

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН АРМОВАНОГО БЕТОНУ
ПРИ ДІЇ НА НЬОГО ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН В ОГОРОДЖУЮЧИХ
КОНСТРУКЦІЯХ ЗАХИСНИХ СПОРУД ЦИВІЛЬНИХ БУДИНКІВ**

**STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE WHEN
EXPLOSIVES ACT ON IT IN ENCLOSING STRUCTURES OF
PROTECTIVE STRUCTURES OF CIVIL BUILDINGS**

**Грецький Д.В. к.т.н., доц., Березань М.О. к.т.н., доц., Чумак Р.В., студент,
(Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси)**

**Gretskyi Denys, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
<https://orcid.org/0000-0002-3086-0939>, Berezan M.O., Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor, Chumak R.V., student, [https://orcid.org/0009-
0007-3750-5888](https://orcid.org/0009-0007-3750-5888) (Cherkasy State Technological University),**

**Наведені результати виконаних теоретичних та експериментальних
досліджень властивостей армованого бетону та його вдосконалення,
особливо в умовах динамічних та екстремальних навантажень. Основну
увагу приділено аналізу впливу динамічних вибухових хвиль на
механічні властивості бетону та оптимізації його складу за допомогою
фібри.**

**The results of theoretical and experimental studies of the properties of
reinforced concrete and its improvement, especially under dynamic and
extreme loads, are presented. The main attention is paid to the analysis of the
influence of dynamic explosive waves on the mechanical properties of concrete
and the optimization of its composition using fiber.**

**Research confirm that the use of polymer fiber in concrete mixtures
significantly improves the mechanical characteristics of the material,
providing increased crack resistance, impact strength and durability. Fiber
concrete demonstrates the ability to effectively counteract dynamic loads,
which makes it promising for use in protective structures, especially in high-
risk areas. Fiber concrete is significantly superior to traditional concrete due
to its ability to slow the spread of cracks, which reduces the risk of brittle
fracture. In explosive conditions, this is critically important, since ordinary
concrete has a tendency to sharp destruction with the formation of fragments
that can pose an additional threat. The inclusion of polymer, steel or glass
fibers in the concrete mixture allows to achieve a uniform distribution of
stresses and improve the overall mechanical properties of the material.
Experimental studies have confirmed that fiber concrete beams show an**

increase in limiting moments by 20-40% compared to traditional concrete elements.

Reinforced concrete structures with the addition of fiber helps to reduce the risk of sudden destruction and the formation of dangerous debris, which increases safety when used in civil protection structures.

Further development of such materials opens up wide opportunities for their adaptation to modern construction challenges, in particular under martial law, ensuring their reliability, durability and economic efficiency of the structure.

Ключові слова: Фібробетон, фібра, напружено-деформований, захист, вибух, руйнування, армування

Fiber concrete, fiber, stress-strain, protection, explosion, destruction, reinforcement

Вступ. Створення надійних укриттів є невід’ємною частиною системи цивільного захисту. Такі споруди призначені для захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій, зокрема, від впливу зброї масового ураження. Проектування укриттів – це складний інженерний процес, який вимагає глибокого розуміння механіки руйнування матеріалів під дією екстремальних навантажень. Одним з ключових аспектів проектування укриттів є розрахунок їх конструкцій на динамічні навантаження, які виникають під час вибухів. Ці навантаження можуть у десятки і сотні разів перевищувати звичайні норми для цивільного та промислового будівництва. Для забезпечення безпеки людей, конструкції укриттів повинні бути спроектовані таким чином, щоб витримувати такі екстремальні умови.

Головним завданням розрахунку конструкцій укриттів на навантаження від ударної хвилі є визначення розмірів (перерізів), що гарантують безпеку перебування людей в укритті під час впливу сучасних засобів масового ураження. Особливістю розрахунку є специфічна і рідкісна при звичайному проектуванні промислових та цивільних споруд ситуація – конструкції укриттів розраховуються на навантаження від ударної хвилі, яка впливатиме один-два рази за весь строк експлуатації споруди. Це дозволяє підійти до вибору методів розрахунку конструкцій з менш жорсткими вимогами, основна з яких полягає в тому, що конструкція має витримати навантаження, не руйнуючись.

Таким чином, питання напружено-деформованого стану армованого бетону при дії на нього вибухових речовин в огорожуючих конструкціях захисних споруд цивільних будинків на сьогодні є актуальним та своєчасним.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні реалії будівництва захисних споруд вимагають дослідження сукупності внутрішніх напружень та деформацій конструкції, використання матеріалів із підвищеною стійкістю до динамічних навантажень, зокрема, вибухових хвиль та ударних впливів.

Армований бетон є ключовим матеріалом для створення захисних споруд завдяки його високим міцнісним характеристикам і здатності ефективно протистояти впливу як статичних, так і динамічних навантажень. У контексті вибухових впливів, які супроводжуються екстремально високими швидкостями навантаження, аналіз напружено-деформованого стану армованого бетону дозволяє забезпечити безпеку споруд і підвищити їх стійкість до руйнувань. Одним із найбільш перспективних матеріалів для цих цілей є фібробетон, який поєднує: високу міцність бетону; підвищеною пластичністю та тріщиностійкістю. Включення полімерних, сталевих чи скловолокон у бетонну суміш дозволяє досягти рівномірного розподілу напружень та покращити загальні механічні властивості матеріалу[2].

У роботі [1] зазначено, що протягом двох, семи та двадцяти восьми діб твердіння в повітряно-сухих умовах міцність на згин зразків, армованих базальтовою фіброю, зроста відповідно на 55,9%, 36,2% і 9,6%, порівняно з контрольними неармованими зразками. Проте, у порівнянні з нормальними умовами твердіння, міцність на згин в повітряно-сухих умовах зменшилась на 12,3%, 26,2% та 1,4% через вказані проміжки часу.[1]

Постановка мети і задач досліджень. Мета роботи полягає у всебічному аналізі напружено-деформованого стану армованого бетону, під впливом вибухових навантажень. Отримані результати дозволять розширити теоретичні уявлення про механізми руйнування армованого бетону під дією вибухових речовин.

Методика досліджень. Дослідження ґрунтується на основі аналізу теоретичних та експериментальних даних отриманих під час виконання роботи.

У дослідженні використовувалися лабораторні аналітично-експериментальні випробування балок із різними типами армування, зокрема бетонних, залізобетонних, армованих сіткою та фібробетонних конструкцій. Тестування включало навантаження на стиснення та вигин, що дозволило оцінити тріщиностійкість, пластичність і граничну міцність матеріалів. Аналіз проводився за допомогою аналітичного моделювання, числових розрахунків та експериментальних вимірювань напружено-деформованого стану.

Результати досліджень. Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану армованого бетону показали, що ефективне вирішення задач цього типу потребує застосування комбінованого підходу, який включає аналітичні та експериментальні методи.

Аналіз конструкцій показав, що залізобетонні споруди мають значно вищу стійкість до впливу ударних і вибухових навантажень, ніж неармовані бетонні конструкції. Ударна дія, вибухова хвиля, а також сколювання матеріалів є основними факторами руйнування конструкцій. Виявлено, що характер тріщин і воронки залежить від геометрії споруди та місця удару, що підкреслює важливість врахування цих факторів під час проектування.

Зокрема, залізобетон із багаторівневим армуванням демонструє високу здатність до збереження міцності навіть після значних пошкоджень. Тоді як конструкції з неармованого бетону зазнають повного руйнування.

Дослідження показали перспективність використання фібробетону як матеріалу для конструкцій, що піддаються динамічним навантаженням. Балки з дисперсним армуванням демонструють значне зростання граничних моментів порівняно з традиційними бетонними елементами. Зокрема, теоретичні розрахунки вказують на зростання міцності фібробетонних балок на 20–40%, що робить їх доцільними для використання у конструкціях, які потребують підвищеної надійності.

Механізми руйнування бетону і фібробетону значно різняться. У звичайному бетоні при перевищенні межі міцності відбувається крихке руйнування, при якому основні тріщини швидко поширюються та охоплюють увесь переріз матеріалу. Натомість фібробетон завдяки волокнам забезпечує уповільнене поширення тріщин, що дозволяє конструкціям витримувати додаткові навантаження навіть у критичних умовах. Це особливо важливо для захисних споруд, які повинні зберігати функціональність за умов постійного впливу вибухів або ударів.

Ключовими характеристиками, що роблять фібробетон ефективним для застосування в огорожувальних конструкціях захисних споруд, є: збільшена тріщиностійкість; вища пластичність та енергопоглинання; підвищена стійкість до ударних навантажень; зменшення уламкоутворення.

У процесі руйнування бетону та фібробетону можна виділити кілька етапів, що характеризуються різними механізмами виникнення тріщин та деформацій. Першочергово, бетон функціонує в межах пружності, що забезпечує відсутність видимих тріщин та поступове накопичення мікроструктурних дефектів під впливом навантажень. Важливим аспектом є тертя між зернами заповнювача і цементним каменем, які стабілізують структуру матеріалу до досягнення критичних напружень, що спричиняють утворення тріщин.

Зі збільшенням навантаження на бетон утворюються мікротріщини, які потім зливаються в макротріщини, що веде до значного зниження міцності матеріалу. Досягнувши межі міцності, бетон втрачає свою несучу здатність, що проявляється в його крихкому руйнуванні, при якому основні тріщини охоплюють весь переріз матеріалу. Особливістю фібробетону є його підвищена пластичність завдяки армуванню волокнами, що дозволяє значно уповільнити поширення тріщин і підвищити здатність матеріалу витримувати додаткові навантаження навіть після досягнення межі міцності. Це призводить до поступового, менш різкого руйнування конструкцій з фібробетону порівняно зі звичайним бетоном.

Руйнування залізобетонних і армованих сітками конструкцій відбувається за різними механізмами, пов'язаними з їхньою здатністю витримувати розтягувальні та стискальні навантаження. Важливим аспектом є взаємодія

між бетоном, який добре працює на стиск, і сталеву арматурою, що приймає основні зусилля на розтяг. У випадку, коли розтягувальні зусилля перевищують допустимі, відбувається прогресуюче руйнування балки, яке супроводжується утворенням тріщин і втратами міцності.

Аналіз експериментальних даних показав, що в фібробетонних кубиках наявність волокон значно збільшує їхню залишкову міцність і здатність до пластичних деформацій, що робить руйнування більш прогнозованим і менш різким (див. рис. 1). Це підвищує надійність конструкцій з фібробетону, особливо в умовах змінних навантажень, де зменшується ймовірність раптового руйнування.

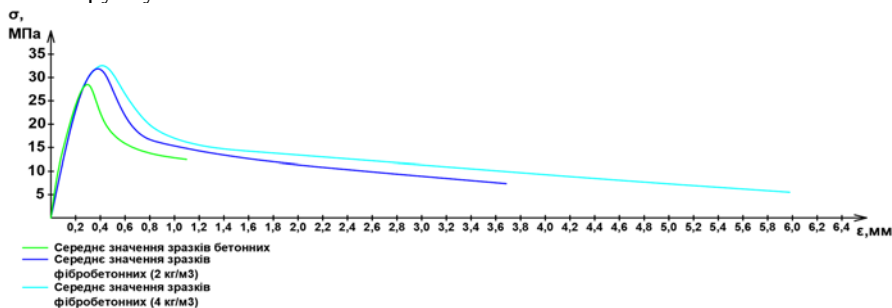


Рис. 1. – Діаграма стиску випробовуваних зразків

Загалом, отримані результати підтверджують ефективність використання фібробетону для підвищення пластичності матеріалу і прогнозованості руйнування конструкцій. Також важливим аспектом руйнування це відсутність утворень осколків (у порівнянні з бетоном який під час руйнування під дією стискаючих зусиль утворює основну кількість голкоподібних осколків). Використання фібробетону дозволяє зменшити осколкоутворення у порівнянні з еталонним бетонним зразком (див. рис. 2)

Це дозволяє забезпечити більшу надійність будівельних споруд, зокрема в умовах високих навантажень, таких як дія вибухових речовин на огорожуючі конструкції, а також зменшує ризики раптових та небезпечних відмов конструкцій в екстремальних умовах.

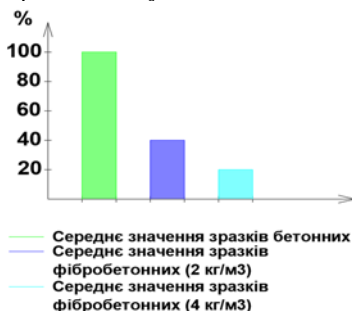


Рис. 2 Значення осколкоутворення у порівнянні з еталонним бетонним зразком

Висновки та рекомендації.

Рекомендована робота конструкції з використанням фібробетону передбачає її функціонування в зоні пластичної деформації, де напруження і деформації бетону залишаються пропорційними, не досягаючи межі руйнування.

Конструкція повинна функціонувати так, щоб у бетоні та арматурі не виникали перевантаження, які перевищують допустимі норми, а також забезпечувалося допустиме розкриття тріщин і довговічність конструкції під час експлуатаційних навантажень[3].

Застосування фібробетону в будівництві захисних споруд цивільних будинків відкриває нові можливості для підвищення їхньої стійкості до екстремальних умов експлуатації[4]. Завдяки комбінації бетону та армувальних волокон, конструкції з фібробетону мають кращі механічні властивості, ніж звичайний бетон або навіть залізобетон. Зважаючи на викладенне рекомендовано використовувати фібробетон у критичних конструкціях, що піддаються ударним та вибуховим навантаженням; впроваджувати полімерні або сталеві волокна для підвищення стійкості до динамічних впливів; поєднувати залізобетон із фіброармуванням для оптимального співвідношення міцності, вартості та довговічності.

У підсумку, комплексний підхід до проєктування армованих бетонних конструкцій, що включає застосування нових матеріалів та вдосконалених методів моделювання, є ключовим фактором для забезпечення надійності та довговічності споруд. Фібробетон, завдяки своїм унікальним властивостям, стає невід'ємною частиною сучасного будівництва, особливо у випадках, коли потрібно поєднати високу міцність із безпекою та прогнозованістю руйнування. Подальший розвиток таких матеріалів відкриває широкі можливості для їх адаптації до сучасних будівельних викликів, зокрема в умовах воєнного стану, забезпечуючи їх надійність, довговічність та економічну ефективність споруди.

1. Королько С. В., Мартинюк І. М., Стаднічук О. М., Горчинський І. В. Перспективи використання базальтових фібробетонів для фортифікаційних споруд. Військово-технічний збірник. 2018. № 19. С. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.19.2018.66-72>.
2. Hollaway L., Teng J. Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites. 1st ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. 352 p.
3. Lee J. K. Mechanics of Reinforced Concrete Structures. 2nd ed. New York: Springer, 2011. 456 p.
4. Mo Y. L. Dynamic Behavior of Concrete Structures. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 1994. 400 p.