

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІБРОБЕТОННУ ЗА ДІЇ АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА

EXPERIMENTAL RESEARCH FIBER REINFORCED CONCRETE UNDER THE AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT INFLUENCE

Поліщук О.М., аспірант, ORCID 0009-0003-5700-8679, **Зятюк Ю.Ю.,** к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-3831-6599 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне).

Polischuk O.M., postgraduate student, ORCID 0009-0003-5700-8679, **Ziatiuk Y.Y.,** candidate of technical sciences, associate professor ORCID 0000-0003-3831-6599, (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne).

Цементобетонні дорожні покриття є одним із найефективніших рішень для забезпечення високої несучої здатності, довговічності та експлуатаційної надійності автодоріг. Наведена методика дослідження матеріалів, що застосовуються в дорожньому будівництві. Представлено досвід застосування жорстких дорожніх одягів в розвинених країнах Європи та США. Проаналізовано доцільність застосування фібробетону в дорожньому будівництві при влаштуванні цементо-бетонного покриття і безперервного армування основ.

The initial costs of constructing concrete pavement for road surfaces are higher — approximately 70–80% more compared to asphalt pavement. However, after just 8 years of operation, the total expenses for both types of pavement become comparable. Cement concrete road pavements are among the most effective solutions for ensuring high load-bearing capacity, durability, and operational reliability of highways. The relevance of enhancing these characteristics is driven by the increasing traffic intensity, greater dynamic impacts, and rising axle loads from heavy-duty vehicles. A methodology research of materials which are used in highway building. Experience of application is presented hard highway coverage in the developed countries of Europe and USA. Expedience of fiberconcrete application is analysed in highway building at arranging of cement-concrete coverage and bases trouble-free reinforcement. The combined use of steel and polymer fiber is a promising direction in construction, enabling the creation of durable, strong, and wear-resistant structures. Research in this field will help optimize the composition of fiber-reinforced concrete for various operating conditions. Fiber-reinforced concrete (FRC) demonstrates improved resistance to aggressive environmental impacts, such as chemical exposure, freeze-thaw cycles, and mechanical abrasion. However, prolonged contact with fuels, oils, de-icing salts, or acidic substances can still degrade the matrix

and reduce the bonding efficiency between the fibers and the cement paste, especially if not properly protected or formulated.

Ключові слова:

Фібробетон, автомобільні дороги, аеродроми, фібра, високоефективні матеріали.

Fiber reinforced concrete, roads, airports, fiber, highly effective materials.

Вступ. Початкові витрати на влаштування бетонного покриття дорожнього одягу є вищими — орієнтовно на 70–80% у порівнянні з асфальтовим, хоча уже через 8 років експлуатації загальні витрати на обидва типи покриття зрівнюються. Надалі цементобетонна дорога демонструє економічну перевагу завдяки значно нижчим витратам на утримання, адже в перші 10–12 років майже не потребує ремонту, на відміну від асфальтового покриття, яке потребує регулярного обслуговування вже через 3–4 роки [1].

Цементобетонні дорожні покриття є одним із найефективніших рішень для забезпечення високої несучої здатності, довговічності та експлуатаційної надійності автодоріг. Підвищення цих характеристик зумовлена зростанням інтенсивності руху, збільшенням динамічних впливів та осьових навантажень від великовагового транспорту, які в сучасних умовах часто перевищують 115 кН. Завдяки вищому модулю пружності порівняно з асфальтобетonom, цементобетонні конструкції ефективніше розподіляють навантаження на основу, що сприяє зниженню деформацій дорожнього одягу [2].

Для забезпечення цілісності та довговічності цементобетонного покриття важливим елементом конструкції є правильно влаштовані температурно-усадкові шви. Ці шви дозволяють локалізувати напруження та компенсувати температурні і усадкові деформації. Для передачі навантаження між суміжними плитами у шви вмонтовують металеві закладні елементи, які забезпечують безперервність конструкції без втрати її несучої здатності.

Аналіз останніх досліджень. Сполучені Штати Америки мають значну кількість доріг із жорстким цементобетонним покриттям. Зокрема, понад 55 000 миль (близько 88 500 км) американських автомагістралей мають бетонне покриття. Приблизно 60% міжштатної системи США було побудовано з використанням бетону. Однак, загалом у США жорсткі покриття складають близько 6% усіх асфальтованих доріг, тоді як решта 94% мають не жорстке покриття [3].

У країнах Європи цементобетонні дорожні покриття широко використовуються на найбільш відповідальних ділянках автомагістралей та інших важливих інфраструктурних об'єктах. Такі покриття застосовуються завдяки їхній високій зносостійкості, довговічності та стійкості до деформацій, що особливо важливо для ділянок із великим транспортним навантаженням. У Нідерландах бетонні покриття використовуються для автомагістралей, зокрема на трасах А50 між Осом та Ейндховеном, А5 біля Схіпхола та А73 між Венло та Маасбрахтом [4].

У Німеччині бетонні покриття активно застосовуються на автобанах, де вони зазвичай укладаються методом ковзної опалубки як правило, поверх основи. Товщина цих покриттів варіюється з 22 см (9 дюймів) до 24-26 см (9,5-10 дюймів). Щоб контролювати утворення тріщин і для зняття напружень у плитах, ці покриття розділені швами (деформаційними, температурними, конструктивними) на плити довжиною 5 м (16,5 футів) і шириною 4,25 м (14 футів) [5].

У Барселоні, Іспанія жорстке дорожнє покриття було влаштовано на відрізу автошляху, що проходить поблизу Les Masies de Voltregà та перехрестя з дорогою BV-4655. Ця ділянка має протяжність близько одного кілометра та включає як відкриті зони, так і тунельні ділянки. Проїзна частина складається з двох смуг руху шириною по 3,5 метра, внутрішнього узбіччя завширшки 1 метр і зовнішнього — 2,5 метра. Конструкція покриття передбачає укладання 25-сантиметрового шару цементобетону на основу з 25 см стабілізованого цементом матеріалу, що забезпечує необхідну міцність та довговічність дорожнього одягу [6].

У той час як у Німеччині частка цементобетонних доріг становить 42% від загальної протяжності, у Чехії — 22%, у Бельгії — 17%, в Україні вона не перевищує 2%. Така статистика свідчить про широке визнання ефективності бетонних доріг у розвинених країнах.

Сучасні конструкції та технології улаштування цементобетонного дорожнього покриття в Україні значною мірою сформувалися під впливом європейського досвіду, зокрема через сферу аеродромного будівництва. Першим масштабним прикладом адаптації таких рішень стала реконструкція злітно-посадкової смуги №1 Міжнародного аеропорту «Бориспіль» у 2001 році. Під час реалізації цього проекту було використано конструктивні рішення аеродромного покриття та технології, запозичені з практики Німеччини, що заклало підґрунтя для подальшого впровадження цементобетонних рішень у дорожньому будівництві України.

Найвідоміша цементно-бетонна дорога в Україні — це автомобільна дорога міжнародного значення «Варшавка» довжиною 487 кілометрів. Вона з'єднує Київ—Ковель та контрольно-пропускний пункт «Яготин». Цементобетонні ділянки доріг вже побудовано на трасі Н-31 в напрямку від Дніпра до Києва (80 км); на трасі Н-14 Кропивницький-Миколаїв (75 км) та на трасі М-06 в обхід Житомира (22 км). В Полтавській області будується — Н-31 Дніпро — Царичанка — Кобеляки — Решетилівка [7].

Станом на вересень 2024 року, за даними Укравтодору, частка цементобетонних доріг в Україні становить лише 1,4% від загальної протяжності автомобільних шляхів. Це свідчить про початковий етап розвитку будівництва доріг з цементобетонним покриттям у країні. У рамках Програми розвитку цементобетонних доріг, презентованої Укравтодором, передбачено збільшення цієї частки до 30% до 2040 року. За попередніми розрахунками, проєкт коштуватиме 95,5 млрд гривень. Очікується, що кожна

гривня, вкладена в будівництво бетонних доріг, залучатиме в шість разів більше додаткових коштів у суміжні галузі, що сприятиме зростанню ВВП країни [8].

В Україні до повномасштабного вторгнення було заплановано забудувати близько 200 км цементобетонних доріг. Здебільшого їх планували звести на півдні країни. Цементобетонні дороги планували будувати у порти, де високий трафік великовагового транспорту. Їх потрібно будувати на півдні, оскільки у спеку вони краще витримують перевантаження та високі температури [9].

До найнавантажениших та функціонально відповідальних зон автомобільних доріг, які піддаються інтенсивному впливу транспорту, належать з'їзди з магістралей, ділянки технічних зупинок, посадкові майданчики громадського транспорту, вузли дорожніх розв'язок, перехрестя, а також пересічення з трамвайними, залізничними колями. Для улаштування покриттів у зазначених зонах доцільно застосовувати високоміцні бетони з дисперсним армуванням, зокрема із додаванням сталеві фібри, що забезпечує підвищену тріщиностійкість та довговічність конструкцій [10].

Комбінований фібробетон – це сучасний будівельний матеріал, що поєднує традиційний бетон із волокнами (металевими, полімерними, базальтовими тощо), що забезпечує підвищену міцність, тріщиностійкість та довговічність. Умови агресивного середовища, такі як вплив кислот, лугів або соляних розчинів, можуть значно впливати на характеристики матеріалу, тому необхідно досліджувати його стійкість.

Дослідження властивостей, технологій та застосування фібробетону проводили багато провідних вчених і фахівців у галузі будівельних матеріалів, цивільному промисловому та дорожньому будівництві, серед них можна виділити: О.В. Андрійчука, А.Б. Голишева, Б.А. Боярчука, Є.М. Бабича, Л.Й. Дворкіна, Т.В. Ковальчука, С.О. Кроквякова, Д.О. Кіріченко, Г.В. Гетуна, А.Я. Барашикова, О.П. Сунака, М.Г. Сур'янінова, І.М. Ясюка та багато інших дослідників.

Серед проведених досліджень фібробетонів можна виділити [11]. Були проведені експериментальні дослідження сталеві фібробетону на зразках 100x100x100 мм. При цьому варіювався відсоток дисперсного армування. Результати показали, що оптимальними характеристиками фібробетонної суміші є матриця з крупним заповнювачем фракції ≤ 10 мм при 1,0 % фібрового армування [12, 13, 14, 15].

Мета і завдання дослідження отримати дані про роботу фібробетонних зразків одночасно армованих сталеві фібрами та поліпропіленові фібрами з урахуванням дії агресивного впливу. Встановити вплив агресивного середовища на міцність полідисперсноармованих фібробетонних зразків з врахуванням їх роботи за дії навантаження.

Товарний портландцемент Здолбунівського ПАТ “Волинь-цемент” ПЦ-1 марки 500, пісок з родовищ Славутського р-ну Хмельницької обл., гранітний

щєбінь фракції 5-10 мм Вирівського кар'єру Рівненської області. В якості дисперсних армуючих волокон для отримання фібробетонів використовувалась сталєва та поліпропіленова фібра. Сталєва фібра анкерна довжиною 50 мм і діаметром 1 мм, поліпропіленові волокна довжиною 20 мм

Для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів і проведення експерименту виготовлено дослідні зразки а саме: 26 кубів розмірами 10х10х10см, 8 призм розмірами 10х10х40см. Всі контрольні куби та призми виготовлялися із бетону класу С20/25 складу Ц:Щ:П=1:3,72:2,30 при В/Ц=0,35.

За даними випробувань середнє значення міцності на стик становить $R_{cm}=50$ МПа, а коефіцієнт варіацій $C_v=12,5\%$. За легковкладальністю фібробетон відносився до марки Ж1. Вміст повітря, для забезпечення морозостійкості за маркою F 200 від 5 до 6%.

Суміш підібрана відповідно до ДСТУ Б В.2.7-215 і становила на 1 м³:

- портландцемент ПЦ М 500 Д0 Ц – 440 кг;
- щєбінь гранітний (фр. 5 -10) Щ – 1300 кг;
- пісок середній з Мк 2,9 – П – 560 кг;
- Добавки: Пластифікатор – < 2 кг;
- Повітровтягувальна – 0,8 кг;
- Фібра сталєва анкерна – 0,75%.

Бетонування призм і кубів здійснювали у заздалегідь підготовленій металевій інвентарній опалубці, наявній у дослідній лабораторії. Ущільнення бетонної суміші в формах виконували за допомогою вібростолу. Розпалублення зразків проводили на п'яту добу після укладання.

Перша серія дослідіу, полягає у випробовуванні на корозійну стійкість бетону та сталєфібробетону на кубічних зразках розміром 10 × 10 × 10 мм шляхом порівняння їхньої міцності на стиск після 28 днів тверднення в стандартних умовах та після впливу агресивного середовища.

Друга серія дослідіу, полягає у випробовуванні на корозійну стійкість бетону та полімербетону на кубічних зразках розміром 10 × 10 × 10 мм шляхом порівняння їхньої міцності на стиск після 28 днів тверднення в стандартних умовах та після впливу агресивного середовища.

Третя серія дослідіу полягає у випробовуванні на корозійну стійкість комбінованого сталє та полімер бетону на кубічних зразках розміром 10 × 10 × 10 мм шляхом порівняння їхньої міцності на стиск після 28 днів тверднення в стандартних умовах та після впливу агресивного середовища

Поєднання візуальних спостережень з механічними випробуваннями дає змогу комплексно оцінити поведінку бетону під впливом агресивних чинників. Такий підхід дозволяє не лише кількісно визначити зміну міцності, але й візуально простежити процес корозійного розтріскування [16].

Для моделювання різних типів корозії використовували такі розчини:

- 5% HCl — для імітації кислотної корозії;
- 5% NaCl — для імітації сольового впливу;

- 5% Na_2SO_4 — для сульфатного впливу.

Головним показником стійкості бетону до корозії виступає відсоткова зміна його міцності на стиск.

Таблиця 1

Втрата міцності сталевібробетону та бетону			
Тип середовища	Вид бетону	Метод випробування при моделюванні різних типів корозії	Втрата міцності через 90 днів (%)
Луг (NaOH)	Звичайний бетон	Занурення в 5% розчин NaOH	~7%
	Сталевібробетон	Те ж саме	~4%
Сіль (NaCl)	Звичайний бетон	Цикли заморожування/відтавання у 5% розчині NaCl	~30%
	Сталевібробетон	Те ж саме	~20%
Кислота (H_2SO_4)	Звичайний бетон	Постійне занурення в 5% розчин H_2SO_4	~70%
	Сталевібробетон	Те ж саме	~50%

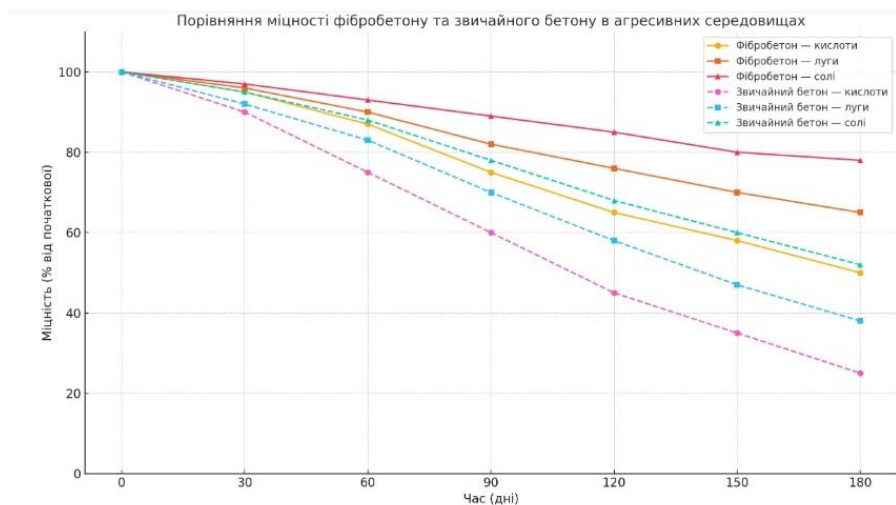


Рис. 1. Графічна залежність міцності сталевібробетону та бетону

Висновок. Фібробетон (СФБ) демонструє вищу корозійну стійкість до різних агресивних середовищ, зокрема кислот, у порівнянні з бетоном без фібри. Експериментальні результати показали, що додавання сталевібробетону підвищує корозійну стійкість бетону. Звичайний бетон під дією кислот — вже через 90 днів втрачає до 70% міцності. Фібра збільшує зону контакту між цементним каменем, фіброю та заповнювачем, підвищуючи щільність

цементного каменю. Завдяки цьому сповільнюється проникнення агресивних речовин у глибину зразків

Полідисперсноармоване застосування металевої та полімерної фібри – це перспективний напрямок у будівництві, що дозволяє створювати довговічні, міцні та зносостійкі конструкції. Дослідження в цій галузі допоможуть оптимізувати склад фібробетону для різних умов експлуатації.

1. Навіщо в Україні будувати бетонні дороги. URL: <http://www.mashyna.com.ua/auto/article/11161> (дата звернення: 10.03.2025).

Navishcho v Ukrayini buduvaty betonni dorohy. URL: <http://www.mashyna.com.ua/auto/article/11161> (date of application: 10.03.2025).

2. Andriy Mishutin, Zeljko Kos, Iryna Grynyova, Lucia Chintea. Durability of modified fiber concrete for rigid pavements. Croatian Regional Development Journal. 2021. Vol. 2, № 1. P. 30–40.

3. Concrete pavements technology keeps America moving URL: <https://www.polygongroup.com/en-US/blog/concrete-pavement-technology-keeps-america-moving/> (date of application: 10.03.2025).

4. James D. Growe, Sanford P. Lahue. Portland cement concrete pavement construction. *Integrated materials and construction practices for concrete pavements*. 2000. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/millennium/00092.pdf>

5. “Concrete in infrastructure: an excellent match” by Wim Kramer URL: <https://www.eupave.eu/concrete-in-infrastructure-an-excellent-match-from-wim-kramer/> (дата звернення: 10.03.2025).

6. Concrete road surface makes a comeback in Spain. URL: <https://www.fccco.com/en/-/el-ministro-de-fomento-visita-las-obras-del-tramo-las-duenas-muros-que-construye-fcc> (дата звернення: 10.03.2025).

7. Гамеляк І.І. Нові перспективи дорожнього цементобетону на Україні URL: <https://nadu.com.ua/novi-perspektivi-dorozhnogo-cementobetonu-na-ukra%D1%97ni/> (дата звернення: 10.03.2025).

Hamelyak I.P. Novi perspektyvy dorozhn'oho tsementobetonu na Ukrayini URL: <https://nadu.com.ua/novi-perspektivi-dorozhnogo-cementobetonu-na-ukra%D1%97ni/> (date of application: 10.03.2025).

8. 30% цементобетонних доріг за 20 років: як бізнес та влада планують «зшити Україну» за допомогою бетонних доріг URL: <https://ukrcement.com.ua/dokumentatsiya/betonni-dorogi/600-post-reлиз-prezentatsii-prohramy-rozvytku-tsementobetonnykh-dorih-v-ukraini.html> (дата звернення: 10.03.2025).

30% tsementobetonnykh dorih za 20 rokiv: yak biznes ta vlada planuyut' «zshyty Ukrainu» za dopomohoyu betonnykh dorih URL: <https://ukrcement.com.ua/dokumentatsiya/betonni-dorogi/600-post-reлиз-prezentatsii-prohramy-rozvytku-tsementobetonnykh-dorih-v-ukraini.html> (date of application: 10.03.2025).

9. Більш стійкі до зношування: в Україні збудують близько 200 км цементобетонних доріг URL: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/suspilstvo/20211210-bilsh-stijki-do-znoshuvannya-v-ukrayini-zbuduyut-blyzko-200-km-cementobetonnyh-dorog/> (дата звернення: 10.03.2025).

10. Zainab A. Al-Kaissi, Ahmed Saheb Daib, Rusul Raed Abdull-Hussain. Experimental and numerical analysis of steel fiber reinforced concrete pavement. Journal of engineering and sustainable development. 2016. Vol. 20. P. 135–155.

11. Сур'янінов М.Г. Кіріченко Д.О. Корнеєва І.Б. Неутов С.П. Влияние типа фибры на прочность фибробетона при осевом растяжении. Міжнародна науково-технічна конференція «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій». Одеса, 2021. С. 60-65.

Sur"yaninov M.H. Kirichenko D.O. Korneyeva I.B. Neutov S.P. Vlyyanye typu fybry na prochnost' fyfrobetona pry osevom rastyazhenyy. Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiya «Strukturoutvorenniya ta ruynuvannya kompozysinykh budivel'nykh materialiv ta konstruksiy». Odessa, 2021. S. 60-65.

12. Дробишинець С.Я., Киричук М.В. Перспективи використання сталевібробетону в дорожньому будівництві. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2017. № 6. С. 90–98.

Drobyshtynets' S.Y.A., Kyrychuk M.V. Perspektyvy vykorystannya stalefibrobetonu v dorozhn'omu budivnytstvi. Suchasni tekhnolohiyi ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. 2017. № 6. S. 90–98.

13. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Є.М. Бабич, В.В. Житковський, О.М. Бордюженко, С.В. Філіпчук, Д.В. Кочкар'ов, І.В. Ковалик, Т.В. Ковальчук, М.М. Скрипник // Рівне: НУВГП.– 2017. – 331 с.

Dvorkin L.Y. Vysokomitsni shvydkotverdnuchi betony ta fibrobetony: monohrafiya / YE.M. Babych, V.V. Zhytkovs'kyu, O.M. Bordyuzhenko, S.V. Filipchuk, D.V. Kochkar'ov, I.V. Kovalyk, T.V. Koval'chuk, M.M. Skrypnyk // Rivne: NUVHP.– 2017. – 331 s.

14. Зятюк Ю.Ю., Борисюк О.П., Фурсович М.О., Попович П.П. Переваги використання сталевібробетону в дорожньому будівництві. Scientific foundations of solving engineering tasks and problems: collective monograph / International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2021. 160-168p.

Ziatyuk Y.Y., Borysyuk O.P., Fursovych M.O., Popovych P.P. Perevahy vykorystannya stalefibrobetonu v dorozhn'omu budivnytstvi. Scientific foundations of solving engineering tasks and problems: collective monograph / International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2021. 160-168r.

15. Дворкін Л.Й. Стійкість бетону до температурно-вологісних впливів: навчальний посібник.-Київ: Каравела, 2023. 180с.

Dvorkin L.Y. Stiykist' betonu do temperaturno-volohisnykh vplyviv: navchal'nyy posibnyk.-Kyuyiv: Karavela, 2023. 180s.

16. Толмачов, С.М. Розвиток теорії руйнування і стійкості дорожніх цементних бетонів при дії агресивних факторів: автореф. дис. . д-ра техн. наук : 05.23.05 / Толмачов Сергій Миколайович ; Укр. держ. акад. залізн. трансп. - Харків, 2013. - 43 с.

Tolmachov, S.M. Rozvytok teorii ruynuvannya i stiykosti dorozhnykh tsementnykh betoniv pry diyi ahresyvnykh faktoriv: avtoref. dys. . d-ra tekhn. nauk : 05.23.05 / Tolmachov Serhiy Mykolayovych ; Ukr. derzh. akad. zalizn. transp. - Kharkiv, 2013. - 43 s.