

УДК 624. 012. 25

## УТВОРЕННЯ ТА РОЗКРИТТЯ ТРІЩИН У ПЕРЕРІЗАХ, НОРМАЛЬНИХ ДО ПОЗДОВЖНЬОЇ ОСІ КОМБІНОВАНО АРМОВАНИХ СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ БАЛОК

**В. Білозір, к. т. н.**

ORCID ID: 0000-0002-8231-1325

*Львівський національний аграрний університет*

**А. Подгорецькі, к. т. н.**

ORCID ID: 0000-0002-9569-1769

*Університет Технологічно-природничий в Бидгощі, Польща*

<https://doi.org/10.31734/architecture2019.20.033>

**Білозір В., Подгорецькі А. Утворення та розкриття тріщин у перерізах, нормальних до поздовжньої осі комбіновано армованих сталефібробетонних балок**

Сталефібробетон має низку переваг порівняно із звичайним залізобетоном – підвищену тріщиностійкість, в'язкість і пружність, більшу витривалість на вібраційні та ударні навантаження, краще опирається стиранню і дії високих температур. Поява нових видів фібрової арматури українського виробництва вимагає додаткових досліджень несучої здатності, жорсткості та тріщиностійкості згинальних комбіновано армованих елементів.

Програмою досліджень передбачено виготовлення та випробування зразків, армованих арматурою Вр-1 (1Ø5) та анкерною фіброю довжиною 50 мм і діаметром 1 мм з коефіцієнтом фібрового армування за об'ємом  $\rho_{fv}$  0; 0,007; 0,0125 і 0,0018, за схемою однопрогінної балки, завантаженої зосередженими силами у третинах робочого прогону, що дорівнює 900 мм. Відстань від крайніх розтягнутих волокон до центра ваги стрижня – 15 мм. Контрольованими параметрами під час випробувань були прогини, деформації бетону за висотою перерізу, ширини розкриття нормальних тріщин.

Експериментально встановлено, що для всіх дослідних взірців характерним було практично лінійне зростання прогинів до утворення тріщин. Далі прогини зростали інтенсивніше, особливо у взірцях, які не містили фібрової арматури. Після утворення нормальних тріщин зростала ширина їх розкриття і поступово зменшувалась висота стиснутої зони бетону. Зі збільшенням  $\rho_{fv}$  у взірцях спостерігали менш інтенсивне зниження відносної висоти стиснутої зони бетону аж до руйнування. Збільшення кількості фібри у зразках сприяло зменшенню ширини розкриття нормальних тріщин.

У момент утворення тріщин відносні деформації крайніх розтягнутих волокон бетону дорівнювали в середньому  $17 \cdot 10^{-5}$ . Зі збільшенням навантаження ці деформації зростали і їх приріст залежав практично лінійно від приросту згинального моменту до рівня навантаження, що дорівнював 85–90 % від руйнівного.

Розроблені пропозиції щодо розрахунку моменту утворення тріщин і ширини їх розкриття.

**Ключові слова:** сталефібробетон, балка, утворення тріщин, ширина розкриття тріщин, розрахунок.

**Bilozir V., Podhorecki A. Formation and opening of cracks in sections, normal to the longitudinal axis of combined reinforced steel-fiber concrete beams**

Steel fibre concrete has a set of advantages comparing to the ordinary reinforced concrete, particularly improved crack resistance, viscosity and resiliency, greater endurance as to oscillation and shock loading, better resistance to elimination and impact of high temperatures. Appearance of the new types of fibre armature of Ukrainian production requires additional researches of their bearing strength, inflexibility and crack resistance of the bending combined reinforced elements.

The experiment program expects producing and testing of the samples, reinforced with Вр-1 (1Ø5) armature, anchor fiber 50 mm long and 1 mm in diameter with a ratio of reinforcement in the volume 0; 0,7; 1,35 and 1,8, according to the scheme of one-turn beams, loaded with lumped forces in the third working run, which is equal to 900 mm. The distance from the extreme stretched fibers to the center of the rod weight accounts for 15mm. In the progress of the tests, the controlled parameters included deflection, deformation of the concrete at the section height, width of the normal cracks opening.

It was experimentally approved that all prototype models demonstrated almost linear growth of deflections until appearance of cracks. Afterwards, the deflections increased more intensively, especially in the models with no fiber reinforcement. After formation of normal cracks, the width of their opening increased and the height of the compressed concrete zone gradually decreased. An increase of  $\rho_{fv}$  in the models resulted in less intense decrease of the relative height of the compressed zone of concrete up to destruction. However, increase of the fiber share in the samples contributed to a decrease in the width of the normal cracks opening.

At the moment of crack formation, relative deformations of the extreme stretched fibres of concrete were equal to 17·10<sup>-5</sup> on average. A growth of loading caused that those deformations increased and their growth almost linearly depended on the growth of the bending moment relating to the degree of load, i.e it was equal to 85-90 % of the destructive one. The work supplied proposals concerning computation of the moment cracks formation and their opening width.

**Key words:** steel fiber concrete, beam, cracks formation, width of crack opening, calculation.

**Постановка проблеми.** Сталефіробетон має низку переваг порівняно із звичайним залізобетоном – підвищену тріщиностійкість, в'язкість і пружність, більшу витривалість на вібраційні та ударні навантаження, краще опирається стиранню і дії високих температур. Ці переваги дають змогу використовувати його в багатьох конструкціях, будівлях та спорудах. Поява нових видів фібрової арматури українського виробництва вимагає додаткових досліджень несучої здатності, жорсткості та тріщиностійкості згинальних комбіновано армованих елементів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Експериментально-теоретичні дослідження тріщиностійкості нормальних перерізів комбіновано армованих сталефіробетонних елементів проводили багато дослідників як в Україні, так і за кордоном. Сюди належать дослідження Г. К. Хайдукова, О. П. Кричевського, І. В. Волкова, О. П. Сунака, В. В. Білозора та інших. Ці дослідження були підґрунтям для підготовки норм проектування сталефіробетонних конструкцій на основі національного стандарту [1]. В Україні несучу здатність і деформативність елементів цих конструкцій вивчали науковці ЛНАУ, їх результати опубліковані як в Україні, так і за кордоном [2–9]. Однак даних експериментально-теоретичних досліджень комбіновано армованих елементів з фіброю українського виробництва поки що немає. Тому їх проведення необхідне для подальшого використання результатів за розробки сталефіробетонних конструкцій та доповнень до норм проектування.

**Постановка завдання.** Наше завдання – проведення експериментальних досліджень робо-

ти під навантаженням вказаних елементів та розробка методики їх розрахунку.

**Виклад основного матеріалу.** Програмою досліджень передбачено виготовлення та випробування зразків, армованих арматурою Вр-1 (1Ø5) та анкерною фіброю довжиною 50 мм і діаметром 1 мм (табл. 1), за схемою однопрогінної балки, завантаженої зосередженими силами у третинах робочого прогону, що дорівнює 900 мм. Відстань від крайніх розтягнутих волокон до центра ваги стрижня – 15 мм. Контрольованими параметрами під час випробувань були прогини, деформації бетону за висотою перерізу, ширини розкриття нормальних тріщин.

Перед початком експериментів випробувано три куби 150 x 150 x 150 мм, виготовлених з дрібнозернистого бетону, який слугував матрицею сталефіробетону балок. Кубова міцність бетону цих кубів становила 22,1; 23,4; 21,4 МПа. Середнє значення кубової міцності бетону – 22,3 МПа. Далі була визначена міцність бетону на розтяг за формулою Фере:

$$f_{ct} = 0,232 \sqrt[3]{f_{c,cube}^2}, \quad (1)$$

де  $f_{c,cube}$  – кубова міцність бетону.

При цьому були взяті до уваги рекомендації НИИЖБ щодо поправки коефіцієнта 0,232 залежно від виду бетону, способу твердіння, гранулометричного складу. З урахуванням цього середнє значення міцності бетону на розтяг дорівнює 2,14 МПа. Крім того, за формулою СНиП 2.03.01-84\* та з урахуванням змін до нього, визначили середнє значення призмової міцності бетону  $f_{c,prism}$ , яке становило 17,84 МПа.

Міцнісні характеристики сталефіробетону визначали за формулами норм [1].

Таблиця 1

Параметри експериментальних зрізків

Розміри зразка, см	Клас бетону	Відсоток фібрового армування			
		$\rho_{fv} = 0$	$\rho_{fv} = 0,7$	$\rho_{fv} = 1,25$	$\rho_{fv} = 1,8$
120 x 10 x 5	С20/ 25	В 1.1	F 2.1	F 3.1	F 4.1
		В 1.2	F2.2	F 3.2	F 4.2

Міцнісні характеристики матеріалів дослідних зрізів

Марка зрізця	$\rho_{fv}$ , %	$f_{c,cube}$ МПа	$f_{c,prism}$ ( $f_{fc,prism}$ ), МПа	$f_{ct}$ ( $f_{fct}$ ), МПа
B 1.1 B 1.2	0	22,3	17,84	2,14
F 2.1 F 2.2	0,7	22,3	18,60	2,53
F 3.1 F3.2	1,25	22,3	19,36	3,12
F4.1 F4.2	1,8	22,3	20,42	3,81

Дані табл. 2 отримані на основі як експериментів, так і з використанням емпіричних рівнянь. Вони були використані в подальшому для аналізу роботи балок під навантаженням на різних стадіях їх роботи.

На кожному етапі навантаження фіксували значення прогинів та ширину тріщин після їх утворення. У зрізцях B1.1 та B 1.2 тріщини утворилися за навантаження на динамометрі, що дорівнює 4,3 і 4,24 кН відповідно. При цьому відносні деформації на рівні робочої арматури дорівнювали  $12 \times 10^{-5}$  і  $16 \times 10^{-5}$ , а на рівні крайніх стиснутих волокон –  $10 \times 10^{-5}$  і  $11 \times 10^{-5}$ .

У зрізцях F 2.1 і F 2.2 ( $\rho_{fv} = 0,7$  %) перші видимі тріщини шириною до 0,025 мм утворилися за навантажень на динамометрі 4,28 і 4,38 кН відповідно. Відносні деформації на рівні крайніх розтягнутих волокон становили  $25 \times 10^{-5}$  і  $30 \times 10^{-5}$ .

Зі збільшенням відсотка фібрового армування за об'ємом зростали навантаження, за яких можна було виявити утворення тріщин у зрізцях з відсотком фібри 1,25 і 1,8.

Виявилося, що момент утворення нормальних тріщин доцільно розраховувати за формулою:

$$M_{cr} = f_{ctm} W_{pl}, \quad (2)$$

де  $f_{ctm}$  – середнє значення міцності бетону на осьовий розтяг;  $W_{pl}$  – пружно-пластичний момент опору перерізу.

Для всіх дослідних зрізів характерним було практично лінійне зростання прогинів до утворення тріщин. Далі прогини зростали інтенсивніше, особливо у зрізцях, які не містили фібрової арматури.

Після утворення нормальних тріщин зростала ширина їх розкриття і поступово зменшувалась висота стиснутої зони бетону.

Зі збільшенням  $\rho_{fv}$  у зрізцях спостерігали менш інтенсивне зниження відносної висоти стиснутої зони бетону аж до руйнування. Збільшення кількості фібри у зразках сприяло зменшенню ширини розкриття нормальних тріщин (табл. 3).

На відміну від пропозицій [1; 2] доцільно ширину розкриття нормальних тріщин розраховувати за формулою:

$$w = \varphi_l \eta \delta \lambda \frac{\sigma_f}{E_f} d, \quad (3)$$

де  $\varphi_l$  – враховує характер дії навантаження, вид і стан бетону (для дрібнозернистого бетону групи А  $\varphi_l = 1,75$ );  $\eta$  – враховує вид арматури (для арматури періодичного профілю  $\eta = 1$ );  $\delta$  – залежить від діаметра арматури і коефіцієнта

армування розтягнутої зони  $\rho_t = \frac{A_{s,tot}}{b(h-x)}$ .

Його пропонуємо визначити за формулою

$$\delta = \frac{\alpha}{\varphi_d (1 + 2\alpha\rho_t)}, \quad (4)$$

де  $\varphi_d = 1,4$  за діаметра стрижнів 22 мм;  $\varphi_d = 1,07$  за діаметра стрижнів 12 мм;

$$\alpha = E_s / E_c;$$

$$\lambda = 2 \left( 1 - \frac{1}{e^w} \right) \leq 1,45;$$

$$\omega = 5 + 0,6 \frac{\sigma_s}{f_{ctk}}.$$

Експериментальні значення ширини розкриття нормальних тріщин у сталевібробетонних комбіновано армованих балках (середні значення)

Марка взірця	$\rho_{fv}$ , %	Ширина розкриття нормальних тріщин $w$ , мм за значення згинального моменту $M$ , кН·м				
		60	70	80	90	100
F 2.1 F 2.2	0,7	0,108	0,125	0,160	0,175	0,210
F 3.1 F 3.2	1,25	0,060	0,075	0,086	0,100	0,103
F 4.1 F 4.2	1,8	0,030	0,040	0,052	0,063	0,075

Оскільки за граничними станами другої групи сталевібробетонні елементи розраховують з використанням перерізу, зведеного до сталевого, то замість  $\sigma_s$  матимемо у формулі умовні напруження  $\sigma_f$ , а замість  $E_s - E_f$ . Очевидно, що коефіцієнти  $\varphi_l$  і  $\eta$  доцільно залишити без змін. Коефіцієнт  $\delta$  доцільно знаходити за формулою (4), у якій  $\rho_t$  можна розрахувати за формулою:

$$\rho_t = \frac{A_s + \rho_{fa} A_{fct}}{b(h-x)} = \frac{A_s + \rho_{fa} b(h-x)}{b(h-x)} = \frac{A_s}{b(h-x)} + \rho_{fa}, \quad (5)$$

де  $\rho_{fa} = \mu_{fv} k_{or}^2 k_{an}$ ;

тут  $k_{or}$  – коефіцієнт орієнтації фібри,

$$k_{an} = 1 - \beta \frac{l_{fan}}{l_f}; \quad \beta = \frac{M - 0,9M_{cre}}{M_u}.$$

Це саме стосується коефіцієнта  $\alpha$ , який матиме значення  $E_s/E_f$ .

Тоді коефіцієнт  $\lambda$  доцільно знаходити за коефіцієнта

$$\varpi = 5 + 0,6 \frac{\sigma_f}{f_{ctk}}. \quad (6)$$

Аналіз засвідчив, що експериментальні ширини розкриття тріщин за відсотка армування 1,8 добре описуються рівнянням (3), а за  $\rho_{fv} = 0,7\%$  – приблизно на 30 % перевищують теоретичні значення.

Виявилось, що залежність між  $\frac{w_{exp}}{w_{theor}}$  і  $\rho_{fa}$  – лінійна, та описується рівнянням:

$$\frac{w_{exp}}{w_{theor}} = 1,49 - 1,51\rho_{fa}. \quad (7)$$

Отже, щоб отримати адекватну оцінку ширини розкриття тріщини, потрібно праву частину рівняння (3) помножити на коефіцієнт  $1,49 - 1,51\rho_{fa}$ .

Оскільки вплив армування у формулі (3) враховує коефіцієнт  $\delta$ , то доцільно його прийняти з вказаною поправкою:

$$\delta = \frac{\alpha(1,49 - 1,51\rho_{fa})}{\varphi_d(1 + 2\alpha\rho_t)}. \quad (8)$$

Необхідно зауважити, що такі пропозиції дають змогу із запасом у 2...15 % оцінити максимальну ширину розкриття тріщин у діапазоні можливих експлуатаційних навантажень.

**Висновки.** Проведені експериментально-теоретичні дослідження залізобетонних і комбіновано армованих сталевібробетонних згинальних елементів дозволили розробити пропозиції розрахунку ширини розкриття нормальних тріщин. Запропонована формула дає змогу достатньо точно розрахувати ширину розкриття нормальних тріщин.

#### Бібліографічний список

1. ДСТУ-Н Б. В. 2. 6-218:2016. Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсно-армованого бетону. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 32 с.
2. Білозір В. В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых сталефибробетонных элементов на фибре из листа: дис... канд. техн. наук. Москва, 1991. 164 с.
3. Білозір В. В. Деформаційний метод розрахунку згинальних сталевібробетонних елементів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Сер. Теорія і практика будівництва. 2012. № 742. С. 18–24.
4. Білозір В. Деформаційний метод розрахунку прогинів залізобетонних балок за тривалої дії навантаження. *Вісник Львівського національного аграрного університету*. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2014. № 15. С. 61–68.
5. Kinash R., Bilozir V. Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. *Czasopismo Techniczne (Technical Transactions: Architecture)*. 2014. I. 8- A (15). № 111. P. 49–58.
6. Shmyh R., Bilozir V., Vysochenko A. Carrying capacity of bending concrete elements reinforced by fibro

and stripes taken from used polyethylene terephthalate bottles. *International Scientific and Practical Conference World science*. 2018. № 2. P. 88–93.

7. Kinash R., Bilozir V., Shmyh R. Suspensibility of Steel Fibre Reinforced Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. № 471 (5). 7 p.

8. Білозір В. Пропозиції щодо вдосконалення українських норм проектування сталевібробетонних конструкцій. *Вісник Львівського національного аграр-*

*ного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2018. № 19. С. 38–40.

9. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur-und Architekten-Zeitschrift*. 1995. Jg.140. Nr. 2. S. 38–53.

10. RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*. 2003. Vol. 36. P. 560–567.

*Стаття надійшла 31.05.2019.*