

УДК 624.012

БАЗОВА ДОВЖИНА АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ А500С У СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ БАЛКАХ

В. Білозір, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-8231-1325

Р. Мазурак, д-р філософії за спеціальністю 192

ORCID ID: 0000-0001-8369-6258

Львівський національний університет природокористування

<https://doi.org/10.31734/architecture2023.24.045>

Білозір В., Мазурак Р. Базова довжина анкерування стрижневої арматури класу А500С у сталевібробетонних балках

У комбіновано армованих сталевібробетонних балках і плитах, які містять стрижневу арматуру й фібру, можливе армування елементів стрижнями лише в середині прогонів, або заведення за внутрішні грані опор частини стрижнів і обрив частини стрижнів на деякій відстані від опор. Тому важливе питання заведення стрижнів, що не доводяться до опор, за розрахунковий переріз на необхідну довжину. Це дозволяє забезпечити несучу здатність як нормальних, так і похилих перерізів комбіновано армованих сталевібробетонних згинаних елементів.

Критерієм втрати зчеплення стрижня зі сталевібробетоном є зсув його незавантаженого кінця на 0,1 мм. Витягуючі зусилля за такого зсуву не є максимальними, але оскільки тривала дія навантаження може спричинити деструктивні процеси в зоні контакту стрижня з бетоном, призначено поданий критерій.

Розроблено пропозиції щодо призначення базової довжини анкерування стрижнів у розтягнутій зоні балкових сталевібробетонних елементів, виконаних з бетону класів С20/25, С25/30, С30/35, армованих фіброю типу HE1050 за коефіцієнтів фібрового армування за об'ємом $\rho_{fv} = 0,007; 0,0125; 0,018$.

Із використанням рівняння регресії для визначення напружень на завантажених кінцях стрижнів встановлено значення базової довжини анкерування їх у сталевібробетонні за умови, що ці напруження мають бути не меншими за розрахункове значення міцності арматури на розтяг.

Показано, що базова довжина анкерування за умови, що $\sigma_{sd} \geq f_{yd}$, залежить від міцності бетону матриці. Так, наприклад, для стрижнів діаметром 8 мм, закладених у бетон класу С30/35 з відсотком армування фіброю 0,7, $l_{b,rqd}$, в 1,58 раза менша, ніж за класу бетону С20/25. За таких самих умов, але за відсотка армування фіброю 1,25, $l_{b,rqd}$ – в 1,48 рази менша, а за відсотка армування 1,8 – в 1,36 рази.

На базову довжину анкерування впливав також коефіцієнт фібрового армування за об'ємом. Так, наприклад за діаметра стрижня 10 мм, заробленого в бетон класу С20/25, і коефіцієнта фібрового армування 0,018, базова довжина анкерування в 1,42 менша, ніж за коефіцієнта фібрового армування 0,007.

Відносна базова довжина анкерування $l_{b,rqd}/\varnothing$ практично не залежить від діаметра арматури. За конкретного класу бетону і коефіцієнта фібрового армування ρ_{fv} вона приблизно однакова за кожного діаметра. Це пов'язано з тим, що індекси Рема для стрижнів суттєво не відрізнялися.

Ключові слова: сталеві фібра, сталевібробетон, стрижнева арматура, випробування на витягування, балка, анкерування.

Bilozir V., Mazurak R. The basic length of anchorage of bar reinforcement of class A500C in steel-fiber concrete beams

In combined reinforced steel-fiber concrete beams and slabs, which contain rod reinforcement and fiber, it is possible to reinforce the elements with rods only in the middle of the spans, or to wind a part of the rods behind the inner faces of the supports and break off a part of the rods at some distance from the supports. Therefore, the issue of winding the rods that are not brought to the supports, beyond the calculated cross-section to the required length, is important. This can ensure the bearing capacity of both normal and inclined sections of combined reinforced steel fiber concrete bent elements.

The criterion for the loss of the rod adhesion to steel-reinforced concrete is the displacement of its unloaded end by 0.1 mm. The pulling forces for such a shift are not maximum, but since the long-term action of the load can cause destructive processes in the area of contact of the rod with concrete, that is why the above criterion is assigned.

The task of these studies is to develop proposals for determining the basic anchoring length of rods in the stretched zone of beam steel fiber concrete elements made of concrete of classes C20/25, C25/30, C30/35, reinforced with fiber of type HE1050 with coefficients of fiber reinforcement by volume $\rho_{fv} = 0.007; 0.0125; 0.018$.

Using the regression equation used to determine the stresses at the loaded ends of the rods, obtained in our previous studies, the values of the basic length of their anchoring in steel fiber concrete are established, provided that these stresses should not be less than the calculated value of the reinforcement tensile strength.

It is shown that the basic length of anchorage, provided that $\sigma_{sd} \geq f_{yd}$ depends on the strength of the matrix concrete. So, for example, for rods with a diameter of 8 mm embedded in concrete of class C30/35 with a percentage of fiber reinforcement of 0.7, $l_{b,rqd}$ is 1.58 times smaller than for concrete of class C20/25. Under the same conditions, but with a percentage of fiber reinforcement of 1.25, $l_{b,rqd}$ is 1.48 times smaller, and with a percentage of reinforcement of 1.8 – 1.36 times.

The basic anchoring length was also influenced by the coefficient of fiber reinforcement by volume. Thus, for example, under a rod diameter of 10 mm, embedded in C20/25 class concrete and a fiber reinforcement coefficient of 0.018, the basic length of anchorage is 1.42 times less than under a fiber reinforcement coefficient of 0.007.

The relative basic anchoring length $l_{b,rqd}/\varnothing$ does not depend on the reinforcement diameter. For a specific class of concrete and the coefficient of fiber reinforcement ρ_{fv} , it is approximately the same for each diameter. This is because the Rehm indices for the rods did not differ significantly.

Key words: steel fiber, steel fiber concrete, rod reinforcement, tensile test, beam, anchoring.

Постановка проблеми. У комбіновано армованих сталевібробетонних балках і плитах, які містять стрижневу арматуру й фібру, можливе армування елементів стрижнями лише в середині прогонів, або заведення за внутрішні грані опор частини стрижнів і обрив частини стрижнів на деякій відстані від опор. Тому важливе питання заведення стрижнів, які не доводяться до опор, за розрахунковий переріз на необхідну довжину. Це дозволяє забезпечити несучу здатність як нормальних, так і похилих перерізів комбіновано армованих сталевібробетонних згинаних елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання анкерування стрижневої арматури класу A500C з фібробетоном, армованим сталевібробетоном з вигнутими кінцями українського виробництва типу HE1050, вивчали у Львівському національному університеті природокористування протягом останніх років [1–5].

У праці [1] проаналізовано чинники, що впливають на зчеплення арматури серпоподібного профілю з бетоном і фібробетоном. Показано, що фіброве армування потрібно розглядати як різновид непрямого армування, тож напруження зчеплення стрижнів з фібробетоном і напруження завантажуваних кінців стрижнів мають залежати від вмісту фібрової арматури в одиниці об'єму бетону. Тому спершу розробили математичну модель зчеплення стрижнів з фібробетоном на основі планованого повного чотирифакторного експерименту (ПФЕ 2⁴) [2]. За результатами експериментів з витягування стрижнів зі зразків призматичного типу, виконаних за використання методики [6], отримали рівняння регресії для

визначення напружень зчеплення стрижнів з фібробетоном і напружень завантажуваних кінців стрижнів.

У праці [3] показано, що напруження у стрижнях за витягування зі сталевібробетону залежать від відносної довжини анкерування, класу бетону, витрат фібри і діаметра стрижнів, а дотичні напруження – від тих же параметрів, крім відносної довжини анкерування. Отримані рівняння регресії рекомендовано використовувати для підбору класу бетону, витрат фібри і діаметра стрижнів з метою зменшення необхідної довжини зони анкерування стрижнів.

Результати випробувань на витягування стрижнів з фібробетону розтягнутої зони зразків балкового типу, виконані за методикою [7], засвідчили, що напруження зчеплення стрижнів з фібробетоном і напруження завантажуваних кінців стрижнів за інших рівних умов є меншими, ніж такі, що отримані за витягування стрижнів зі зразків призматичного типу [4].

Постановка завдання. Наше завдання – розроблення пропозицій щодо призначення базової довжини анкерування стрижнів у розтягнутій зоні балкових сталевібробетонних елементів, виконаних з бетону класів C20/25, C25/30, C30/35, армованих фібробетоном типу HE1050 за коефіцієнтів фібрового армування за об'ємом $\rho_{fv} = 0,007; 0,0125; 0,018$.

Виклад основного матеріалу. У працях [4; 5] показано, що критерієм втрати зчеплення стрижня зі сталевібробетоном є зсув його незавантаженого кінця на 0,1 мм. Витягуючі зусилля за такого зсуву не є максимальними,

але оскільки тривала дія навантаження може спричинити деструктивні процеси в зоні контакту стрижня з бетоном, призначено поданий критерій.

На основі результатів наших досліджень [2–5] та з урахуванням вимог Єврокод 2 [8], ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [9] і ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 [10], запропоновано алгоритм визначення розрахункової довжини анкерування поздовжньої розтягнутої арматури l_{bd} згинаних фібробетонних елементів:

1. Визначають переріз, щодо якого встановлюється l_{bd} (наприклад, місце теоретичного обриву стрижнів, які не доводяться до опор, грань опори консольного

$$l_{b,rqd} = (\emptyset/4)(\sigma_{sd}/f_{bd}), \quad \dots\dots\dots (1)$$

де \emptyset – діаметр стрижня.

5. Визначають розрахункову довжину анкерування l_{bd} за формулою норм [8; 9]:

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min}, \quad (2)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – коефіцієнти, які визначають за таблицею 7.2 ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [9];

$l_{b,min}$ – мінімальна довжина анкерування, яку для анкерування при розтягові приймають з умови:

$$l_{b,min} \geq \max(0,3l_{b,rqd}; 10\emptyset; 100\text{мм}). \quad (3)$$

У праці [5] отримано рівняння регресії для визначення напружень завантажуваних кінців стрижнів $\sigma_{s,0,1}$ за зсуву 0,1 мм в елементах балкового типу:

$$\sigma_{s,0,1} = 0,81 \left[408,43 + 58,29 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 81,69 \frac{l_b/\emptyset - 10}{2} + 38,64 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 6,22 \frac{\emptyset - 10}{2} + 11,66 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_b/\emptyset - 10}{2} \right) + 5,52 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) + 7,73 \left(\frac{l_b/\emptyset - 10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) \right] \quad (4)$$

де $f_{cm,prism}$ – середнє значення призмової міцності бетону-матриці; l_b – довжина закладання стрижнів у фібробетон.

Отже, напруження σ_{sd} можуть мати різні значення і, відповідно, базова довжина анкерування, обчислена за формулою (1), також. Однак за проектування конструкцій необхідно прагнути, щоб витрати арматури були щонайменшими за гарантованої надійності цієї конструкції. Тому мала б виконуватися умова:

$$\sigma_{sd} = f_{yd} = \alpha_{cc} \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \quad (5)$$

де f_{yd} – розрахункове значення міцності стрижневої арматури за розтягу;

α_{cc} – коефіцієнт умов роботи, який Єврокод 2 [8] рекомендує приймати таким, що дорівнює 1;

$\gamma_s = 1,15$ – коефіцієнт надійності за матеріалом.

Отже, за формулою (5) $f_{yd} = 434,78$ МПа для арматури класу А500С. Увівши в рівняння (5) замість призмової міцності $f_{cm,prism}$ розрахункове значення міцності бетону на стиск f_{cd} , а замість довжини закладання стрижнів у фібробетон l_b – базову довжину анкерування $l_{b,rqd}$, отримуємо:

елемента, в прольоті якого частина стрижнів обривається, тощо).

2. За деформаційним методом, сутність якого подана в ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [9], визначають напруження у стрижнях σ_{sd} визначеного перерізу.

3. Визначають розрахункове значення граничних напружень зчеплення стрижнів з фібробетоном f_{bd} [4; 5].

4. Визначають необхідну базову довжину анкерування $l_{b,rqd}$ стрижнів за формулою норм [8; 9]:

$$\sigma_{sd} = 0,81 \left[408,43 + 58,29 \frac{f_{cd}^{-30,41}}{4,34} + 81,69 \frac{l_{b,rqd}/\varnothing - 10}{2} + 38,64 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 6,22 \frac{\varnothing - 10}{2} + 11,66 \left(\frac{f_{cd}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_{b,rqd}/\varnothing - 10}{2} \right) + 5,52 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) + 7,73 \left(\frac{l_{b,rqd}/\varnothing - 10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) \right] \quad (6)$$

Використовуючи рівняння (6), в Excel підбором знаходили такі цілочисельні значення $l_{b,rqd}$, щоб виконувалася умова $\sigma_{sd} \geq f_{yd}$. У табл. 1–3 подані результати розрахунків базової довжини анкерування стрижнів діаметром 8, 10 і 12 мм.

Аналізуючи дані табл. 1–3, можна зауважити, що базова довжина анкерування за умови $\sigma_{sd} \geq f_{yd}$ залежить від міцності бетону

матриці. Так, наприклад, для стрижнів діаметром 8 мм, закладених у бетон класу С30/35 з відсотком армування фіброю 0,7 (табл. 1), $l_{b,rqd}$ в 1,58 раза менша, ніж за класу бетону С20/25. За таких самих умов, але за відсотка армування фіброю 1,25, $l_{b,rqd}$ в 1,48 раза менша, а за відсотка армування 1,8 – в 1,36 раза.

Таблиця 1

Базова довжина анкерування арматури класу А500С діаметром 8 мм у сталевіробетоні

Клас бетону	f_{cd} , МПа	f_{yd} , МПа	ρ_{fv}	\varnothing , мм	$l_{b,rqd}$, мм	σ_{sd} , МПа	σ_{sd}/f_{yd}
С20/25	13,33	434,78	0,007	8	304	444,61	1,02
С25/30	16,67				232	444,24	1,02
С30/35	20,00				192	452,74	1,04
С20/25	13,33		0,0125		248	444,47	1,02
С25/30	16,67				200	448,32	1,03
С30/35	20,00				168	451,87	1,04
С20/25	13,33		0,018		208	435,77	1,002
С25/30	16,67				176	448,63	1,03
С30/35	20,00				152	457,11	1,05

Таблиця 2

Базова довжина анкерування арматури класу А500С діаметром 10 мм у сталевіробетоні

Клас бетону	f_{cd} , МПа	f_{yd} , МПа	ρ_{fv}	\varnothing , мм	$l_{b,rqd}$, мм	σ_{sd} , МПа	σ_{sd}/f_{yd}
С20/25	13,33	434,78	0,007	10	370	438,28	1,02
С25/30	16,67				280	434,27	0,99
С30/35	20,00				230	439,15	1,01
С20/25	13,33		0,0125		300	435,01	1,001
С25/30	16,67				240	435,23	1,001
С30/35	20,00				200	435,15	1,001
С20/25	13,33		0,018		260	440,819	1,01
С25/30	16,67				220	453,67	1,04
С30/35	20,00				180	437,26	1,01

На базову довжину анкерування впливав також коефіцієнт фібрового армування за об'ємом. Так, наприклад за діаметра стрижня 10 мм (див. табл. 2), заробленого в бетон класу

C20/25, і коефіцієнта фібрового армування 0,018, базова довжина анкерування в 1,42 менша, ніж за коефіцієнта фібрового армування 0,007.

Таблиця 3

Базова довжина анкерування арматури класу A500C діаметром 12 мм у сталевібробетоні

Клас бетону	f_{cd} , МПа	f_{yd} , МПа	ρ_{fv}	\emptyset , мм	$l_{b,rqd}$, мм	σ_{sd} , МПа	σ_{sd}/f_{yd}
C20/25	13,33	434,78	0,007	12	444	443,32	1,02
C25/30	16,67				336	439,31	1,01
C30/35	20,00				276	444,19	1,02
C20/25	13,33		0,0125		360	440,05	1,01
C25/30	16,67				288	440,27	1,01
C30/35	20,00				240	440,19	1,01
C20/25	13,33		0,018		312	445,84	1,03
C25/30	16,67				264	458,71	1,06
C30/35	20,00				216	442,29	1,02

Відносна базова довжина анкерування $l_{b,rqd}/\emptyset$ практично не залежить від діаметра арматури. За конкретного класу бетону і коефіцієнта фібрового армування ρ_{fv} вона

приблизно однакова за кожного діаметра (табл. 4, 5). Це пов'язано, очевидно, з тим, що індекси Рема для стрижнів суттєво не відрізнялися.

Таблиця 4

Геометричні характеристики арматурних стрижнів

Діаметр стрижнів \emptyset , мм	Середній крок поперечних ребер t , мм	Середній кут нахилу поперечних ребер β , град.	Середня максимальна висота поперечних ребер h , мм	Середня площа бічної грані одного поперечного виступу F_r , мм ²	Середня відносна площа змінання поперечних виступів (індекс Рема) f_r
8	5,39	60	0,61	4,42	0,0565
10	6,52	60	0,74	6,71	0,0568
12	7,95	60	0,91	9,90	0,0572

Вплив діаметра стрижневої арматури на відносну базову довжину анкерування $l_{b,rqd}/\varnothing$

Клас бетону	ρ_{fv}	\varnothing , мм	$l_{b,rqd}$, мм	$l_{b,rqd}/\varnothing$
C20/25	0,007	8	304	38
		10	370	37
		12	444	37
C25/30	0,0125	8	232	29
		10	280	28
		12	336	28
C30/35	0,018	8	152	19
		10	180	18
		12	216	18

Відносну площу змінання поперечних виступів f_r (індекс Рема) визначали за результатами вимірювання геометричних параметрів трьох стрижнів кожного діаметра за формулою ДСТУ 3760:2006 мікрометром та штангенциркулем за формулою [11]:

$$f_r = \frac{KF_r \sin \beta}{\pi d_n t}, \quad (7)$$

де F_r – площа бічної грані одного поперечного виступу; β – кут нахилу поперечного виступу; d_n – номінальний діаметр прутка; t – відстань (крок) між поперечними виступами; K – число поперечних виступів по периметру (для прутків зі серпоподібним профілем $K = 2$).

Значення відносної площі змінання визначали за формулою (Б. 2) і рис. Б. 1 [11]. Відношення індексів Рема стрижнів діаметром 12 мм і 8 мм дорівнює 1,012. Однак ця несуттєва різниця позначилася на відповідному коефіцієнті рівняння регресії (4).

Висновки. Унаслідок використання рівняння регресії для визначення напружень на завантажених кінцях стрижнів розтягнутої зони балкових елементів, отриманого в наших попередніх дослідженнях, встановлені значення базової довжини анкерування їх у сталевібробетоні за умови, що ці напруження мають бути не меншими за розрахункове значення міцності арматури на розтяг. Показано, що базова довжина анкерування залежить від класу бетону, вмісту фібрової арматури і практично не залежить від діаметра стрижнів через близькі значення індексів Рема.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальне визначення коефіцієнтів $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ рівняння (2), за яким визначають розрахункову довжину анкерування l_{bd} стрижнів у сталевібробетоні.

Бібліографічний список

1. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Аналіз чинників, що впливають на зчеплення арматури серпоподібного профілю з бетоном і фібробетоном. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. Вип. 14. С. 47–54.

2. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Математична модель зчеплення стрижневої арматури зі сталевібробетоном. *Ресурсо-економічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. Вип. 41. С. 103–109.

3. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Анкерування стрижневої арматури класу А500С у сталевібробетоні. *Вісник Львівського національного університету природокористування: архітектура та будівництво*. 2022. № 23. С. 19–26.

4. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Зчеплення стрижневої арматури класу А500С зі сталевібробетоном зразків балкового типу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2022. Вип. 18. Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 22–33.

5. Мазурак Р. А. Анкерування стрижневої арматури у фібробетоні: дис. ... д-ра філософії в галузі техн. наук: 192. Дубляни, 2023. 193 с.

6. TC R. RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983. *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. New York, USA: E & FN SPON, 1994. P. 218–220.

7. TC R. RC 5 Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test, 1982. *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. New York, USA: E & FN SPON, 1978. P. 213–217.

8. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Ч. 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1992-1-1: 2004, IDT): ДСТУ-Н Б EN1992-1-1: 2010. Введ. в дію 01.07.2013. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 118 с.

9. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону.

Правила проектування: [чинний від 2011-06-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 116 с. (Національний стандарт України).

10. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення констру з дисперсноармованого бетону. Київ: УкрНДНЦ, 2017. 35 с.

11. ДСТУ 3760:2006. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. Чинний від 2007-10-01. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 28 с.

Стаття надійшла 25.08.2023