

УДК 624.012

ВПЛИВ ВІДСОТКУ ДИСПЕРСНОГО ЛОКАЛЬНОГО АРМУВАННЯ СТАЛЕВОЮ ФІБРОЮ НА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ І ШИРИНУ РОЗКРИТТЯ ТРІЩИН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

EFFECT OF THE DISCRETE LOCAL REINFORCEMENT PERCENTAGE STEEL FIBER CONTENT ON CRACK RESISTANCE AND CRACK WIDTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Масюк Г.Х. к.т.н., проф., ORCID ID: 0000-0001-5207-3111; **Бабич В.Є. к.т.н., доц.,** ORCID ID: 0000-0001-8334-8827; **Мельничук С. М. аспірант,** ORCID ID: 0009-0005-6631-3936; **Музичук М.В., магістр** (Національний університет водного господарства та природокористування).

Masyuk G.H. k.t.n., prof., ORCID ID: 0000-0001-5207-3111; **Babich V.E. k.t.n., assoc. prof.,** ORCID ID: 0000-0001-8334-8827; **Melnychuk S. M. post-graduate student,** ORCID ID: 0009-0005-6631-3936; **Muzychuk M.V., master's student** (National University of Water Management and Nature Management).

На основі проведених експериментальних досліджень наведені результати впливу відсотків локального армування сталевую фібрую розтягнутої зони залізобетонних балок на їх тріщиностійкість і ширину розкриття тріщин. Розкрити природу впливу локального дисперсного армування на вище вказані досліджувані параметри залізобетонних балок.

Based on the conducted experimental studies, the results of the influence of the percentage of local reinforcement with steel fiber of the tension zone of reinforced concrete beams on their crack resistance and crack opening width are presented. The nature of the influence of local dispersed reinforcement on the above-mentioned parameters of reinforced concrete beams under study is revealed.

The increase in crack resistance in beams using dispersed reinforcement was achieved due to the fact that the stiffness in their lower part was greater than in beams without local dispersed reinforcement. As was previously established in the testing of cubes and prisms, the physical and mechanical characteristics of samples using dispersed reinforcement are slightly higher than those of pure concrete samples, especially tensile strength. In addition, the density of fine-grained concrete reinforced with steel fiber is higher than that of pure concrete,

which means that the grafting of longitudinal reinforcement will be greater. All these factors contribute to the increase in crack resistance and the reduction in the width of crack opening in beams using local dispersed reinforcement. These indicators changed with an increase of up to one percent. As indicated in the conclusions, the difference in the load of crack initiation and the width of opening in the studied beams is significant.

Ключові слова: залізобетонні балки, згинальні елементи, дисперсне локальне фіброве армування, тріщиностійкість, ширина розкриття тріщин
reinforced concrete beams, bending elements, dispersed local fiber reinforcement, crack resistance, crack opening width.

Вступ. Світова практика в будівельній галузі справедливо вважає, що залізобетон є найбільш ефективним матеріалом при використанні прогінних конструкцій для зведення будівель і інженерних споруд. Сучасний розвиток виробництва вимагає постійного вдосконалення методів розрахунку і проектування залізобетонних конструкцій, спрямованих на забезпечення їх надійності в роботі і довговічності в процесі експлуатації при одночасному зниженні матеріалоемності.

Основним недоліком залізобетонних конструкцій є те, що в процесі їх експлуатації виникають тріщини в розтягнутій зоні від діючих зусиль. Це погіршує їх роботу і знижує довговічність, особливо при експлуатації в агресивних середовищах. Для досягнення збільшення міцності бетону на розтяг в згинальних елементах, в розтягнутій зоні нижній шар бетону армується сталевією фіброю. Завдяки локальному армуванню сталевими фібрами, в конструкціях, що працюють на розтяг і згин, суттєво збільшується міцність на розтяг, підвищується тріщиностійкість, зменшується ширина розкриття тріщин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження сталевієфібробетону (SFRC) в будівельній галузі стало предметом уваги багатьох як вітчизняних, так і зарубіжних вчених. Було проведено досить багато важливих експериментально-теоретичних досліджень і отримано велику кількість даних, що описують основні фізико-механічні властивості фібробетону.

Міцність сталевієфібробетону (SFRC) на розтяг є однією з його ключових характеристик, яка забезпечує перехід матеріалу від крихкого руйнування до в'язкого, завдяки здатності фібрових волокон стримувати розвиток розкриття тріщин [1,2,3,5,6,7] в розтягнутих зонах згинальних елементів.

В роботах [1,4,5,6,7] досліджується вплив дисперсного армування сталевією фібрами на експлуатаційні характеристики залізобетонних балок. Автори аналізують, як саме різний тип сталевієї фібри: пряма, анкерна та хвиляста, впливають на стійкість залізобетонних конструкцій до тріщиноутворення, на пластичність і міцність на розтяг та згин.

Дослідження присвячені роботі залізобетонних балок під дією статичних [1,4,6,7] навантажень та повторних малоциклових навантажень [1], а в роботі [4] досліджуються залізобетонні балки та плити армовані різним відсотком сталеві фібри від 0,5% до 3%. Авторами доведено що, відсоток армування сталевими фібрами впливає на характер тріщиноутворення залізобетонних згинальних елементів, а саме: тріщини виникають частіше [1,4,5,6], але ширина розкриття їх менша до 30%, на 15-30% підвищується міцність на вигин [1,5,6], суттєво підвищується жорсткість [1,5,6] на 9-25%, зменшується приріст прогинів [1,5,6,8] до 20%, ударна в'язкість зростає практично в два рази [4], оптимальний відсоток фібрового армування складає $\mu_f = 1\%$ [1,5,6], а в роботі [6] $\mu_f = 2\%$.

Постановка мети і задачі досліджень. Метою роботи є експериментально дослідити вплив відсотку локального армування сталевію фіброю бетону на процеси тріщиноутворення в залізобетонних балках за дії короткочасного одноразового статичного навантаження шляхом експериментальних випробувань.

Для досягнення поставленої мети визначено основні такі задачі:

- розробити конструкцію та виготовити дослідні зразки-балки з використанням різного відсотку локального дисперсного армування;
- встановити особливості тріщиностійкості та процеси тріщиноутворення в однопротітній залізобетонній балці з використанням відсотку локального дисперсного армування в нижній зоні за результатами експериментальних досліджень та аналізу отриманих даних.

Методика досліджень. Балки випробовувались на дію статичного навантаження в спеціальній установці. Навантаження на балку прикладалось у вигляді двох зосереджених сил в місцях $1/3$ прольоту, на віддалі 600 мм від опор. Зусилля створювались за допомогою гідравлічного домкрату пляшкового типу Intertool GT0025 на 10т і передавались на металеву траверсу довжиною 600 мм, яка в свою чергу, передавала навантаження на балку. Сила навантаження вимірювалась попередньо протарованим кільцевим динамометром. Точність вимірювання навантаження становила 0,05% (ціна поділки кільцевого динамометра $0,001 = 37,5$ кг).

Навантаження на балку здійснювалось ступенями, величина яких складала 7% (3 кН) від руйнівного навантаження. Після кожного ступеня навантаження здійснювалась витримка 10-15 хвилин, під час якої знімались та записувались в журнал досліджень покази з усіх вимірювальних приладів (див. фото 1), також здійснювався візуальний огляд поверхонь дослідного зразка, фіксувались процеси утворення та розвитку тріщин, вимірювалась ширина розкриття тріщин.

Конструкція зразків і матеріали: Дослідні зразки всіх серій залізобетонних балок виготовлялися з дрібнозернистого бетону класу C25/30 довжиною $l = 2000$ мм з поперечним перерізом $b \times h = 100 \times 200$ мм. Армування здійснювалося одним стержнем робочої арматури класу A500C діаметром 12

мм, плоскими каркасами з поперечною і монтажною арматурою класу В500

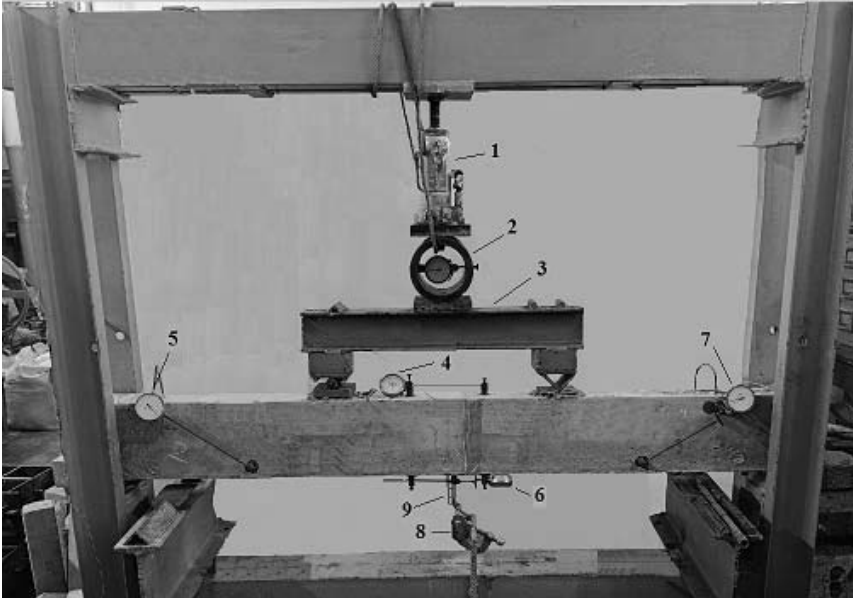


Фото 1. Установка для випробування однопротітних залізобетонних балок.
1 - гідравлічний домкрат пляшкового типу на 10т; 2- кільцевий протарований динамометр; 3 – металева траверса довжиною 600 мм; 4, 5, 6, 7 – індикатори годинникового типу; 8 – прогиномір; 9 – тензомер Гугенбергера.

діаметром 5 мм. Локальне дисперсне армування нижньої зони балки висотою 100 мм здійснювалося сталеву анкерною фіброю з такими геометричними характеристиками: діаметр $d_f = 1$ мм, довжина $l_f = 50$ мм. Дослідні зразки виготовлених залізобетонних балок маркувалися так:

- Б-1.1 – залізобетонні балки без фібрового армування;
- Б-1.2 – залізобетонні балки з 0,5% фібрового армування;
- Б-1.3 – залізобетонні балки з 1% фібрового армування.

Для встановлення фізико-механічних властивостей виготовлялись куби та призми з вищевказаних матеріалів з відповідними випробуваннями.

Результати досліджень: При випробуванні серії балок Б-1.1 на 3-4 ступенях утворились нормальні тріщини в розтягнутій зоні балок при навантаженнях 9 кН та 12 кН. Тріщини утворилися під силою в зоні чистого згину шириною $W_k = 0,04$ та $W_k = 0,06$ мм відповідно. На наступній ступені навантаження $F = 15$ кН ширина розкриття тріщин становила $W_k = 0,1$ мм, а також появилися інші волосяні тріщини в зоні чистого згину. При наступних ступенях навантаження тріщини розкривалися, глибина їх збільшувалась. На 9-ій ступені навантаження (орієнтовна величини характеристичного

навантаження) $F = 27$ кН ширина магістральної тріщини складала $W_k = 0,2$ мм. Також при навантаженні $F = 15$ кН появилася похила тріщина шириною $W_k = 0,06$ мм. При подальшому навантаженні утворилася похила тріщина і біля другої опори. Ширина нормальних тріщин перед руйнуванням балки була $W_k = 0,5$ мм. Балки серії Б-1.1 зруйнувалися при середньому зусиллі $F = 45$ кН внаслідок текучості арматури.

Для балок серії Б-1.2 та Б-1.3 були прийняті такі ж самі ступені навантаження з кроком 3 кН. В балках серії Б-1.2 перші нормальні тріщини почали утворюватися на 5-ій ступені навантаження при $F = 15$ кН в зоні чистого згину. Ширина їх розкриття становила $W_k = 0,05$ мм. При подальшому збільшенні навантаження тріщини розкривалися, глибина проникнення їх збільшувалася, крім того почали з'являтися нові нормальні тріщини. На 9-ій ступені при навантаженні $F = 27$ кН ширина розкриття магістральної тріщини складала $W_k = 0,14$ мм. На 11-ій ступені при навантаженні $F = 33$ кН утворилася похила тріщина $W_k = 0,05$ мм. При подальшому збільшенні навантаження до руйнівного ширина розкриття тріщин збільшувалася і перед руйнуванням складала $W_k = 0,28$ мм. Балки серії Б-1.2 також зруйнувалися при середньому зусиллі $F = 45$ кН внаслідок текучості арматури.

При випробуванні балок серії Б-1.3 були отримані наступні результати: перші нормальні тріщини в зоні чистого згину появились при навантаженні $F = 21$ кН ширина яких складала $W_k = 0,05$ мм. При навантаженні $F = 27$ кН ширина нормальних тріщин становила $W_k = 0,1$ мм. Подальше збільшення навантаження спричинило подальший розвиток існуючих тріщин і появу нових. При навантаженні $F = 36$ кН утворилися похилі тріщини шириною $W_k = 0,04$ мм. Перед руйнуванням ширина розкриття нормальних магістральних тріщин становила $W_k = 0,24$ мм. Балки серії Б-1.3 зруйнувалися аналогічно балкам серії Б-1.1 та Б-1.2 внаслідок текучості робочої поздовжньої арматури, що фіксувалася за допомогою тензометра Гугенбергера, руйнуюча сила становила $F = 48$ кН.

Висновки. На основі аналізу результатів випробуваннях серій залізобетонних балок слід зазначити, що використання дисперсного локального армування дрібнозернистого бетону розтягнутої зони сталеву фібру збільшує тріщиностійкість балок і зменшує ширину розкриття тріщин. При використанні фібробетону з об'ємним відсотком армування $\mu_f = 0,5\%$, тріщиностійкість зростає до 1,5-1,8 рази, а при використанні фібробетону з $\mu_f = 1\%$ майже в 2 рази. Ширина розкриття тріщин також зменшилася, особливо в балках серії Б-1.3, навіть перед руйнуванням була в межах допустимої.

Отже, сталева фібра значно покращує роботу згинальних елементів працюючи як стабілізатор, зменшуючи ширину розкриття тріщин та підвищуючи їхню міцність.

1. Дробішинець С. Я. Вплив повторних малоциклових навантажень на механічні характеристики сталеві фібробетону та роботу згинальних елементів на його основі: дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Луцьк, 2005. 215 с.

Drobyshtynets S. Ya. Vplyv povtornykh malotsyklovykh navantazhen na mekhanichni kharakterystyky stalefibrobetonu ta robotu zghynalnykh elementiv na yoho osnovi: dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01. Lutsk, 2005. 215 s.

2. Ужегов С. О., Ужегова О. А., Пасічник Р. В., Андрійчук О. В., Дробишинець С. Я. Розрахунок сталевібробетонних згинальних елементів за міцністю нормальних перерізів. Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві. 2015. Вип. 3. С. 136-143.

Uzhehov S. O., Uzhehova O. A., Pasichnyk R. V., Andriichuk O. V., Drobyshtynets S. Ya. Rozrakhunok stalefibrobetonnykh zhyhalnykh elementiv za mitsnistiu normalnykh pereriziv. Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunku v budivnytstvi. 2015. Vyp. 3. S. 136-143.

3. Білозір В., Подгорецькі А. Утворення та розкриття тріщин у перерізах, нормальних до поздовжньої осі комбіновано армованих сталевібробетонних балок. Вісник Луцького національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2019. №20. С. 33-37.

Bilozir V., Podhorecki A. Formation and opening of cracks in sections, normal to the longitudinal axis of combined reinforced steel-fiber concrete beams. Visnik L'vivs'kogo nacional'nogo agrarnogo universitetu. Arhitektura i sil's'kogospodars'ke budivnictvo. 2019. No. 20. P. 33-37.

4. Корнійчук Т. С. Динаміка сталевібробетонних конструкцій: дис. ... д-ра філософії: 192. Одеса, 2021. 184 с.

Korniichuk T. S. Dynamika stalefibrobetonnykh konstruksii: dys. ... d-ra filosofii: 192. Odesa, 2021. 184 s.

5. Ather M. M., Siddiq M. A., Raheem M. A., Nanchari K. Effects of Hybrid Steel Fibers on the Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2022. Vol. 09, Iss. 05. P. 1036-1041.

6. Behbahani H. P., Nematollahi B., Sam A. R. M., Lai F. C. Flexural Behavior of Steel-Fiber-Added-RC (SFARC) Beams with C30 and C50 Classes of Concrete. *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*. 2012. Vol. 3, Iss. 1. P. 54-66.

7. Yang I. H., Joh C., Kim B. S. Flexural strength of ultra high strength concrete beams reinforced with steel fibers. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 14. P. 793-796.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	11.04.2026	Received	11.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	16.04.2026	Received in revised form	16.04.2026
Прийнято	18.04.2026	Accepted	18.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.