

**ВПЛИВ ДИСПЕРСНОГО АРМУВАННЯ
НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ: ОГЛЯД**¹Андрійчук О.В., к.т.н., доцент,

o.andriichuk@lntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6275-097X

¹Громов Д.Ю., аспірант,

hromov.d2711@lntu.edu.ua, ORCID: 0009-0006-7862-6662

¹Луцький національний технічний університет

вул. Львівська, 75, м. Луцьк, 43018, Україна

Анотація. Сучасні умови експлуатації бетонних конструкцій зумовлюють підвищені вимоги до фізико-механічних характеристик матеріалів, зокрема міцності, тріщиностійкості, ударної в'язкості та зносостійкості, а також до їх стійкості в умовах впливу агресивних середовищ. Перспективним способом удосконалення експлуатаційної надійності бетонних конструкцій є застосування дисперсного армування – рівномірне додавання коротких волокон у бетонну матрицю. Таке технологічне рішення зменшує інтенсивність розвитку тріщин і їх ширину, підвищує енергоємність руйнування, покращує розподіл напруження в матеріалі та забезпечує надійну роботу конструкцій в умовах динамічного або ударного навантаження.

У статті подано огляд результатів вітчизняних та зарубіжних досліджень щодо впливу різних типів фібри: сталеві, полімерної, базальтової, скляної та вуглецевої на основні показники міцності бетону (стиск, осьовий розтяг, розтяг при згині, стійкість до ударних навантажень), а також на пов'язані експлуатаційні характеристики (водонепроникність, морозостійкість, хімічна стійкість). Показано, що ефективність такого типу армування значною мірою визначається геометрією та механічними властивостями волокон, видом навантаження, умовами експлуатації, орієнтацією волокон і якістю їх зчеплення з бетонною матрицею. Здійснено узагальнення експериментальних результатів щодо використання фібри в дорожніх конструкціях (водовідвідні лотки, безнапірні труби, оболонки), залізничних шпалах, а також у конструкціях з підвищеною вибухостійкістю.

Окрему увагу приділено комбінованому застосуванню фібри та класичного армування для підвищення несучої здатності та оптимізації розмірів конструктивних елементів. Розглянуто перспективи поєднання дисперсного армування з наномодифікованою цементною матрицею, яка має покращену мікроструктуру та підвищені тріщиностійкість і швидкість твердіння.

Ключові слова: фібробетон, дисперсне армування, фізико-механічні властивості, тріщиностійкість, довговічність, динамічні навантаження.

Вступ. Бетон є одним із найпоширеніших конструкційних матеріалів у будівництві завдяки високій міцності на стиск, широкій доступності сировини та технологічній простоті виготовлення. Але традиційні цементні композити характеризуються низькою тріщиностійкістю, недостатньою ударною в'язкістю та схильністю до формування мікротріщин під дією усадкових і температурних деформацій. Ці недоліки суттєво обмежують довговічність і експлуатаційну надійність бетонних конструкцій, особливо в умовах впливу агресивних середовищ або дії змінних і динамічних навантажень.

У публікації зосереджено увагу передусім на фізико-механічних властивостях бетону (міцність на стиск, осьовий розтяг, розтяг при згині, тріщиностійкість, ударна в'язкість), а також на експлуатаційних характеристиках (довговічність, морозостійкість, водонепроникність). У межах цього огляду мікроструктурні аспекти наведено вибірково – лише для інтерпретації змін фізико-механічних та експлуатаційних характеристик, описаних у проаналізованих джерелах.

Перспективним методом покращення фізико-механічних властивостей бетону є його

дисперсне армування, що передбачає рівномірне додавання коротких волокон у структуру бетонної матриці. Така технологія забезпечує перерозподіл локалізованих напружень, зменшення тріщиноутворення і підвищення енергоємності руйнування, що в комплексі підвищує надійність та довговічність конструкцій. Залежно від типу волокон (сталеві, полімерні, базальтові, скляні або вуглецеві) – формується різний вплив на мікроструктуру та механічні характеристики бетону, що забезпечує широкі можливості для адаптації складу фібробетонної суміші під конкретні умови експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Упродовж останніх десятиліть фібробетон і його дисперсне армування активно досліджуються в контексті підвищення тріщиностійкості, міцності та довговічності бетонних конструкцій. Значна кількість наукових робіт присвячена вивченню впливу геометричних параметрів волокон, їх структури та об'ємного вмісту на фізико-механічні властивості бетону.

Зокрема, дослідження [1–4] підтверджують високу ефективність сталевих волокон, особливо гачкоподібної форми (анкерна фібра) для підвищення міцності на розтяг при згині, тріщиностійкості та стійкості до ударних і вибухових навантажень. Наукові праці [2, 5, 6] описують позитивний вплив базальтової фібри на морозостійкість, формувальні властивості та мікроструктуру суміші. Полімерні волокна (фібри), зокрема поліпропіленові, активно застосовуються як недорогий засіб підвищення терміну експлуатації, зменшення усадкових деформацій і підвищення ударної в'язкості [7, 8].

Опубліковані результати наукового дослідження [9] описують суттєве вдосконалення структури бетону внаслідок застосування наномодифікованої цементної матриці з дисперсним армуванням, що дозволяє отримати високу абсолютну міцність при дії динамічних навантажень.

Варто зазначити, що науковці досліджують і комбіновані підходи армування конструкцій – зокрема поєднання фібрового армування з традиційними арматурними каркасами, що дозволяє покращити експлуатаційні показники конструкцій у складних умовах їх навантаження [4, 10]. У дослідженні [11] запропоновано вдосконалену методику розрахунку комбіновано-армованих елементів із урахуванням повної роботи матеріалу на стиск та осьовий розтяг, що є особливо актуальним для проектування згинальних конструкцій зі сталеві фібробетону.

Водночас аналіз літературних джерел свідчить про відсутність уніфікованих підходів до оцінки ефективності різних типів волокон та їх комбінацій, особливо в умовах комплексного навантаження (вибухового, вогневого, повторного) або впливу агресивних середовищ. Це зумовлює необхідність подальшої систематизації наявних даних і проведення комплексних порівняльних досліджень застосування різних типів фібр для армування бетону.

Мета та завдання. Метою цього дослідження є узагальнення результатів наукових експериментів щодо впливу різних типів дисперсного армування на фізико-механічні властивості бетону та аналіз ефективності застосування фібрових композитів у будівництві.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- 1) проаналізувати основні типи волокон, що використовуються для дисперсного армування бетону;
- 2) встановити вплив геометричних і механічних характеристик волокон на тріщиностійкість, міцність та інші основні характеристики бетону;
- 3) охарактеризувати механізми взаємодії волокон із бетонною матрицею;
- 4) систематизувати переваги застосування фібробетону – залежно від умов експлуатації.

Матеріали та методика дослідження. Оскільки наукова робота має оглядовий характер і базується на критичному аналізі сучасної наукової літератури, що присвячена впливу дисперсного армування на фізико-механічні властивості та мікроструктуру бетону. Для опрацювання проаналізовано 32 наукових джерела (рецензовані наукові статті, оглядові праці, експериментальні звіти та чинні нормативні документи), з яких більшість опубліковані протягом останнього десятиліття.

Основним методом є порівняльний аналіз результатів, представлених у різних дослідницьких роботах. Особливу увагу приділено впливу типу волокон (сталевих, полімерних, базальтових, скляних, вуглецевих) на основні експлуатаційні характеристики бетону: міцність на

стиск, осьовий розтяг і розтяг при згині, тріщиностійкість, зносостійкість, морозостійкість, водопоглинання та стійкість до впливу агресивних середовищ. Окремо проаналізовано результати мікроструктурного аналізу, а також дані числового моделювання поведінки фібробетону.

Результати досліджень. Варто зазначити, що у будівництві бетон залишається одним із ключових конструкційних матеріалів, який широко застосовується у житловому, промисловому та інфраструктурному секторі завдяки високій міцності на стиск, доступності сировинної бази та відносній простоті технології виготовлення. Водночас він має і суттєві недоліки – низька тріщиностійкість, обмежені характеристики на осьовий розтяг і розтяг при згині, а також утворення мікротріщин під дією усадкових і температурних деформацій. Ці недоліки актуалізуються при дії повторних чи ударних навантажень, а також за експлуатації в умовах впливу агресивних середовищ.

Фібробетон – це різновид бетонного композиту, що складається з в'язучого, заповнювачів та дисперсних волокон різного типу і геометрії. Якщо модуль пружності волокон перевищує модуль бетонної матриці, волокна сприймають на себе основну частину зовнішніх навантажень, а міцність композиту зростає зі збільшенням їх вмісту до певного оптимального рівня. Армування сприяє покращенню міцності бетону на осьовий розтяг, стиск і розтяг при згині, а також ударної в'язкості, тріщиностійкості, зносо- й морозостійкості, водонепроникності та терміну експлуатації [1]. Важливо зазначити, що вплив на міцність на стиск є залежним від типу волокон і технології виготовлення.

Армувальні волокна з низьким модулем пружності (нейлон, поліпропілен, акрил) менш ефективно підвищують жорсткість, але суттєво підвищують пружні властивості. Волокна з високим модулем пружності (сталеві, скляні або вуглецеві) забезпечують підвищення міцності та жорсткості конструкцій. Водночас ефективність передачі напружень від матриці до волокон залежить від взаємодії між цими компонентами [12].

Аналіз літературних джерел засвідчує, що різні типи волокон здійснюють специфічний вплив на фізико-механічні та експлуатаційні властивості бетону. У більшості досліджень сталеві волокна асоціюються з підвищенням жорсткості та опору розтягу при згині, полімерні (зокрема поліпропіленові) – зі зменшенням утворення усадкових тріщин, базальтові – з покращенням морозостійкості і адгезії, тоді як скловолокно – зі зниженням проникності та підвищенням стійкості до впливу агресивних середовищ. Крім того, у низці робіт відзначається зменшення пористості, ущільнення мікроструктури цементного каменю та підвищення його однорідності.

Отже, дисперсне армування – це ефективний метод підвищення експлуатаційних характеристик бетону, який дозволяє адаптувати матеріал до конкретних умов роботи шляхом раціонального підбору типу і кількості армувальних волокон за об'ємом (μ).

Окремим напрямом застосування дисперсно-армованих бетонів є використання вібропресованих сумішей, які використовуються для виготовлення елементів дорожньої та інженерної інфраструктури. На водоцементне відношення (В/Ц) вібропресованого фібробетону впливають витрата цементу, кількість і довжина сталевої фібри, а також вміст повітровтягувальної добавки. Слід зазначити, що додавання фібри ускладнює процес формування суміші, знижує її ущільнюваність, а це зумовлює потребу у збільшенні В/Ц. Водночас введення повітровтягувальних пластифікаторів знижує В/Ц відношення і покращує реологічні властивості суміші. Підвищення вмісту цементу та повітровтягувальної добавки компенсує вплив фібрового армування, забезпечуючи збереження формувальних властивостей. Додавання сталевої фібри у вібропресовану бетонну суміш сприяє підвищенню міцності на стиск у середньому на 10–17 % (до 80–100 МПа), а також міцності на розтяг при згині на 25–46 % (до 9–12 МПа) [2]. Таким чином, отримання оптимальних фізико-механічних характеристик вібропресованого фібробетону можливе за умови раціонального підбору складу, що передбачає врахування геометричних параметрів сталевої фібри, які визначають ущільнюваність бетонної суміші. Оптимальні показники досягаються при використанні коротких волокон, підвищеному вмісті цементного тіста та застосуванні пластифікуючих і повітровтягувальних добавок, що дозволяє забезпечити достатню ущільнюваність суміші без надмірного збільшення водоцементного відношення та сформувати однорідну і міцну структуру композиту.

Отримані науковцями Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП) результати дозволяють рекомендувати вібропресований сталевібробетон із наджорстких сумішей для виготовлення дорожніх елементів, які мають високу міцність та ударостійкість [2]. Відповідно до ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 «Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону» [13], при розрахунку сталевібробетонних елементів слід здійснювати встановлення опору на стиск аналогічно, як і для бетонної матриці, з якої виготовлено фібробетон. Для дрібнозернистого бетону це може призвести до зниження несучої здатності, оскільки фактична міцність сталевібробетону перевищує міцність його бетонної матриці [11, 14].

Згідно з результатами експериментальних досліджень [3], збільшення об'ємної частки сталевібробетону підвищує міцність фібробетону на осьовий розтяг, його початковий модуль пружності, зменшує відносні деформації. Науковцями Львівського національного аграрного університету (ЛНАУ) досліджувалося фіброве армування на рівні $\mu = 0,7\%$, $\mu = 1,25\%$ і $\mu = 1,8\%$, що охоплюють доцільний діапазон для практичного застосування. При вмісті фібри менше $\mu = 0,7\%$ ефект армування виявляється маловираженим, тоді як перевищення $\mu = 1,8\%$ ускладнює формування фібробетонної суміші, погіршує її оброблюваність і зменшує економічну доцільність – через зростання вартості матеріалів. Узагальнення результатів досліджень свідчить, що оптимальний діапазон об'ємного вмісту сталевібробетону формується як компроміс між підвищенням механічних характеристик фібробетону та забезпеченням належних технологічних і економічних показників його виготовлення.

Відповідно до результатів проведеного дослідження [1] встановлено, що ефективність фібрового армування залежить від площі прикладання зосередженого навантаження до конструкцій. За умов малої контактної площі вплив сталевих волокон є маловираженим, а при збільшенні площі навантаження – армувальний ефект проявляється чіткіше та стабільніше. За малої площі контакту формується локалізований напружений стан, унаслідок чого значна частина волокон не залучається до роботи з перерозподілу напружень. Із зростанням площі прикладання навантаження ефективність залучення волокон у процес стримування тріщиноутворення підвищується.

Таким чином, сталеве дисперсне армування – це спосіб підвищення локальної міцності бетону, особливо за оптимального об'ємного вмісту волокон. Необхідно враховувати, що хаотична орієнтація волокон у цементній матриці може знижувати ефективність армування – рис. 1.



Рис. 1. Сталеві волокна з гачкоподібними кінцями (анкерна фібра) [1]

Загальновідомо, що сталеві волокна ефективніше підвищують міцність бетону на розтяг при згині порівняно з міцністю на стиск, осьовий розтяг або сколювання. Сталевібробетон (СФБ) також має підвищену стійкість до дії вибухових навантажень.

Науковцями Луцького національного технічного університету (ЛНТУ) було проведено серію досліджень різноманітних тонкостінних конструкцій для дорожнього будівництва (безнапірні труби, лотки для притрасового водовідведення, оболонкові елементи у формі гіперболічного параболоїда) [15, 16], які виготовлялися зі сталевібробетону – рис. 2.



Рис. 2. Дослідження СФБ-конструкцій в ЛНТУ:
а – безнапірні труби; б – лотки для водовідведення; в – оболонки-гіпари

Під час дослідження СФБ-конструкцій, що представлені на рис. 2, встановлено вплив відсотка армування на міцність бетону та сталевіфробетону на центральний стиск та осьовий розтяг. Отримані в результаті експерименту дані представлено в табл. 1.

Табл. 1 – Встановлені механічні характеристики бетонної та СФБ-матриці [17]

№ зразків	Міцність на стиск, МПа			Міцність на осьовий розтяг, МПа		
	Бетон	СФБ, $\mu = 2,5$	СФБ, $\mu = 1,5$	Бетон	СФБ, $\mu = 2,5$	СФБ, $\mu = 1,5$
1	32,5	36,0	30,9	2,01	2,80	2,76
2	29,5	34,3	32,5	1,86	2,94	2,38
3	32,5	37,8	33,7	2,20	2,75	2,45
Середнє	31,5	36,0	32,4	2,02	2,83	2,53

Додавання сталевих волокон покращує механічні характеристики фібробетону, зокрема суттєво підвищує його міцність на розтяг при згині – згідно з отриманими результатами дослідження [4]. Схематичне зображення впливу сталевих волокон на властивості бетону наведено на рис. 3.



Рис. 3. Основні чинники, що визначають ефективність додавання сталевіфбри до складу бетонної суміші [4]

Станом на сьогодні – актуальним і перспективним напрямком підвищення ефективності сталевіфробетонних конструкцій є здійснення контролю за орієнтацією сталевих волокон, що забезпечує стримування розвитку тріщин і зменшує ширину їх розкриття.

Згідно з результатами комплексного дослідження китайських науковців [18] – орієнтацію фібрових волокон в бетонній суміші можливо змінювати за допомогою електромагнітного поля, досягаючи кута повороту до 90° . Проведені ними експерименти з розколювального випробування зразків підтвердили ефективність такого підходу. Найвищу міцність було зафіксовано у зразках із орієнтацією волокон у секторі 0° – 15° , що найбільше відповідає напрямку прикладеного навантаження.

У дослідженні [19] також проаналізовано вплив орієнтації сталевих фібри, що забезпечувалася дією магнітного поля, на міцнісні характеристики сталевібробетону. Показано, що ефективність орієнтування волокон істотно залежить від рухомості бетонної суміші. За низької рухомості осад конуса (ОК) рівний 7 см вплив магнітного поля на міцність бетону на розтяг при згині є незначним. Водночас підвищення рухомості суміші до ОК = 21 см забезпечує суттєве покращення ефекту орієнтації фібри, що приводить до зростання міцності на розтяг при згині у 1,6 рази у віці 7 днів та у 1,5 рази у віці 28 днів порівняно з контрольними зразками, ущільненими без дії магнітного поля.

Отримані результати свідчать, що підвищення ефективності орієнтування фібри можливе лише за достатньої рухомості бетонної суміші, яка забезпечує можливість перерозподілу та повороту волокон у напрямку прикладеного магнітного поля. За жорстких або малорухомих сумішей потенціал такого підходу суттєво обмежується, що вказує на необхідність узгодження технологічних параметрів суміші з методами примусової орієнтації волокон.

Результати експериментальних досліджень [10], що були проведені на призмах із звичайного бетону та СФБ, підтверджують, що додавання сталевих волокон суттєво підвищує несучу здатність зразків від дії зосереджених навантажень, змінюючи характер руйнування з крихкого на пластичний. На відміну від звичайного бетону, де критичні пошкодження з'являються при незначному ексцентриситеті, то в СФБ-зразках відбувається локалізоване тріщиноутворення в межах навантаженої зони. Після перевищення межі міцності звичайний бетон руйнувався з характерним ефектом, подібним до вибуху, утворюючи клиноподібні елементи великих розмірів – особливо за умов малої площі навантаження або значного ексцентриситету. Натомість сталевібробетон характеризувався поступовим руйнуванням із множинним розгалуженням тріщин, що є індикатором поступового досягнення граничного стану.

При центральному навантаженні зменшення площі контакту призводить до втрати цілісності бетонних зразків, тоді як сталевібробетон має вищу тріщиностійкість. Типові приклади руйнування зразків за умов центрального навантаження та з ексцентриситетом – представлено на рис. 4.



Рис. 4. Приклади руйнування бетонних і СФБ-призм за умов дії центрального навантаження та з ексцентриситетом [10]

Згідно з результатами експериментальних досліджень одеських науковців, наведених у роботі [20], встановлено, що характер руйнування фібробетонних зразків істотно залежить від об'ємного вмісту волокон. За рівня фіброармування $\mu = 0,5\%$ руйнування відбувається крихко, тоді як при вмісті волокон $\mu = 1,0\%$ і $\mu = 1,5\%$ спостерігається перехід до більш пластичного механізму руйнування. Авторами показано, що оптимальні властивості фібробетонної суміші досягаються при застосуванні бетонної матриці з крупним заповнювачем фракції ≤ 10 мм при вмісті фібри $\mu = 1,0\%$. За таких умов міцність бетону на стиск зростає у 1,35 рази, а міцність на розтяг при згині – у 3,4 рази порівняно з неармованими зразками. Крім того, введення

фібрового армування сприяє зменшенню деформацій повзучості на 21-30 % залежно від рівня прикладених напружень.

У дослідженні [21] наведено результати експериментальних досліджень несучої здатності зразків із сталевібробетону, армованих сталеву фібру різних типів (анкерної, плющеної та хвилястої) за об'ємного вмісту волокон $\mu = 1,0\%$. За результатами встановлено, що несуча здатність суттєво не залежить від типу застосованої фібри, однак її введення принципово змінює характер руйнування матеріалу, яке відбувається поступово із формуванням наскрізних тріщин, без раптового розпаду зразків на окремі фрагменти, що свідчить про підвищення тріщиностійкості та енергоємності руйнування.

У роботі [22] досліджено вплив коефіцієнта фібрового армування за об'ємом при використанні сталеву фібру із загнутими кінцями типу HE1050 на міцність і деформативність сталевібробетону за умов короткотривалого стиску. Встановлено, що зі збільшенням об'ємного вмісту фібри зростають міцнісні характеристики матеріалу, початковий модуль пружності та відносні деформації, що відповідають піковій точці діаграми деформування, при одночасному зменшенні відносних деформацій за фіксованого рівня напружень. Отримані результати підтверджують ефективність дисперсного армування для підвищення жорсткості та деформаційної стійкості сталевібробетону. Автори також підтвердили доцільність застосування модифікованої поліноміальної залежності для аналітичного опису діаграми деформування сталевібробетону за короткотривалого стиску.

Аналіз результатів експериментальних досліджень, здійснених науковцями [23], свідчить, що зростання об'ємного вмісту сталевих волокон у бетоні підвищує його стійкість до впливу вибухового навантаження. Найвища ефективність спостерігалася у зразках із відсотком армування $\mu = 1,0\%$ та $\mu = 1,5\%$. Натомість суміші з $\mu = 0,5\%$ волокон та звичайний залізобетон є малоефективними в опорі вибуховій хвилі.

Представлено на рис. 5 зовнішній вигляд експериментальних СФБ-плит з різним відсотком їх армування (від 0 % до $\mu = 1,5\%$) після випробувань на вибухові впливи.



Рис. 5. Вплив відсотка фібрового армування на характер пошкоджень СФБ-плит [23]

Реалізовано у дослідженні [10] користувачку модель у програмному середовищі MSC Marc (комерційний програмний пакет для скінченно-елементного аналізу) із використанням багаторівневої моделювальної концепції – для чисельного аналізу поведінки сталевібробетону. Необхідні для моделювання параметри та характеристики – модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границі міцності на стиск і осьовий розтяг, – визначалися на основі експериментальних даних або обчислювалися при допомозі субмоделей. Рис. 6 ілюструє високу відповідність між числовими результатами та експериментальними даними під час центрального навантаження на площі 50×50 мм. Модель чітко відтворює пластичну поведінку СФБ – процес множинного тріщиноутворення. На відміну від вибухоподібного

розщеплення зразків без армування, СФБ-зразки поступово руйнуються з локалізацією пошкоджень, що підтверджує достовірність числової моделі.

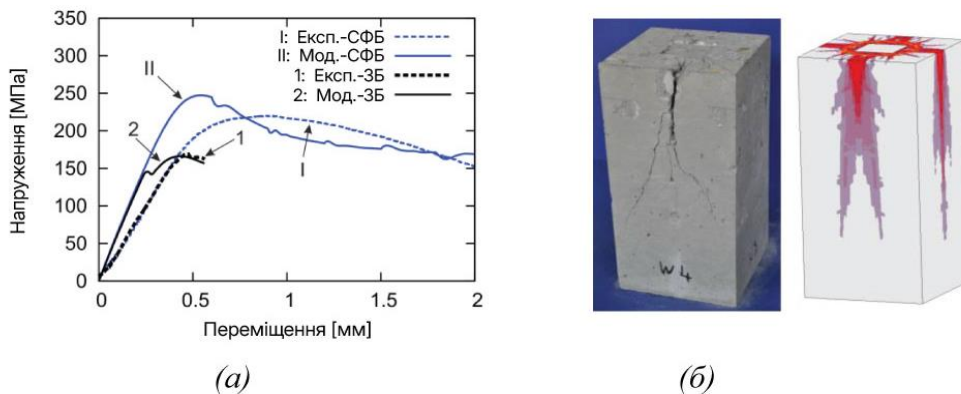


Рис. 6. Порівняння експериментальних і чисельних результатів для сталевібробетонних та звичайних бетонних зразків при центральному навантаженні:
 а – залежність напруження від переміщення для сталевібробетону та звичайного бетону;
 б – характер тріщиноутворення у зразку сталевібробетону [10]

Отримані результати вказують на перспективність числового моделювання як інструменту попередньої оцінки роботи сталевібробетонних конструкцій за умов локалізованого навантаження.

Крім сталевих фібр (рис. 1 або їх аналогів) для армування будівельних конструкцій також застосовуються волокна з інших матеріалів.

Полімерні волокна, зокрема поліпропіленові, широко застосовуються для підвищення тріщиностійкості, ударної в'язкості та довговічності бетонних конструкцій. Завдяки високій хімічній стійкості вони стійкі до корозії, сприяють зменшенню утворення усадочних тріщин на ранніх стадіях твердіння та підвищують зносостійкість бетону. Аналіз комплексних лабораторних досліджень, здійснених науковцями [7], засвідчив ефективність поліпропіленових волокон (ППФ) у складі бетону для виготовлення залізничних шпал. Встановлено, що при оптимальному дозуванні $0,7 \text{ кг/м}^3$ ППФ знижують проникність та капілярну пористість цементної матриці завдяки ефекту блокування пор, що підвищує довговічність матеріалу. Зафіксовано зменшення швидкості проходження ультразвукових хвиль, дифузії хлоридів, проникнення води та сорбційної здатності. Водночас спостерігається підвищення міцності на осьовий розтяг і розтяг при згині при незначному зниженні міцності на стиск.

У дослідженні [8] не встановлено впливу поліпропіленових волокон на міцність бетону на стиск. Але встановлено, що їх наявність підвищує ударну в'язкість, міцність на осьовий розтяг і розтяг при згині, а також терміни експлуатації. При збільшенні довжини волокон або зменшенні їх діаметра – відбувається зменшення ширини тріщин, що підтверджено як експериментально, так і аналітично – із урахуванням геометрії, типу та об'ємного вмісту волокон.

Базальтові армувальні волокна підвищують міцність бетону на осьовий розтяг і розтяг при згині, морозостійкість матеріалу, а також зменшують водопоглинання. Застосування модифікованої базальтової фібри [5] активізує утворення продуктів гідратації клінкерних мінералів на її поверхні, що покращує зчеплення волокон із цементною матрицею [6]. Згідно з результатами досліджень [2], базальтове волокно забезпечує міцність на розтяг при згині на рівні 10–13 МПа, що на 40–50 % нижче порівняно зі сталевібробетоном. Водночас воно покращує формувальні властивості бетонної суміші під час вібропресування, підвищує її однорідність і дозволяє виготовляти тонкостінні конструктивні елементи складної геометрії.

Вуглецеві волокна відзначаються надзвичайно високим модулем пружності, міцністю на розтяг при згині і стійкістю до корозії [12]. Бетони армовані вуглецевими волокнами забезпечують створення надміцних і водночас полегшених конструкцій із підвищеною міцністю на осьовий розтяг, що є важливим для реконструкції та підсилення об'єктів

інфраструктури, мостів і захисних споруд, особливо в умовах впливу агресивних середовищ. Науковцями у дослідженні [24] проаналізовано механічні властивості бетону, який армований вуглецевими волокнами (CFRC). Встановлено показники рухливості суміші, а також міцність на стиск, на осьовий розтяг при розколюванні та на розтяг при згині за об'ємного вмісту волокон 0,5; 1,0; 1,5 і 2,0 %. Збільшення вмісту волокон знижує рухливість суміші. Міцність на стиск зростала до оптимального значення при $\mu = 1,0$ % волокон (приріст 13,65 %). Подальше збільшення відсотка армування до приросту міцності не призводило. На основі отриманих науковцями результатів було сформульовано емпіричні залежності для прогнозування міцності CFRC-бетонів на стиск, осьовий розтяг та розтяг при згині.

Скловолокно знижує рухливість бетонної суміші через велику питому поверхню волокон, що підвищує внутрішній опір суміші та зменшує усадку. Згідно з результатами дослідження [25], додавання скловолокна зменшує водопоглинання та проникність в умовах впливу агресивних середовищ, покращує міцність на осьовий розтяг і розтяг при згині, а також підвищує довговічність фібробетону, особливо за умов дії хлоридів і в морському середовищі. При цьому суттєвого зростання міцності на стиск не зафіксовано. Оптимальне армування скловолокном становить $\mu = 2,0$ %; а вищі значення вимагають збільшення кількості пластифікатора. Надлишок волокон у поєднанні з високим В/Ц-відношенням призводить до збільшення кількості та розмірів пор. Бетон, армований скловолокном (GFRC), має суттєві переваги порівняно зі звичайним бетоном: приріст міцності на осьовий розтяг становить до 50 %, зменшується переріз конструктивних елементів, зменшення загальної площі тріщин – приблизно на 50 %, що забезпечує кращий захист від проникнення агресивних речовин. Крім того, знижена теплопровідність GFRC-бетонів підвищує енергоефективність конструкцій.

Дослідниками встановлено, що ефективність GFRC-армування залежить від оброблюваності суміші та рівномірного розподілу волокон: утворення «їжаків», зростання пористості чи слабе зчеплення з матрицею погіршують властивості бетону [26].

Узагальнення результатів аналізу сучасних наукових досліджень свідчить, що різні типи дисперсних волокон створюють специфічний і взаємодоповнюючий вплив на фізико-механічні та експлуатаційні властивості бетону. Сталеві волокна забезпечують найбільший приріст міцності на розтяг при згині, жорсткості та енергоємності руйнування, формуючи псевдопластичний характер деформування і підвищену тріщиностійкість матеріалу. Полімерні, зокрема поліпропіленові, волокна ефективні насамперед для контролю усадкових і експлуатаційних тріщин та підвищенні довговічності бетонних конструкцій при мінімальному впливі на міцність на стиск. Базальтові волокна забезпечують компроміс між покращенням міцнісних характеристик і технологічністю бетонної суміші, що є доцільним для тонкостінних елементів складної геометрії. Скловолокно суттєво підвищує тріщиностійкість і стійкість бетону до проникнення агресивних середовищ, однак потребує контролю реологічних властивостей суміші. Вуглецеві волокна, завдяки високому модулю пружності та корозійній стійкості, забезпечують формування надміцних і полегшених бетонних композитів за умови оптимізації об'ємного вмісту та технології приготування суміші.

Таким чином, ефективність дисперсного армування бетону визначається не лише типом волокон, але й їх геометрією, об'ємним вмістом, орієнтацією, якістю зчеплення з цементною матрицею та технологічними умовами формування суміші, що обумовлює необхідність раціонального підбору складу фібробетону відповідно до умов експлуатації конструкцій.

Перспективним напрямом удосконалення фібробетонних конструкцій є застосування наномодифікованого бетону з дисперсним армуванням. Згідно з результатами мікроскопічного аналізу зразків, здійсненого науковцями Національного університету «Львівська політехніка» (НУ «ЛП»), зруйнованих під дією ударних навантажень [9], встановлена однорідна структура цементної матриці, зміцнений контакт між цементним каменем і заповнювачем, а також хаотична орієнтація рівномірно розподілених волокон. Досягнення відповідних характеристик забезпечується наномодифікацією цементної матриці органо-мінеральними добавками, що містять ультрадисперсні мінеральні компоненти та полікарбоксилатний суперпластифікатор. У поєднанні з дисперсним армуванням це дозволяє отримати швидкотужавіючий бетон з міцністю

на стиск у межах 100–110 МПа та підвищеною тріщиностійкістю в умовах дії високошвидкісного удару. Такий ефект досягається за рахунок ущільнення структури цементного каменю, зниження В/Ц-відношення, утворення вторинних продуктів гідратації внаслідок пуцоланової реакції, зміцнення контактної зони між матрицею та заповнювачем.

Науковцями при дослідженні [27] було виготовлено чотири типи бетонних сумішей із застосуванням:

- сталевих волокон (SFRC);
- поліестерних волокон (PYFRC);
- поліпропіленових волокон (PPFRC);
- контрольна суміш – без армування (R1).

Проведено комплексну оцінку фізико-механічних властивостей затверділого бетону, зокрема його усадки, пористості, щільності, міцності на стиск, поверхневої твердості, швидкості проходження ультразвукових імпульсів, стирання, капілярного водопоглинання, глибини карбонізації та морозостійкості.

Встановлено, що тип і геометрія волокон істотно впливають на консистенцію бетонної суміші: найбільше зниження усадки (на 42 %) спостерігалось у PYFRC [27].

Пористість збільшується у всіх типах армованих бетонів, найбільше – у SFRC (на 32 %), при цьому об'ємна вага бетону істотно не змінювалась.

За результатами випробувань на стиск в SFRC встановлено приріст міцності на 12,4 %, PYFRC – на 3,4 %, тоді як у PPFRC – зниження на 4,3 % порівняно з контрольним зразком.

Поверхнева міцність збільшилася в PPFRC – на 8,04 %, а при ультразвуковому методі – для SFRC на 5,4 %. Стираність збільшилася у SFRC на 0,5 %, а в PPFRC – на 0,18 %.

Найбільше капілярне водопоглинання зафіксовано у R1, найменше – у PYFRC.

Глибина карбонізації була найнижчою у контрольного зразка, а найвищою – у SFRC (на 130,8 % більша), ймовірно, через підвищену пористість. Найвищу морозостійкість продемонстрували SFRC і PYFRC зразки. Таким чином, тип волокон суттєво впливає на експлуатаційні характеристики фібробетону: сталеві волокна покращують міцність і зносостійкість, поліестерні – морозостійкість і водонепроникність, а поліпропіленові – окремі параметри, без істотного впливу на міцність на стиск.

За результатами дослідження [28] додавання сталевих і поліпропіленових волокон у бетон для підлогових покриттів зменшує рухливість суміші та збільшує вміст повітряних пор, не впливаючи суттєво на густину матеріалу. Сталеві волокна підвищують міцність на осьовий згин, проте не впливають або дещо знижують міцність на стиск, тоді як поліпропіленові волокна (0,10 %) забезпечують меншу крихкість, вищу тріщиностійкість і є економічно доцільнішими для використання у бетонних підлогах.

Одним із ключових чинників, що визначає ефективність дисперсного армування, є довжина волокон, від якої залежить механізм їх взаємодії з цементною матрицею. Оптимальне співвідношення довжини та діаметра волокна забезпечує рівномірний розподіл напружень, ефективне зчеплення з бетоном і запобігає передчасному руйнуванню матеріалу. Надто короткі або надто довгі волокна, навпаки, можуть знижувати міцність через неефективне анкерування або утворення згустків у структурі суміші [17].

Результати досліджень [29, 30] показують, що введення поліпропіленових волокон зменшує кількість мікротріщин у бетоні та уповільнює їх розвиток. Зокрема, у роботі [29] доведено, що коротші волокна ефективніше запобігають утворенню й поширенню мікротріщин завдяки їх більшій кількості та рівномірному розподілу в бетонній матриці. Це підвищує міцність на осьовий розтяг. При збільшенні навантаження, коли мікротріщини перетворюються на макротріщини, ключову роль починають відігравати довші волокна, які забезпечують підвищення пластичності бетону та збільшення його міцності на осьовий розтяг і осьовий згин. Отримані результати підтверджують доцільність комбінованого використання волокон різної довжини для підвищення загальної тріщиностійкості елементів. На рис. 7 представлено схему роботи коротких і довгих волокон у процесі підвищення тріщиностійкості та механізмі «зшивання» тріщин.

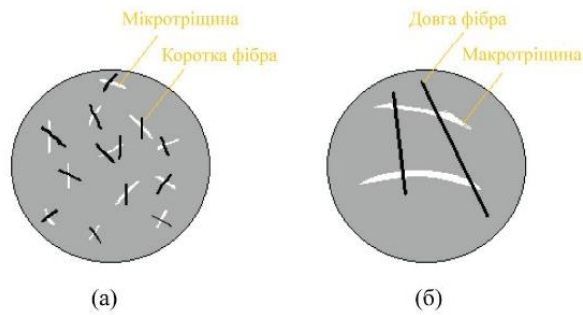


Рис. 7. Вплив: а – коротких волокон на утворення мікротріщин; б – довгих волокон – на розвиток макротріщин [29]

У роботі [29] наведено результати комплексних експериментальних досліджень, що підтверджують істотний вплив довжини поліпропіленових волокон на фізико-механічні властивості бетону. Для випробувань використовувалися волокна завдовжки 12,7 мм та 25,4 мм із різним вмістом за масою – 0 %, 0,20 %, 0,25 % і 0,30 %. Встановлено, що коротші волокна загалом забезпечували вищу міцність на осьовий стиск порівняно з довгими та контрольними зразками без армування (рис. 8), тоді як довші волокна працювали ефективніше під час осьового згину, що підтверджено результатами, наведеними на рис. 9.

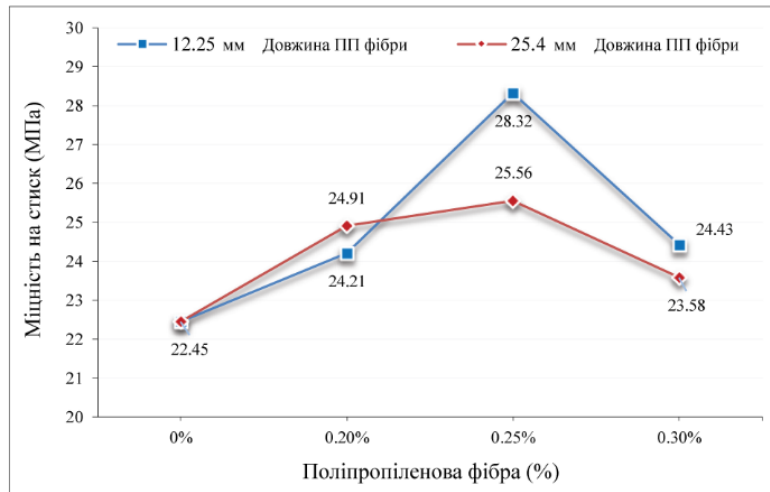


Рис. 8. Середня міцність на осьовий стиск бетону з поліпропіленовими волокнами різної довжини [29]

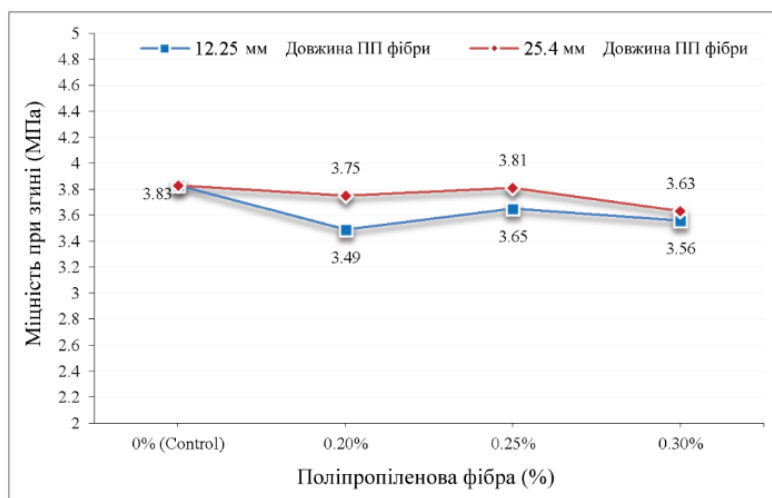


Рис. 9. Середня міцність на осьовий згин бетону з поліпропіленовими волокнами різної довжини [29]

Результати дослідження [31] підтверджують, що збільшення довжини та об'ємної частки базальтових волокон підвищує міцність бетону на стиск, осьовий згин і осьовий розтяг, а також покращує його тріщиностійкість при усадці. Водночас надмірна довжина волокон (понад 36 мм) або велика їх кількість (понад 0,40 %) знижують рухливість бетонної суміші через злипання волокон. Оптимальними параметрами визнано довжину 12–18 мм і вміст 0,10–0,15 %, за яких досягається найбільш збалансоване поєднання міцності та тріщиностійкості.

У роботі [32] досліджено вплив скляних волокон на фізико-механічні властивості бетону. Встановлено, що їх додавання підвищує міцність на стиск і розтяг, а також покращує тріщиностійкість. Волокна з меншим відношенням довжини до діаметра (коротші або товстіші) забезпечують більший приріст міцності, ніж довші тонкі волокна за однакової кількості у суміші. Використання комбінованих волокон різної довжини підвищило міцність на стиск на 21,6 %, а міцність на розтяг – на 17,5 % порівняно з неармованим бетоном. При цьому рухливість бетонної суміші зменшується із введенням волокон, особливо довших, однак при використанні комбінованих волокон спостерігається її покращення порівняно з сумішами, що містять лише довгі волокна.

Висновки. Проведений аналіз сучасних наукових досліджень засвідчує, що дисперсне армування є одним із найефективніших способів підвищення фізико-механічних та експлуатаційних характеристик бетону. Введення коротких волокон дозволяє підвищити тріщиностійкість і ударну в'язкість, покращити роботу матеріалу при розтягу (осьовому та при згині) і, залежно від типу волокон та технологічних параметрів суміші, впливати на довговічність конструкцій в умовах дії агресивних середовищ чи динамічних навантажень.

Порівняння результатів різних авторів показує, що найбільш чутливими до дисперсного армування є характеристики, пов'язані з тріщиноутворенням і руйнуванням (міцність на розтяг при згині, розвиток і ширина тріщин, енергоємність руйнування та характер деформування). Водночас щодо міцності на стиск спостерігається варіативність результатів: у низці робіт фіксується приріст, тоді як в інших – ефект є маловираженим або відсутнім. Узагальнення джерел свідчить, що такі розбіжності зумовлені не суперечністю висновків, а відмінностями у складі та технології виготовлення (В/Ц-відношення, реологія та ущільнюваність суміші, метод формування), геометрії волокон і їх зчепленні з матрицею, а також режимі навантаження та масштабному ефекті зразків/елементів.

Порівняльний аналіз показує, що сталеві волокна забезпечують найбільший приріст характеристик, пов'язаних із несучою здатністю при згині та локалізованих навантаженнях, і сприяють переходу від крихкого до більш пластичного механізму руйнування. Полімерні (поліпропіленові) волокна демонструють стабільний ефект щодо контролю усадкових і експлуатаційних тріщин та підвищення довговічності при мінімальному або непостійному впливі на міцність на стиск. Базальтові та скляні волокна є ефективними для підвищення тріщиностійкості, зниження проникності та підвищення стійкості в агресивних середовищах, однак вимагають забезпечення належної оброблюваності та рівномірного розподілу волокон. Вуглецеві волокна дозволяють формувати високомодульні композити з підвищеною міцністю при оптимізації об'ємного вмісту й технології приготування суміші, але характеризуються підвищеними вимогами до реології та розподілу армування.

Узагальнення проаналізованих джерел підтверджує, що ефективність дисперсного армування визначається не лише типом волокон, але й їх геометрією, об'ємним вмістом μ , орієнтацією, якістю зчеплення з цементною матрицею та технологічними умовами формування суміші. Практично важливо, що оптимальний рівень армування часто формується як компроміс між підвищенням механічних характеристик та забезпеченням технологічності й економічності доцільності виготовлення.

З урахуванням проведеного аналізу актуальними напрямками подальших досліджень дисперсно-армованих бетонів є:

- уніфікація підходів до оцінювання ефективності фібрового армування (порівнянні методики випробувань, критерії тріщиностійкості, енергоємності руйнування та довговічності);
- дослідження впливу технології формування (ущільнення, реологія, В/Ц, добавки) на

структуру, пористість і стабільність ефекту армування;

– розвиток методів керованої орієнтації волокон та оцінка їх ефективності залежно від рухомості суміші;

– оптимізація гібридних схем армування (поєднання різних волокон між собою та з класичною арматурою) для забезпечення потрібного балансу міцності, тріщиностійкості й довговічності;

– розроблення та валідація числових моделей (зокрема багаторівневих) з урахуванням механізмів множинного тріщиноутворення, зчеплення “матриця-волокно” та масштабного ефекту;

– дослідження дисперсно-армованих бетонів у складних режимах навантаження (удар, повторні/циклічні, вибухові, температурні) та в умовах агресивних середовищ, із фокусом на деградацію властивостей у часі;

– перспективи поєднання наномодифікації матриці з дисперсним армуванням для формування щільної мікроструктури й підвищення ранньої та довготривалої тріщиностійкості.

Таким чином, дисперсно-армований бетон є перспективним матеріалом для підвищення експлуатаційної надійності конструкцій, а подальший прогрес у цій галузі пов’язаний із узгодженням складу, технології виготовлення та розрахункових моделей з реальними умовами роботи конструкцій.

Література

1. Keras V., Augonis M., Adamukaitis N., Vaitekūnaitė E. Research of local compression concrete reinforced by steel fibers. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2015. Vol. 2, No. 11. P. 72–78. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.11.2.12568>.

2. Житковський В.В., Дворкін Л.Й. Вплив дисперсного армування на властивості дорожніх бетонів, отриманих шляхом вібропресування наджорстких сумішей. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2021. № 2(92). С. 24–31. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.0.24>.

3. Кінаш Р., Білозір В., Біденко І. Деформативність і міцність дрібнозернистого сталевібробетону за осьового розтягу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2023. Вип. 20. С. 45–62. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/2024/STMRB/STMRB2023n20/STMRB2023n20.pdf>. (дата звернення: 06.05.2025).

4. Vijayan D. S., Sivasuriyan A., Parthiban D., Jakimiuk A., Bayat H., Podlasek A., Vaverková M. D., Koda E. A comprehensive analysis of the use of SFRC in structures and its current state of development in the construction industry. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 19. Art. 7012. <https://doi.org/10.3390/ma15197012>.

5. Дорошенко О. Ю. Базальтове волокно як компонент цементобетону. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2021. Вип. 198. С. 22–29. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256504>.

6. Дорошенко О. Ю. Вивчення властивостей дрібнозернистих цементобетонів із використанням пластифікаторів і базальтового волокна. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2023. Вип. 206. С. 72–82. DOI: 10.18664/1994-7852.206.2023.

7. Ramezani pour A. A., Esmaeili M., Ghahari S. A., Najafi M. H. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 44. P. 411–418. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076.

8. Bagherzadeh R., Sadeghi A.-H., Latifi M. Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete. *Textile Research Journal*. 2011. Vol. 82, No. 1. P. 88–96. DOI: 10.1177/0040517511420767.

9. Марущак У. Д., Саницький М. А., Королько С. В. Наномодифіковані швидкотверднучі бетони, армовані дисперсними волокнами. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Теорія і практика будівництва. 2017. № 877. С. 137–143. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/44189> (дата звернення: 06.05.2025).

10. Breitenbücher R., Meschke G., Song F., Hofmann M., Zhan Y. Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads. *Proceedings of the FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop: Fiber Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications*. 2014. P. 417–429.
11. Андрійчук О. В., Кислюк Д. Я., Нінічук М. В. Визначення несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих сталевібробетонних згинальних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. Вип. 13. С. 13–23. DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2020-3(13)-02.
12. Awoyera P. O., Effiong J. U., Olalusi O. B., Arunachalam K. P., de Azevedo A. R. G., Martinelli F. R. B., Monteiro S. N. Experimental Findings and Validation on Torsional Behavior of Fibre-Reinforced Concrete Beams: A Review. *Polymers*. 2022. Vol. 14, No. 6. Art. 1171. DOI: 10.3390/polym14061171.
13. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016. Настанова з проєктування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ : Мінрегіон України, 2016.
14. Andriichuk O. V., Babych E. M. Strength of elements with annular cross sections made of steel-fiber-reinforced concrete under one-time loads. *Materials Science*. 2017. Vol. 52, No. 4. P. 509–513. DOI: 10.1007/s11003-017-9983-z.
15. Бабич Є. М., Андрійчук О. В. Проєктування та виготовлення безнапірних труб із сталевібробетону : рекомендації. Луцьк : ЛНТУ, 2012. 32 с.
16. Андрійчук О. В., Ясюк І. М. Виготовлення придорожніх лотків водовідводу зі сталевібробетону. *Наукові нотатки: Луцький НТУ*, 2014. Вип. 45. С. 7–14.
17. Андрійчук О. В. Робота і розрахунок елементів кільцевого перерізу зі сталевібробетону при повторних навантаженнях : дис. канд. техн. наук : 05.23.01. Львів, 2011. 156 с.
18. Xue W., Chen J., Xie F., Feng B. Orientation of steel fibers in magnetically driven concrete and mortar. *Materials*. 2018. Vol. 11, No. 1. Art. 170. DOI: 10.3390/ma11010170.
19. Дворкін Л. Й., Ковальчук Т. В. Оптимізація складу високоміцного сталевібробетону. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2016. № 32. С. 45–54.
20. Korneeva I., Neutov S., Suriyaninov M. Experimental studies of fiber concrete creep. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. Art. 02021. 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/201711602021.
21. Сур'янінов М. Г., Неутов С. П., Корнеєва І. Б., Величко Д. В. Несуча здатність сталевібробетону з фіброю різного типу. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2020. № 2(49). С. 18–24. DOI: 10.31471/1993-9965-2020-2(49)-18-24.
22. Біденко І. Механічні характеристики сталевібробетону, армованого фіброю типу HE1050, за короткотривалого стиску. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Архітектура та будівництво*. 2023. Вип. 24. С. 65–73. DOI: 10.31734/architecture2023.24.065.
23. Yusof M. A., Norazman N., Ariffin A., Mohd Zain F., Risby R., Ng C. Normal strength steel fiber reinforced concrete subjected to explosive loading. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2011. Vol. 1, No. 2. P. 127–136.
24. Bowling J. Mechanical properties of carbon-fiber-reinforced concrete. *Advances in Civil Engineering Materials*. 2019. Vol. 8. Art. ID 20180089. DOI: 10.1520/ACEM20180089.
25. Ahmad J., González-Lezcano R. A., Majdi A., Ben Kahla N., Deifalla A. F., El-Shorbagy M. A. Glass fibers reinforced concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis. *Materials*. 2022. Vol. 15. Art. 5111. DOI: 10.3390/ma15155111.
26. Blazy J., Blazy R., Drobiec Ł. Glass fiber reinforced concrete as a durable and enhanced material for structural and architectural elements in smart city—a review. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 8. Art. 2754. DOI: 10.3390/ma15082754.
27. Bolat H., Şimşek O., Çullu M., Durmuş G., Can Ö. The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Composites: Part B*. 2014. Vol. 61. P. 191–198. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.01.043.
28. Chajec A., Sadowski Ł. The effect of steel and polypropylene fibers on the properties of horizontally formed concrete. *Materials*. 2020. Vol. 13. Art. 5827. DOI: 10.3390/ma13245827.

29. Memon I. A., Jhatial A. A., Sohu S., Lakhiar M. T., Hussain Z. Influence of fibre length on the behaviour of polypropylene fibre reinforced cement concrete. *Civil Engineering Journal*. 2018. Vol. 4, No. 9. P. 2138–2147. DOI: 10.28991/cej-03091144.
30. Hadiprama J., Abdul Samad A. A., Zhao Z. J., Mohammad N., Wirdawati W. Compressive strength of foamed concrete reinforced with polypropylene fibre. *Advanced Materials Research*. 2012. Vols. 488–489. P. 253–257. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.253.
31. Wang X., He J., Mosallam A. S., Li C., Xin H. The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC). *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Art. ID 7520549. 17 p. DOI: 10.1155/2019/7520549.
32. Behera G. C., Panda S., Kanda P. Effect of length of fibers on mechanical properties of normal strength concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 970. Art. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/970/1/012020.

References

- [1] V. Keras, M. Augonis, N. Adamukaitis, and E. Vaitekūnaitė, "Research of local compression concrete reinforced by steel fibers", *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, vol. 2, no. 11, pp. 72–78, 2015. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.11.2.12568>.
- [2] V.V. Zhytkovskyi and L. Y. Dvorkin, "Vplyv dyspersnoho armuvannia na vlastyvoli dorozhnikh betoniv, otrymanykh shliakhom vibropresuvannia nadzhorstkykh sumishei", *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*, no. 2(92), pp. 24–31, 2021. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.0.24>.
- [3] R. Kinash, V. Bilozir, and I. Bidenko, "Deformatyvnist i mitsnist dribnozernystoho stalefibrobetonu za osiovoho roztyahu", *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, no. 20, pp. 45–62, 2023. [Online]. Available: <https://files.znu.edu.ua/files/2024/STMRB/STMRB2023n20/STMRB2023n20.pdf> Accessed on: May 6, 2025.
- [4] D.S. Vijayan, A. Sivasuriyan, D. Parthiban, A. Jakimiuk, H. Bayat, A. Podlasek, M.D. Vaverková, and E. Koda, "A comprehensive analysis of the use of SFRC in structures and its current state of development in the construction industry", *Materials*, vol. 15, no. 19, 7012, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15197012>.
- [5] O.Yu. Doroshenko, "Bazaltove volokno yak komponent tsementobetonu", *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT*, no. 198, pp. 22–29, 2021. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256504>.
- [6] O. Yu. Doroshenko, "Vyvchennia vlastyvostei dribnozernystykh tsementobetoniv iz vykorystanniam plastyfikatoriv i bazaltovoho volokna", *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT*, no. 206, pp. 72–82, 2023. DOI: 10.18664/1994-7852.206.2023.296773.
- [7] A.A. Ramezaniapour, M. Esmaeili, S.A. Ghahari, and M. H. Najafi, "Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristics of concrete for application in sleepers", *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 411–418, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076.
- [8] R. Bagherzadeh, A.-H. Sadeghi, and M. Latifi, "Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete", *Textile Research Journal*, vol. 82, no. 1, pp. 88–96, 2011. DOI: 10.1177/0040517511420767.
- [9] U.D. Marushchak, M.A. Sanytskyi, and S.V. Korolko, "Nanomodyfikovani shvydkotverdnuhi betony, armovani dyspersnymi voloknami", *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Serii: Teoriia i praktyka budivnytstva, no. 877, pp. 137–143, 2017. [Online]. Available: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/44189>. Accessed on: May 6, 2025.
- [10] R. Breitenbücher, G. Meschke, F. Song, M. Hofmann, and Y. Zhan, "Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads", *FRC 2014 Joint ACI-fib Int. Workshop: Fiber Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications*, 2014, pp. 417–429.

- [11] O.V. Andriichuk, D.Ya. Kysliuk, and M.V. Ninichuk, "Vyznachennia nesuchoi zdatnosti normalnykh pereriziv kombinovano-armovanykh stalefibrobetonnykh zhynalnykh elementiv", *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, no. 13, pp. 13–23, 2020. DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2020-3(13)-02.
- [12] P. O. Awoyera, J. U. Effiong, O. B. Olalusi, K. P. Arunachalam, A. R. G. de Azevedo, F. R. B. Martinelli, and S. N. Monteiro, "Experimental findings and validation on torsional behavior of fiber-reinforced concrete beams: A review", *Polymers*, vol. 14, no. 6, 1171, 2022. DOI: 10.3390/polym14061171.
- [13] DSTU-N B V.2.6-218:2016. Nastanova z proektuvannia ta vyhotovlennia konstruksii z dyspersnoarmovanoho betonu, Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2016.
- [14] O.V. Andriichuk and E.M. Babych, "Strength of elements with annular cross sections made of steel-fiber-reinforced concrete under one-time loads", *Materials Science*, vol. 52, no. 4, pp. 509–513, 2017. DOI: 10.1007/s11003-017-9983-z.
- [15] E.M. Babych and O.V. Andriichuk, Proektuvannia ta vyhotovlennia beznapirnykh trub iz stalefibrobetonu: Rekomendatsii, Lutsk: LNTU, 2012, 32 p.
- [16] O.V. Andriichuk and I.M. Yasiuk, "Vyhotovlennia prydozhnikh lotkiv vodovidvodu zi stalefibrobetonu", *Naukovi notatky*, no. 45, pp. 7–14, 2014.
- [17] O.V. Andriichuk, Robota i rozrakhunok elementiv kil'tsevoho pererizu zi stalefibrobetonu pry povtornykh navantazhenniakh: dis. ... k-ta tekhn. nauk., 05.23.01, Lviv, 2011.
- [18] W. Xue, J. Chen, F. Xie, and B. Feng, "Orientation of steel fibers in magnetically driven concrete and mortar", *Materials*, vol. 11, no. 1, 170, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/1/170>. Accessed on: May 4, 2025.
- [19] L.J. Dvorkin and T.V. Kovalchuk, "Optyimizatsiia skladu vysokomitsnoho stalefibrobetonu", *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, no. 32, pp. 45–54, 2016.
- [20] I. Korneeva, S. Neutov, and M. Suriyaninov, "Experimental studies of fiber concrete creep", *MATEC Web of Conferences*, vol. 116, Art. no. 02021, 6 pp., 2017. doi: 10.1051/mateconf/201711602021.
- [21] M. H. Suriianinov, S. P. Neutov, I. B. Korneieva, and D. V. Velychko, "Nesucha zdatnist stalefibrobetonu z fibroi riznogo typu", *Naukovyi visnyk IFNTUNG*, no. 2(49), pp. 18–24, 2020. doi: 10.31471/1993-9965-2020-2(49)-18-24.
- [22] I. Bidenko, "Mekhanichni kharakterystyky stalefibrobetonu, armovanoho fibroi typu NE1050, za korotkotrivaloho stysku", *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu pryrodokorystuvannia. Serii: Arkhitektura ta budivnytstvo*, no. 24, pp. 65–73, 2023. doi: 10.31734/architecture2023.24.065.
- [23] M.A. Yusof, Norazman Ariffin, F.M. Zain Risby, and C.P. Ng, "Normal strength steel fiber reinforced concrete subjected to explosive loading", *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, vol. 1, no. 2, 2010.
- [24] J. Bowling, "Mechanical properties of carbon-fiber-reinforced concrete", *Advances in Civil Engineering Materials*, vol. 8, 20180089, 2019. DOI: 10.1520/ACEM20180089.
- [25] J. Ahmad, R. A. González-Lezcano, A. Majdi, N. Ben Kahla, A.F. Deifalla, and M.A. El-Shorbagy, "Glass fibers reinforced concrete: Overview on mechanical, durability and microstructure analysis", *Materials*, vol. 15, 5111, 2022. DOI: 10.3390/ma15155111.
- [26] J. Blazy, R. Blazy, and Ł. Drobiec, "Glass fiber reinforced concrete as a durable and enhanced material for structural and architectural elements in smart cities—A review", *Materials*, vol. 15, no. 8, 2754, 2022. DOI: 10.3390/ma15082754.
- [27] H. Bolat, O. Şimşek, M. Çullu, G. Durmuş, and Ö. Can, "The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete", *Composites: Part B*, vol. 61, pp. 191–198, 2014. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.01.043.
- [28] A. Chajec and Ł. Sadowski, "The effect of steel and polypropylene fibers on the properties of horizontally formed concrete", *Materials*, vol. 13, art. 5827, 2020. DOI: 10.3390/ma13245827.
- [29] I. A. Memon, A. A. Jhatial, S. Sohu, M. T. Lakhari, and Z. Hussain, "Influence of fibre length on the behaviour of polypropylene fibre reinforced cement concrete", *Civil*

- Engineering Journal*, vol. 4, no. 9, pp. 2138–2147, 2018. DOI: 10.28991/cej-03091144.
- [30] J. Hadiprama, A.A. Abdul Samad, Z.J. Zhao, N. Mohammad, and W. Wirdawati, "Compressive strength of foamed concrete reinforced with polypropylene fibre", *Advanced Materials Research*, vols. 488–489, pp. 253–257, 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.253.
- [31] X. Wang, J. He, A. S. Mosallam, C. Li, and H. Xin, "The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC)", *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 7520549, 17 pp., 2019. DOI: 10.1155/2019/7520549.
- [32] G. C. Behera, S. Panda, and P. Kanda, "Effect of length of fibers on mechanical properties of normal strength concrete", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 970, 012020, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/970/1/012020.

EFFECT OF DISPERSED REINFORCEMENT ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE: A REVIEW

¹Andriichuk O.V., Ph.D., Associate Professor,
o.andriichuk@lntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6275-097X
¹Hromov D.Y., postgraduate,
hromov.d2711@lntu.edu.ua, ORCID: 0009-0006-7862-6662
¹Lutsk National Technical University
Lvivska St., 75, Lutsk, 43018, Ukraine

Abstract. Modern service conditions of concrete structures impose increasingly stringent requirements on their physico-mechanical properties, including strength, crack resistance, impact toughness, and wear resistance, as well as durability under aggressive environmental exposure. A promising approach to improving the serviceability and operational reliability of concrete structures is the use of dispersed reinforcement, which involves the uniform distribution of short fibers within the concrete matrix. This approach reduces crack width and limits crack propagation, increases fracture energy, improves stress redistribution, and ensures reliable performance under dynamic and impact loading.

This paper presents a review of domestic and international studies on the influence of different types of fibers, such as steel, polymer, basalt, glass, and carbon on the main strength characteristics of concrete, including compressive strength, axial tensile strength, flexural tensile strength, and resistance to impact loading, as well as on durability-related properties such as water impermeability, frost resistance, and chemical resistance. It is shown that the effectiveness of dispersed reinforcement is largely determined by fiber geometry and mechanical properties, loading conditions, service environment, fiber orientation, and the quality of the bond between fibers and the cement matrix. Experimental results on the application of fiber-reinforced concrete in road infrastructure elements (drainage channels, gravity pipes, and shell structures), railway sleepers, and structures with enhanced blast resistance are summarized.

Particular attention is given to the combined use of dispersed and conventional reinforcement to improve load-bearing capacity and optimize the dimensions of structural elements. The prospects for integrating dispersed reinforcement with a nanomodified cement matrix, characterized by an improved microstructure, enhanced crack resistance, and accelerated hardening, are also discussed.

Keywords: fiber-reinforced concrete, dispersed reinforcement, physical and mechanical properties, crack resistance, durability, dynamic loading.

Стаття надійшла до редакції 2.12.2025
Стаття прийнята до друку 15.02.2026
Дата публікації статті 20.03.2026

This work © 2026 by Андрійчук О.В., Громов Д.Ю. is licensed under CC BY 4.0