

Розділ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ДІАГНОСТИКА РОБОТИ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

УДК 624.012

ТЕОРЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ НА РОЗТЯГ БЕТОНУ, АРМОВАНОГО СТАЛЕВОЮ ФІБРОЮ ЗІ ЗАГНУТИМИ КІНЦЯМИ

Р. Кінаш, д. т. н.

ORCID ID: 0000-0001-6715-9583

В. Білозір, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-8231-1325

І. Біденко, аспірант

ORCID ID: 0000-0002-2418-353X

Львівський національний аграрний університет

<https://doi.org/10.31734/architecture2021.22.017>

Кінаш Р., Білозір В., Біденко І. Теоретичне оцінювання міцності на розтяг бетону, армованого сталеву фібрую зі загнутими кінцями

Висвітлено результати теоретичного оцінювання міцності на розтяг бетону, армованого сталеву фібруюю зі загнутими кінцями. За розрахунку несучої здатності елементів сталевіфібробетонних конструкцій спочатку визначають значення міцності сталевіфібробетону на розтяг. При цьому розрізняють два випадки роботи фібр на стадії граничної рівноваги. У першому випадку передбачено, що частина фібр розривається, а частина – висмикується. У другому випадку вся фібра висмикується. Для того, щоб визначити, як працюватиме фібра за руйнування розтягнутого зразка, необхідно визначити довжину анкерування фібри l_{fb} , за якої пів довжини фібри l_f , закладеної у бетон, достатньо, щоб забезпечити її розрив. Оскільки l_{fb} залежить від коефіцієнта η_f , що враховує анкерування фібри, то його експериментальне визначення й обґрунтоване призначення в нормах проектування має вирішальне значення для забезпечення точності визначення міцності сталевіфібробетону на розтяг. Під час виконання досліджень із витягування анкерної фібри з бетонних призм 100 x 50 x 50 мм, виготовлених із дрібнозернистого бетону різних класів, автори встановили значення η_f та з'ясували, що за однакових довжин закладання фібри цей коефіцієнт зростає зі збільшенням міцності бетону. В межах конкретного класу бетону він збільшується зі зростанням довжини закладання фібри. Причиною того, що цей коефіцієнт не є постійним, на наш погляд, є те, що фібра містить анкери, які за малих довжин її закладання у бетон забезпечують суттєвий приріст напружень під час її витягування. Такий вплив анкера на напруження фібри за витягування з бетону зменшується зі збільшенням довжини її закладання.

За результатами випробувань фібри на витягування з дрібнозернистого бетону запропонована уточнена формула для визначення міцності сталевіфібробетону на розтяг, в якій враховано як зчеплення фібри з бетоном на гладкій її частині, так і вплив кінцевих анкерів. Подальші експериментальні дослідження міцності сталевіфібробетону на розтяг допоможуть унести додаткові уточнення в запропонований розрахунковий апарат.

Ключові слова: сталеві фібру, сталевіфібробетон, випробування на розтяг, армування, анкерування фібри.

Kinash R., Bilozir V., Bidenko I. Theoretical evaluation of the tensile strength of concrete reinforced with steel fiber with curved ends

The article presents the results of theoretical evaluation of tensile strength of concrete reinforced with steel fiber with bent ends. When calculating the load-bearing capacity of the elements of reinforced concrete structures, first determine the value of the tensile strength of reinforced concrete. There are two cases of fiber at the stage of extreme equilibrium. In the first case, it is assumed that part of the fibers is torn, and part is pulled out. In the second case, all the fiber is pulled out. In order to determine how the fiber will work when breaking a stretched specimen, it is necessary to determine the length of the fiber anchoring l_{fb} , at which half the length of the fiber l_f laid in the concrete is sufficient to ensure its rupture. Since l_{fb} depends on the coefficient η_f , which takes into account the anchoring of the fiber, its experimental determination and reasonable purpose in the design standards is crucial to ensure the accuracy of determining the tensile strength of reinforced concrete. When performing studies on the extraction of anchor fiber from concrete prisms 100 x 50 x 50 mm made of fine-grained concrete of different classes, the authors determined the value of η_f and found that for the same lengths of fiber laying, this coefficient increases with increasing concrete strength. Within a particular class of concrete, it increases with

increasing length of fiber laying. The reason that this coefficient is not constant, in our opinion, is that this fiber contains anchors, which at short lengths of laying fiber in concrete provide a significant increase of fiber stresses during its extraction. This effect of the anchor on the stress of the fiber during extraction from concrete decreases with increasing length of its laying. According to the results of tests of fiber for pulling from fine-grained concrete, a refined formula for determining the tensile strength of reinforced concrete is proposed, which takes into account both the adhesion of fiber to concrete on its smooth part and the effect of end anchors. Further experimental studies of the tensile strength of reinforced concrete will, if necessary, make additional clarifications to the proposed calculation apparatus.

Key words: steel fiber, steel fiber concrete, tensile tests, reinforcement, fiber anchoring.

Постановка проблеми. За розрахунку несучої здатності елементів сталевібробетонних конструкцій найперше з'ясовують значення міцності сталевібробетону на розтяг [1; 2]. Розрізняють два випадки роботи фібр на стадії граничної рівноваги [3; 4]. У першому випадку передбачається, що частина фібр розривається, а частина – висмикується. У другому випадку вся фібра висмикується. Щоби визначити, як працюватиме фібра за руйнування розтягнутого зразка, визначають необхідну довжину анкерування фібри l_{fb} , за якої пів довжини фібри l_f , закладеної у бетон, достатньо, щоб забезпечити її розрив. Якщо $l_{fb} \leq l_f / 2$, то реалізується перший випадок. Якщо ця умова не виконується, то вся фібра під час руйнування розтягнутого зразка висмикуватиметься. Оскільки l_{fb} залежить від коефіцієнта η_f , що враховує анкерування фібри, то його експериментальне визначення й обґрунтоване призначення в нормах проектування виконує вирішальну роль у забезпеченні точності встановлення міцності сталевібробетону на розтяг. Правильне врахування параметрів зчеплення фібри з бетоном є важливим, що й розглядається у цій статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У праці [4] аргументовано, що міцність сталевібробетону на розтяг під час висмикування усіх фібр залежить від міцності бетону на стиск, коефіцієнта фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} , коефіцієнта, що враховує орієнтацію фібри k_{or} , коефіцієнта η_f , що враховує анкерування фібри, діаметра фібри d_f і довжини фібри l_f . Експериментально-теоретичні дослідження [5–7] підтвердили правильність урахування у розрахунках указаних параметрів. Це дало змогу в подальшому розвинути деформаційну методику розрахунку згинальних сталевібробетонних елементів [8–11].

У праці [7] доведено, що коефіцієнт η_f для анкерної фібри українського виробництва за різних довжин її закладання у бетон не є постійним. Додаткові експериментальні дослідження міцності на витягування фібри з дрібнозернистого бетону класів С20/25, С25/20, С30/35, виконані нами,

також свідчать про те, що призначення коефіцієнта η_f у вітчизняних нормах проектування [1] потребує уточнення. Це впливатиме і на структуру формули для визначення міцності сталевібробетону на розтяг.

Постановка завдання. Наше завдання – на основі аналізу результатів експериментально-теоретичних досліджень, як власних, так і інших авторів, запропонувати уточнену формулу для попереднього визначення міцності сталевібробетону на розтяг за армування його анкерною фіброю вітчизняного виробництва.

Виклад основного матеріалу. У нормах [1] довжину анкерування фібри l_{fb} , що забезпечує її розрив під час витягування, передбачено розраховувати за формулою:

$$l_{fb} \geq \frac{\eta_f d_f f_{fk}}{f_{ck}}, \quad (1)$$

де η_f – коефіцієнт, який для анкерної фібри дорівнює 0,9; f_{fk} – характеристичний опір фібри на розтяг; f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск.

Ця формула ґрунтується на результатах досліджень на витягування стрижневої арматури з бетону [4]:

$$\frac{l_e}{\emptyset} = \frac{\eta \sigma_s}{f_{c,prism}}, \quad (2)$$

де l_e – довжина закладання фібри в бетон; \emptyset – діаметр стрижня; σ_s – напруження в арматурному стрижні під час витягування.

У випадку витягування фібри з бетону:

$$\frac{l_e}{d_f} = \frac{\eta_f \sigma_f}{f_{c,prism}}. \quad (3)$$

За результатами наших досліджень із витягування анкерної фібри з бетонних призм 100 x 50 x 50 мм, виготовлених із дрібнозернистого бетону різних класів (рис. 1, табл. 1), встановлено значення η_f .

За однакових довжин закладання фібри цей коефіцієнт зростає зі збільшенням міцності бетону. В межах конкретного класу бетону він збільшується зі зростанням довжини закладання фібри. Причиною того, що цей коефіцієнт не є постійним, на наш погляд, є те, що фібра містить

анкери, які за малих довжин закладання її у бетон забезпечують суттєвий приріст напружень під час її витягування. Такий вплив анкера на напруження фібри за витягування з бетону зменшується зі збільшенням довжини її закладання.

Визначимо зусилля, які припадають на анкер фібри (рис. 2), за різних класів бетону. Якщо витягаючі зусилля у фібрі позначити N_{10}, N_{15}, N_{25} за довжини закладання у бетон 10, 20, 25 мм відповідно, а зусилля, яке сприймає анкер, N_{an} , то, маючи на увазі, що довжина анкера дорівнює 5 мм, можна записати:

$$\begin{aligned} N_{25} &= N_{an} + \tau \pi d_f \cdot 20 \text{ мм} \\ N_{15} &= N_{an} + \tau \pi d_f \cdot 10 \text{ мм} , \\ N_{10} &= N_{an} + \tau \pi d_f \cdot 5 \text{ мм} \end{aligned} \quad (4)$$

де τ – напруження зчеплення гладкої частини фібри з бетоном.



Рис. 1. Випробування фібри на витягування з бетонних призм.

Таблиця 1

Коефіцієнти анкеруючої здатності фібри

Клас бетону	Кубова міцність бетону $f_{cm,cube}$, МПа	Призмova міцність матриці $f_{cm,prism}$, МПа	Довжина закладання фібри l_e , мм	Середні значення максимальних напружень у фібрі під час витягування σ_{fm} , МПа	Коефіцієнт анкеруючої здатності η_f
C20/25	29,31	23,15	10	532,10	0,435
			15	587,10	0,592
			25	692,76	0,835
C25/30	34,76	27,11	10	569,70	0,476
			15	638,95	0,636
			25	752,37	0,901
C30/35	38,96	31,14	10	606,81	0,513
			15	685,44	0,681
			25	809,12	0,962

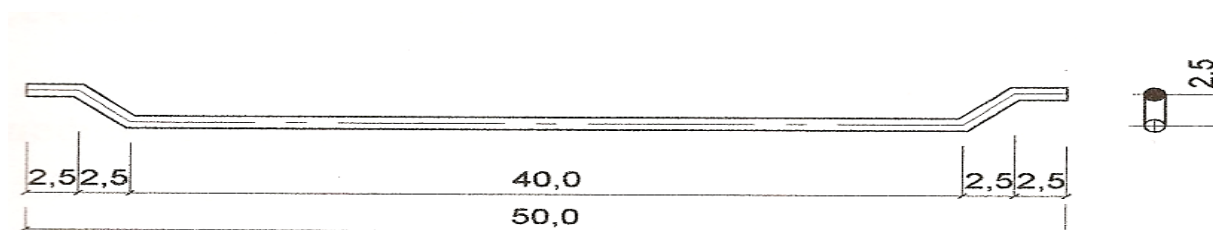


Рис. 2. Фібра типу HE 1050 виробництва ВАТ «Сілур»

Складемо систему рівнянь, що ґрунтується на (4):

$$\begin{aligned} N_{25} &= N_{an} + \tau \pi d_f \cdot 20 \text{ мм} \\ N_{15} &= N_{an} + \tau \pi d_f \cdot 10 \text{ мм} \end{aligned} \quad (5)$$

Помноживши друге рівняння на 2 та віднявши від отриманого рівняння перше, отримаємо:

$$N_{an} = 2N_{15} - N_{25}. \quad (6)$$

Помноживши третє рівняння системи (4) на 4 та віднявши від нього перше рівняння, знаходимо:

$$N_{an} = \frac{4N_{10} - N_{25}}{3}. \quad (7)$$

Об'єднавши друге і третє рівняння системи (4) та помноживши третє рівняння на 2, після перетворень отримаємо:

$$N_{an} = 2N_{10} - N_{15}. \quad (8)$$

Використовуючи дані табл. 1 та рівняння (6), (7) і (8), отримано значення зусиль, що сприймає анкер за різних класів бетону, та дотичні напруження на гладкій частині фібр (табл. 2). Підвищення класу бетону від С 20/25 до С 30/35 призвело до збільшення зусилля, що припадає на анкер, на 14,15 %, і до збільшення дотичних напружень на гладкій частині фібр на 22,22 %. Отож, анкер забезпечує виникнення напружень у фібрі під час витягування, які дорівнюють 485,13; 517,64 і 553,78 МПа за використання бетону класів С20/25, С25/20, С30/35, відповідно.

У праці [4] аргументовано, що міцність сталевібробетону на розтяг f_{fct} можна розрахувати за формулою:

$$f_{fct} = k_{or} k_{cr} k_{an} \rho_{fv} f_f, \quad (9)$$

де k_{cr} – коефіцієнт імовірності перетину фіброю площини, у якій відбувається руйнування; k_{an} – коефіцієнт анкеруючої здатності фібри; f_f – міцність фібри на розтяг.

Крім того, у нормах і рекомендаціях [1–3] прийнято, що $k_{cr} \approx k_{or}$, тому формула (9) набуває вигляду:

$$f_{fct} = k_{or}^2 k_{an} \rho_{fv} f_f. \quad (10)$$

За руйнування, яке супроводжується витягуванням усіх фібр:

$$k_{an} = \frac{\sigma_f}{f_f}. \quad (11)$$

Оскільки середня довжина закладання фібри відносно критичної тріщини дорівнює $l_f 4$, то з урахуванням (3) отримуємо:

$$\sigma_f = \frac{l_f f_{c,prism}}{4d_f \eta_f}. \quad (12)$$

З урахуванням рівняння (12) рівняння (11) зобразимо так:

$$k_{an} = \frac{l_f f_{c,prism}}{4d_f \eta_f f_f}. \quad (13)$$

З огляду на те, що коефіцієнт η_f не є постійним, пропонується використовувати для визначення k_{an} рівняння (11), в якому напруження у фібрі визначається з урахуванням результатів наших експериментальних досліджень (рис. 3).

Оскільки середня довжина закладання фібри відносно критичної тріщини дорівнює $l_f 4 = 12,5$ мм, а напруження у фібрі під час витягування для кожного класу бетону можна визначити з табл. 1 як середні для довжини закладання 10 і 15 мм, отримаємо залежність напружень фібри з огляду на міцність бетону (рис. 4).

Отже, коефіцієнт анкеруючої здатності фібри можна описати рівнянням:

$$k_{an} = \frac{1}{f_f} 0,806 \frac{f_{c,prism} l_f}{4d_f} + 327,98. \quad (14)$$

Теоретичні значення міцності сталевібробетону на розтяг (табл. 3) обчислювали за формулою (10) та з використанням формули (14) для зразка, який має поперечний переріз 250 x 30 мм (коефіцієнт орієнтації фібри $k_{or} = 0,681$ [1–3]).

Таблиця 2

Зусилля, що сприймає анкер, і дотичні напруження на гладкій частині фібри

Клас бетону	Зусилля, що сприймає анкер, Н				Дотичні напруження на гладкій частині фібри під час витягування, МПа			
	$N_{an(6)}$	$N_{an(7)}$	$N_{an(8)}$	$N_{an,m}$	$\tau_{(6)}$	$\tau_{(7)}$	$\tau_{(8)}$	τ_m
С 20/25	388,17	379,36	374,95	380,83	2,61	2,80	2,68	2,70
С 25/30	414,50	404,72	399,83	406,35	2,98	3,19	3,06	3,08
С 30/35	455,00	430,67	418,50	434,72	3,06	3,58	3,26	3,30

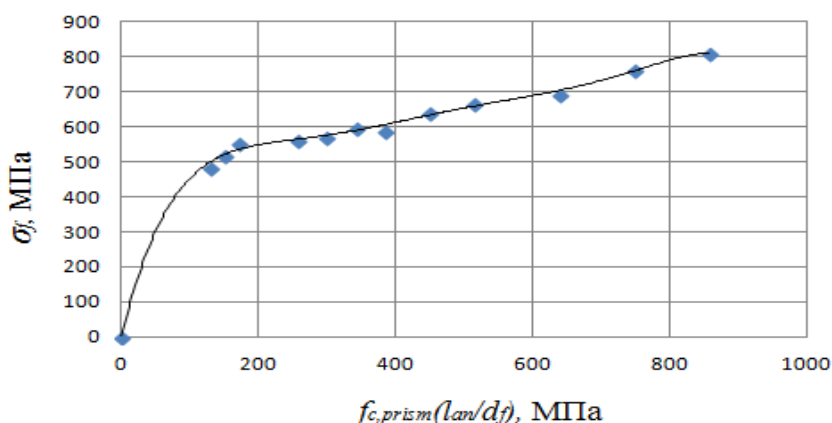


Рис. 3. Залежність максимальних напружень у фібрі під час витягування від міцності бетону.

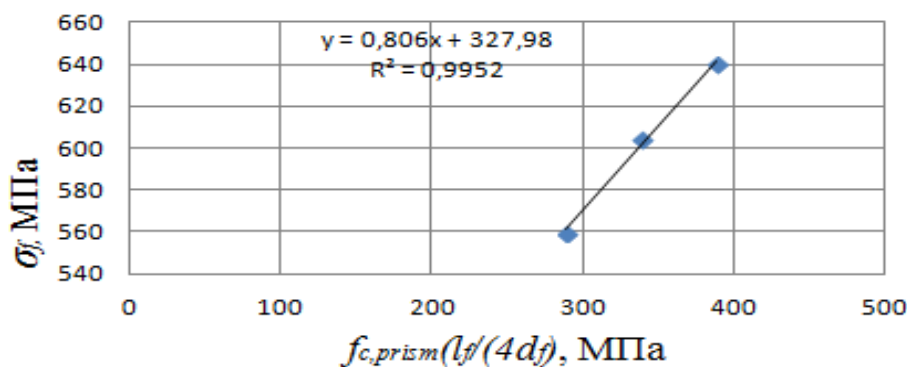


Рис. 4. Залежність максимальних напружень у фібрі під час витягування від міцності бетону для довжини її закладання l_f .

Таблиця 3

Теоретичні значення міцності сталевібробетону на розтяг

Призмове міцність бетону $f_{c,prism}$, МПа	Теоретичні значення міцності сталевібробетону на розтяг $f_{fct,theor}$, МПа		
	Коефіцієнт фібрового армування за об'ємом ρ_{fv}		
	0,007	0,0125	0,018
20	1,72	3,07	4,42
25	1,88	3,36	4,84
30	2,05	3,65	5,26

Висновки. За результатами випробувань фібри на витягування з дрібнозернистого бетону запропонована уточнена формула для визначення міцності сталевібробетону на розтяг, в якій враховано як зчеплення фібри з бетоном на гладкій її частині, так і вплив кінцевих анкерів. Подальші експериментальні дослідження міцності сталевібробетону на розтяг допоможуть внести додаткові уточнення в запропонований розрахунковий апарат.

Бібліографічний список

1. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсно-армованого бетону. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 32 с. [Чинний з 2017.04.01].
2. СП 360.132580.2017 Конструкции сталевібробетонные. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ, 2018. 70 с. [Введ. в действ. 2018.06.12].
3. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталевібробетонных конструкций. Москва: НИИЖБ Госстроя СССР, 1987. 148 с.

4. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. Москва: Стройиздат, 1989. 174 с.
5. Білозір В. В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых стал-фибробетонных элементов на фибре из листа: дис... канд. техн. наук. Москва, 1991. 164 с.
6. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur-und Architekten- Zeitschrift*, 1995. Jg. 140. № 2. P. 38–53.
7. Білозір В., Височенко А. Визначення необхідної довжини анкерування фібри в бетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2013. № 14. С. 64–70.
8. Білозір В. В. Деформаційний метод розрахунку згинальних сталевіфробетонних елементів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер. Теорія і практика будівництва*. 2012. № 742. С. 18–24.
9. 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.
10. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Vysochenko A. Suspensibility of Steel Fibre Reinforced Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 471 (5).
11. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 960 (2).

Стаття надійшла 26.04.2021