях фортифікаційних споруд. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України*. 2013. № 2(48). С.96–99. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/Znpcvsd\\_2013\\_2\\_19.pdf](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Znpcvsd_2013_2_19.pdf)
5. Babich Y., Filipchuk S., Karavan V. General requirements for materials of fortification protective

structures. *AIP Conference Proceedings* 2077. 2019. C. 020004-1–020004-6. DOI: doi.org/10.1063/1.5091865

6. Кисіль О.В., Михальченко С.В.. Сучасний блокпост на основі інтелектуальної вогневої системи. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*: Наук.-техн. збірник. К: КНУБА, 2016. № 42. С. 300–304. URL: <http://repository.knuba.edu.ua:8080/xmlui/handle/987654321/4330>

7. Danica S., Marjanović M., Vitorović–Todorović M. Nanotechnology for military applications: A survey of recent research in Military technical institute. *Scientific Technical Review*. 2018. № 68 (1). pp. 59–72. DOI: <https://doi.org/10.5937/STR1801059>

8. Marushchak U., Sanytsky M., Korolko S., Shabatura Yu., Sydor N. Development of nanomodified rapid hardening fiber-reinforced concretes for special-purpose facilities. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2, № 6 (92): pp. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061>

9. Fediuk R., Amran M., Klyuev S., Klyuev A. Increasing the Performance of a Fiber-Reinforced Concrete for Protective Facilities. *Synthesis and Characterization of Nanomaterials*. 2021. № 9 (11). p. 64. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib9110064>

10. Yusof M., Nor N., Ismail A., Peng N., Sohaimi R., Yahya M. Performance of Hybrid Steel Fibers Reinforced Concrete Subjected to Air Blast Loading. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013. 7 с. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/420136>

11. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Stepasyuk Y., Ribakov Y. A method for design of high strength concrete composition considering curing temperature and duration. *Construction and Building Materials*. 2018. № 186. pp. 731–739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.014>

12. Королюк С.В., Мартинюк І.М., Стаднічук О.М., Горчинський І.В. Перспективи використання базальтових фібробетонів для фортифікаційних споруд. *Військово-технічний збірник*. Львів. НАСВ, 2018. № 19. С. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.19.2018.66-72>

13. Адаменко М.І., Гелета О.В., Квітковський Ю.В. та інші. Фортифікаційні споруди : підр. Харків: ЗАТ «Харківська друкарня № 16», 2003. 560 с. URL: [http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbu/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/Znpcvsd\\_2013\\_2\\_19.pdf](http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Znpcvsd_2013_2_19.pdf)

14. Бабич. Є.М., Дворкін Л.Й., Житковський В.В. та ін. Рекомендації з проектування залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд. Рівне: НУВГП, 2018. 173 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/14457>

15. Волокно армуюче поліпропіленове. Компанія «Альпі». URL: <http://www.alpi.com.ua/ua/index/products/chemistry/mesh> (Дата звернення 10.03.2023)

16. Фібра базальтова. ТОВ «Технобазальт-Інвест». URL: <https://technobasalt.com/reinforcing-materials-from-basalt-ua/basalt-fiber-ua/> (Дата звернення 10.03.2023)

## References

1. Bilyk A.S., Picul A.V., Nuzhnyi V.V. and Shaidiuk M.V. (2016), «Kafedra metalevykh i derevianykh konstruktсии KNUBA dlia zakhystu batkivshchyny " [Department of Metal and Wooden Structures to protect the homeland]. Materials MNTK «Special purpose buildings and structures: modern materials and structures», June 2-3. pp. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4989952> [in Ukrainian]

2. Scoruk O. "Mitsnist ta trishchynostiikist stalefibrobetonnykh plyt, opertykh po konturu pry povtornykh navantazhenniakh" [Strength and crack resistance of steel-reinforced concrete slabs supported along the contour under repeated loads]. *Underwater technologies. Industrial and civil engineering*. № 3. pp. 83–93. URL: [http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbu/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/pidteh\\_2016\\_3\\_12.pdf](http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/pidteh_2016_3_12.pdf) [in Ukrainian]

3. Afanaseva L.V. (2016), "Zalizobetonni konstruktсии v umovakh vysokohvydkisnoho udaru" [Reinforced concrete structures in conditions of high-speed impact]. *Urban planning and territorial planning: Scientific and technical collection*. K: KNUBA, Vol. 61. pp. 108–113. URL : <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/2016/201661.pdf> [in Ukrainian]

4. Ubajdjulev Ju.N. (2013), "Model vyboru ratsionalnoi orientatsii armatury v zalizobetonnykh obolonkovykh konstruktсииakh fortyfikatsiinykh sporud" [A model for choosing the rational orientation of reinforcement in reinforced concrete shell structures of fortifications]. *Collection of scientific papers of the Center for Military and Strategic Research of the National University of Defense of Ukraine*. № 2 (48). pp. 96–99. URL : [http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbu/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/Znpcvsd\\_2013\\_2\\_19.pdf](http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Znpcvsd_2013_2_19.pdf) [in Ukrainian]

5. Babich Y., Filipchuk S. and Karavan V. (2019), General requirements for materials of fortification protective structures. *AIP Conference Proceedings* 2077. pp. 020004-1–020004-6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5091865>

6. Kisel O. and Mihalchenko S. (2016), "Suchasnyi blokpost na osnovi intelektualnoi vohnevoi systemy" [Modern block-post based on an intelligent fire system]. *Modern problems of architecture and urban planning*. № 42, P. 300-304. URL: <http://repository.knuba.edu.ua:8080/xmlui/handle/987654321/4330> [in Ukrainian]

7. Danica S., Marjanović M., and Vitorović–Todorović M. (2018), Nanotechnology for military applications: A survey of recent research in Military technical institute. *Scientific Technical Review*, № 68 (1), pp. 59–72. DOI: <https://doi.org/10.5937/STR1801059>

8. Marushchak U., Sanytsky M., Korolko S., Shabatura Yu. and Sydor N. (2018), Development of nanomodified rapid hardening fiber-reinforced concretes for special-purpose facilities. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, Vol. 2, № 6 (92). pp. 34-41. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061>

9. Fediuk R., Amran M., Klyuev S. and Klyuev A. (2021), Increasing the Performance of a Fiber-Reinforced Concrete for Protective Facilities. *Synthesis and Characterization of Nanomaterials*. № 9 (11), pp. 64. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib9110064>



10. Yusof M., Nor N., Ismail A., Peng N., Sohaimi R. and Yahya M. (2013), Performance of Hybrid Steel Fibers Reinforced Concrete Subjected to Air Blast Loading. *Advances in Materials Science and Engineering*, 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/420136>
11. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Stepasyuk Y. and Ribakov Y. (2018), A method for design of high strength concrete composition considering curing temperature and duration. *Construction and Building Materials*, № 186, pp. 731–739. DOI: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.014](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.014)
12. Korolko S.V., Martynjuk I.M., Stadnichuk O.M. and Horczynskij I.V. (2018), "Perspektyvy vykorystannia bazaltovykh fibrobetoniv dlia fortyfikatsiinykh sporud" [Prospects for the use of basalt fiber concrete for fortifications]. *Military-technical collection*. № 19/2018. Lviv: NAA. pp. 66-72. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.19.2018> [in Ukrainian]
13. Adamenko M.I., Heleta O.V., Kvitkovskij Ju.V. and others (2003), "Fortyfikatsiini sporudy" [Fortification buildings]. Charkiv: ZAT "Kharkiv Printing House № 16". 560 p. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/Znpcvsd\\_2013\\_2\\_19.pdf](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Znpcvsd_2013_2_19.pdf) [in Ukrainian]
14. Babych. E.M., Dvorkin L.Y., Zhytkovsky V.V. and etc. (2018), "Rekomendatsii z proektuvannia zalizobetonnykh konstruksii fortyfikatsiinykh sporud" [Recommendations for the design of reinforced concrete structures of fortification structures]. Rivne: NUVHP, 173 p. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/14457> [in Ukrainian]
15. "Volokno armuyuche polipropilenove" [Reinforcing polypropylene fiber]. Alpi Company. URL: <http://www.alpi.com.ua/ua/index/products/chemistry/mesh> (Accessed 10 March 2023) [in Ukrainian]
16. "Fibra basaltova" [Basalt fiber]. Techno-basalt Invest Ltd. URL: <https://technobasalt.com/reinforcing-materials-from-basalt-ua/basalt-fiber-ua/> (Accessed 10 March 2023) [in Ukrainian]

## PROSPECTS OF THE USE OF HIGH-TENSION FIBER CONCRETE AS THE BASIS FOR THE FORMATION OF PROTECTIVE SHELTERS AND FORTIFICATION STRUCTURES DURING THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR

S. Korolko, M. Sanytskyi, T. Kropyvnytska, A. Dzyuba, Yu. Shabatura

*This article analyzes the current state of protective shelters and fortification structures, foresees the modern possibilities of using fastening and basalt-type structures to increase the stability of concrete fortifications both during the construction of buildings for the protection of the civilian population, and for the creation of dugouts, fortifications and fire structures for the protection of personnel in accordance.*

*Studies of the physical and mechanical properties of fiber concrete modified with plasticizers and active mineral additives using basalt and polypropylene fibers have shown that their introduction has a positive effect on the strength characteristics of concrete. The compressive strength of fiber concrete at day 28 increases from 61.4 to 77.0 and 96.2 MPa, respectively, and the flexural strength from 7.4 to 12.7 and 13.8 MPa, respectively.*

*For the production of reinforced concrete protective materials, it is more effective to create hybrid high-strength concrete using fibers of different nature, followed by the formation of a reinforced concrete slab of the appropriate size. At the same time, the standard provides for the manufacture of prefabricated reinforced concrete elements of fortification structures and platoon support points of wall panels of the SP-1, SP-2 type and floor slabs PP-1 with a thickness of at least 300 mm from heavy concrete of strength class C32/40 with the use of plasticizers and active chemical additives.*

*However, when using the obtained hybrid fiber concrete with strength class C50/60 and using a reinforcing mesh according to the calculated data, it is possible to reduce the effective thickness of the fiber concrete slab to 27.5 cm installation of fortification.*

*The use of a reinforcing mesh in a complex with basalt fiber provides increased resistance of fiber concrete to the action of a high-speed impact due to an increase in the density of the cementing matrix as a result of a decrease in water consumption, as well as due to spatial three-dimensional reinforcement with dispersed basalt fiber. As a result of the mutual combination of the strength characteristics of the concrete matrix at the micro- and macro-levels in hybrid fiber concrete, it is possible to reduce the thickness of reinforced concrete elements and reduce the weight of the protective structure while meeting the requirements of the standards for such fortifications. An increase in the strength of cement stone occurs due to a decrease in the concentration of stresses in places of local stresses and a redistribution of energy throughout the volume of the material.*

*The conducted studies of modern hybrid high-strength concrete with basalt fiber create new opportunities for the creation of protective concrete fortifications and fortification structures.*

**Keywords:** fiber concrete, hybrid concrete, basalt and polypropylene fibers, fortification structures, steel reinforcement, physical and mechanical properties.