ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ АНКЕРУВАННЯ АРМАТУРНИХ СТРИЖНІВ У СТАЛЕФІБРОБЕТОНІ

Р. Мазурак, аспірант

ORCID ID: 0000-0001-8369-6258

Львівський національний аграрний університет

<https://doi.org/10.31734/architecture2021.22.047>

Мазурак Р. Огляд досліджень анкерування арматурних стрижнів у сталевібробетоні

Відображено, що анкерування стрижневої арматури періодичного профілю забезпечується її зчепленням із бетоном. Ураховано чинники, які впливають на процес зчеплення. Зчеплення між арматурними стрижнями та бетоном – важливий чинник, який забезпечує роботу залізобетонних конструкцій. Зусилля в зоні контакту стрижнів із бетоном зумовлюються адгезією, тертям на поверхні контакту і розклинюванням, спрямованим по нормалі до поперечних ребер стрижнів. Розклинювальна сила, що виникає внаслідок тиску поперечних ребер арматури на бетон, обумовлює конусоподібні і радіальні мікротріщини. Процесу розвитку тріщин перешкоджає бетон навколо, який може бути посилений фібровою арматурою. Це призводить до заклинювання стрижнів і зростання як радіальних, так і максимальних зусиль під час витягування їх із бетону.

Розглянуто найпоширеніші методи, оцінки міцності зчеплення арматурних стрижнів у бетоні випробуванням на витягування стрижнів із призматичних зразків і з розтягнутої зони балок.

Бібліографічний огляд допоміг вивчити літературні джерела, які висвітлювали питання анкерування арматури в бетоні, і спрямувати дослідження на вивчення зчеплення з бетоном стрижнів малих діаметрів і розширення діапазону довжин закладання стрижнів у бетон, аби розширити уявлення про вплив цього параметра на поведінку зв'язку.

Аналіз теоретико-експериментальних досліджень низки авторів засвідчив, що на анкерування арматурних стрижнів впливають: клас бетону матриці, діаметр стрижневої арматури, відсоток фібрової арматури, форма і довжина фібри, відношення довжини фібри до її діаметра, співвідношення величини захисного шару сталевібробетону до діаметра арматурного стрижня періодичного профілю.

Спрогнозовано параметри, які можуть впливати на величину напружень за витягування зі сталевібробетону арматурних стрижнів, зокрема попередньо напружених елементів.

Ключові слова: клас бетону, фібра, армування, діаметр стрижнів, зчеплення, дотичні напруження.

Mazurak R. Review of the studies of anchoring of the reinforcing bars in reinforced concrete

It is shown that anchoring of the rod reinforcement of the periodic profile is provided by its adhesion to the concrete. The factors influencing the adhesion process are also taken into account.

The adhesion between the reinforcing bars and the concrete is an important factor that ensures the operation of reinforced concrete structures. The forces in the area of contact of the rods with the concrete are due to adhesion, friction on the contact surface and wedging, directed normally to the transverse ribs of the rods. The wedging force, which occurs due to the pressure of the transverse ribs of the concrete reinforcement, causes conical and radial microcracks. The process of crack development is hindered by the surrounding concrete, which can be reinforced with fiber reinforcement, which leads to jamming of the rods and the growth of both radial forces and maximum forces when pulling the rods from the concrete.

The research considers the most common methods for estimation of the strength of adhesion of the reinforcing bars in concrete by testing the extraction of bars from prismatic samples and from the stretched zone of beams.

The proposed bibliographic review allowed studying the literature sources that covered the anchoring of reinforcement in concrete and focusing future research on the study of adhesion to concrete rods of small diameters and expanding the range of lengths of rods in the concrete to expand the parameter impact on communication behavior.

The analysis of theoretical and experimental studies of many authors proves that anchoring of the reinforcing bars is influenced by the class of matrix concrete, diameter of rod reinforcement, percentage of fiber reinforcement, shape and length of fiber, ratio of fiber length to its diameter, ratio of steel layer diameter to profile.

Parameters that can affect the magnitude of stresses during the extraction of reinforced concrete reinforcing bars, including prestressed elements, are predicted.

Key words: class of concrete, fiber, reinforcement, diameter of rods, coupling, tangential stresses.

Постановка проблеми. Надійність залізобетонних конструкцій забезпечується багатьма чинниками, зокрема анкеруванням кінців стрижневої арматури як на опорних ділянках, так і в місцях стику стрижнів внапуск, обривання частини стрижнів, які не доводять до опор, тощо. З огляду на це на кінцях стрижнів необхідно

знижувати розрахунковий опір арматурної сталі. Анкерування стрижневої арматури періодичного профілю найчастіше забезпечується зчепленням її з бетоном. За додавання до бетону фібри вона виконує роль непрямого армування, яке позитивно впливає на зчеплення стрижнів із бетоном, однак це потребує додаткового вивчення, що обумов-

лено насамперед великою кількістю типів сталевих фібри. У цій праці проаналізовано результати експериментально-теоретичних досліджень анкерування арматурних стрижнів у сталеві фібробетони, що дало змогу конкретизувати окремі напрями подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Зчеплення між арматурними стрижнями та бетоном уможливорює існування залізобетонних конструкцій. Зусилля в зоні контакту стрижнів із бетоном зумовлюються адгезією, тертям по поверхні контакту і розклинюванням, спрямованим по нормалі до поперечних ребер стрижнів [1]. Розклинювальна сила виникає в результаті тиску поперечних ребер арматури на бетон, унаслідок чого виникають конусоподібні і радіальні мікротріщини. Розвитку цих тріщин перешкоджає бетон навколо, який може бути посилений фібровою арматурою, що призводить до заклинювання стрижнів і зростання як радіальних, так і максимальних зусиль за витягування стрижнів із бетону.

Зв'язок між міцністю зчеплення і зміщенням незавантаженого кінця стрижня вивчається експериментально. Найпоширенішими методами, що застосовуються для вивчення цього зв'язку, є випробування на витягування стрижнів із призматичних зразків і з розтягнутої зони балок. Випробування на витягування, згідно з рекомендаціями RILEM-CEB-FIP-RC6, полягає у витяганні центрально закладеного під час бетонування сталевих арматурного стрижня у бетонний кубічний зразок. Контрольованими параметрами є сила, прикладена до стрижня, і переміщення незавантаженого кінця стрижня [2]. За випробування балкових зразків за рекомендаціями RILEM-CEB-FIP-RC5 контрольованими параметрами є зусилля, яке передається на балку, та зміщення ненавантаженого кінця стрижня, розташованого у розтягнутій зоні [3].

Постановка завдання. Завдання дослідження – аналіз вибраних наукових статей та визначення можливих подальших напрямів досліджень анкерування стрижневої арматури у сталеві фібробетони.

Виклад основного матеріалу. У праці [4] виконано аналітичний огляд публікацій з 2006 до 2016 року, у яких подано результати експериментально-теоретичних досліджень зчеплення арматурних стрижнів із бетоном. Автори виконали бібліометричний аналіз. Це дало змогу визначити журнали та авторів, які висвітлювали питання ан-

керування арматури в бетоні. Зроблено висновок, що майбутні дослідження потрібно спрямувати на вивчення зчеплення з бетоном стрижнів малих діаметрів ($d < 10$ мм) та розширення діапазону довжин закладання стрижнів у бетон, щоб поліпшити уявлення про вплив цього параметра на поведінку зв'язку. Щодо зчеплення стрижнів зі сталеві фібробетоном, то у цій праці згадано лише статтю [5], яка, як з'ясувалося, є продовженням досліджень, виконаних раніше.

Іспанські дослідники Е. Garcia-Taengua, J. R. Marti-Vargas та Р. Serna-Ros виконали експериментальні дослідження зчеплення арматурних стрижнів класу В 500 S діаметром 8, 16 і 20 мм за витягування їх із бетонних і сталеві фібробетонних призм (за вмісту фібри 40 і 70 кг/м³) з міцністю бетону-матриці на стиск 30 МПа [6]. Використовували фібри зі загнутими кінцями двох типів: довжиною 50 мм (відношення довжини до діаметра фібри – 80) і довжиною 60 мм (відношення довжини до діаметра фібри – 65). У зразках змінним був також захисний шар бетону C (рис. 1), який приймали рівним 30 мм, п'яти діаметрам стрижня і середньому значенню між ними. Розмір S приймали не меншим за 200 мм.

Під час витягування стрижнів (рис. 2) фіксували зусилля, що відповідають переміщенню його незавантаженого кінця на 0,01, 0,1 і 1 мм, і визначали середнє значення дотичних напружень τ_{av} при цих переміщеннях за стандартом UNE-EN 10080. Також визначали максимальне значення дотичних напружень τ_{max} і максимальне переміщення незавантаженого кінця стрижня s_{max} .

Рис. 1. Схема розміщення арматурного стрижня [5; 6].

У цій праці вказано, що використання фібри довжиною 60 мм (відношення довжини до

діаметра фібри – 65) порівняно з фіброю довжиною 50 мм (відношення довжини до діаметра фібри – 80) забезпечує отримання більших значень дотичних напружень у момент втрати зв'язку. Порівняно зі зразками без фібри її додавання за витрат 40 кг/м^3 , коли використовувалася фібра довжиною 60 мм, максимальні напруження збільшилися на 21,0 % – 47,8 %, а $s_{\max}$ – не більше, ніж на 10,3 %.

За використання волокон довжиною 50 мм пікові напруження зросли не більше, ніж на 5,7 %, а $s_{\max}$ збільшилися на 78,6–86,5 %. Автори вка-

зують також на те, що вміст фібри суттєво впливає на витягувальні зусилля, але для цього він має дорівнювати приблизно 1 % від об'єму бетону.

У цій праці відображено, що за витягування стрижнів діаметром 20 мм з бетону без фібрового армування при захисному шарі 30 мм відбулося розколювання зразка, що добре кореспондується з результатами, отриманими іншими дослідниками [7], які вказують на те, що сталеві волокна зменшують ризик розколювання захисного шару, сприяють підвищенню в'язкості руйнування за витягування стрижневої арматури з бетонних призм.

Рис. 2. Випробування на витягування сталевих арматурних стрижнів із бетону і сталевібробетону [5; 6].

Garcia-Taengua E., Marti-Vargas J. R. і Serna P у праці [8] висвітлили результати експериментальних досліджень анкерування стрижневої арматури класу В 500 S у бетоні прямокутних призм товщиною 200 мм. Факторами експерименту були: міцність бетону на стиск f_c (32, 48 і 44 МПа), діаметр стрижнів D (8, 12, 16 і 20 мм), захисний шар бетону C (відстань від бокової поверхні стрижня до двох найближчих сторін призми: від 20 до 100 мм), вміст фібрової арматури C_f (0, 40, 60, 70 кг/м^3), відношення λ_f довжини фібри l_f до її діаметра d_f (45, 65 і 80) та довжина фібри l_f (35, 50 і 60 мм). Довжина закладання стрижнів у бетон прийнята $l_e = 5D$. Було випробувано 3 серії зразків, які відрізнялися міцністю бетону. У серіях змінними були параметри, подані вище. Сумарно випробувано 81 зразок.

Автори вказують на те, що за певних значень відношення товщини захисного шару бетону до

діаметра стрижнів C/D відбулося в усіх чи окремих зразках розколювання призм, і максимальні напруження у стрижнях безпосередньо перед розколюванням визначити не вдалося.

Подальший аналіз результатів цих досліджень відображено у праці [5]. Автори вказують, що максимальні зусилля за витягування стрижнів зростають із підвищенням міцності бетону. Причому це найбільше впливає на міцність зв'язку між бетоном і стрижнями за інших рівних умов. Під час збільшення діаметра арматури зростають максимальні дотичні напруження, оскільки поперечні ребра стрижнів більшого діаметра є вищими. Автори також вказують на те, що збільшення захисного шару бетону та вмісту фібри також позитивно впливає на максимальні дотичні напруження, але суттєво менше за вплив міцності бетону та діаметра стрижнів. Виявлено, що за інших рівних умов коротші волокна порівняно з довгими

забезпечують підвищення максимальних дотичних напружень між стрижнями і бетоном. Автори отримали напівемпіричну формулу для визначення максимальних дотичних напружень:

$$\tau_{max} = 70.07 - 4.43f_c + 0.068f_c^2 + 0.026D^2 + 1.03\frac{c}{D} + \nabla_f C_f, \quad (1)$$

де $\nabla_f = 0.51 - 0.0024\lambda_f - 0.0054l_f$.

Bandelt M. J., Billington S. L. [9] досліджували анкерування стрижневої арматури діаметром 16 мм, з'єднаної внапуск довжиною 160 мм у середині прольоту балок, виконаних із бетону і сталевібробетону (рис. 3).

Сталевібробетонні балки містили 1,5 % за об'ємом фібрової арматури зі загнутими кінцями довжиною 38 мм і діаметром 0,38 мм та 1,3 % такого ж типу фібрової арматури довжиною 30 мм і діаметром 0,55 мм.

Експериментально встановлено, що за 1,5 % фібрового армування максимальні дотичні напруження зчеплення під час руйнування у середньому були на 39 % більшими, ніж у балках без фібри, а

при 1,3 % – на 33 %. Автори вказують на те, що такий ефект дозволяє приблизно на 30 % зменшувати довжину напуску стрижнів за комбінованого армування порівняно з традиційним, а максимальні напруження зчеплення стрижнів визначати за формулою:

$$u = 0.78 \bar{f}_c \frac{c+K_c}{d_b} \leq 0.57 \bar{f}_c, \quad (2)$$

де $\bar{f}_c$ – міцність бетону на стиск (МПа); c – менше зі значень (боковий захисний шар, нижній захисний шар, пів відстані між стрижнями, що стикаються), мм;

$$K_c = \frac{0.45cV_f L}{d_f},$$

де V_f – об'ємна частка волокна; L – довжина фібри, мм; d_f – діаметр фібри, мм.

Narajli M. H., Namad B. і Karam K. [10] дослідили особливості анкерування стрижнів діаметром $d_b=16, 20, 25$ і 32 мм, з'єднаних внапуск у середині прольоту 32 балок (відстань між стрижнями 6.5, 6.0, 12.0 та 9.0 мм відповідно), виконаних із бетону міцністю на стиск 28 МПа (рис. 4).

Рис. 3. Геометрія досліджуваних зразків: (а) – вигляд збоку; (б) – вигляд зверху; (с) – розріз [9].

Рис. 4. Розміри та армування: а – вигляд збоку; б – вигляд низу (розтягнута грань) [10].

Змінними параметрами в експериментах були також відношення товщини захисного шару бетону c до діаметра стрижня d_b ($c/d_b = 0,56, 0,88, 1,0, 1,34, 1,5$ і $2,0$) і відсоток фібрового армування за об'ємом V_f ($V_f = 0; 0,5; 1,0; 2,0\%$). Сталева фібра зі загнутими кінцями мала довжину $L = 30$ мм і діаметр $d_f = 0,5$ мм.

За результатами випробувань балок установлено, що максимальні дотичні напруження стрижнів балок без фібри:

$$u_{\max \text{ plain}} = 0,75 \bar{f}_c \frac{c}{d_b}^{2/3} \leq 0,57 \bar{f}_c, \quad (3)$$

а для комбіновано армованих балок:

$$u_{\max} = c_f u_{\max \text{ plain}}, \quad (4)$$

де $c_f = 1$ при $V_f L d_f \leq 0,25$;

при $V_f L d_f > 0,25$. $c_f = 1 + 0,34 \sqrt{V_f L d_f - 0,25}$.

Учені відзначили, що додавання 1 і 2 % фібри за об'ємною часткою збільшило міцність зв'язку за витягування стрижнів у середньому на 26 та 33 %.

Наражі М. Н. у працях [11; 12] висвітлив результати експериментально-теоретичних досліджень балок, армованих фіброю із загнутими

кінцями довжиною 30 мм і діаметром 0,5 мм фірми Dramix і стрижнями діаметром 20 і 25 мм, зістикованими у розтягнутій зоні з напуском 100 і 125 мм відповідно, під дією циклічних навантажень. Відсоток армування фіброю за об'ємом дорівнював 1 і 2 %. З'ясувалося, що фіброве армування забезпечило зростання міцності зв'язку порівняно з балками без фібри на 30–80 %.

Shih-Ho Chao, Antoine E. Naaman і Gustavo J. Parra-Montesinos [13] досліджували міцність зчеплення арматурних стрижнів діаметром 16 і 25 мм номінальною міцністю на розрив 420 МПа, закладених у призми $150 \times 150 \times 102$ мм з бетону і сталефібробетону на довжину 102 мм, за дії циклічних навантажень. Випробовували також зразки, які містили сталеву спіральну арматуру з межею текучості 207 МПа і тимчасовим опором 317 МПа, насаджену на арматурні стрижні, за її витрат, що дорівнюють 2 % від об'єму бетону. Сталева фібра зі загнутими кінцями мала довжину 30 мм і діаметр 0,55 мм. Автори встановили, що армування фібровою арматурою при об'ємному вмісті фібри 2 % забезпечило збільшення напружень зчеплення стрижнів із бетоном на 60 %

порівняно зі спіральним побічним армуванням. Кількість циклів завантаження фібробетонних зразків без погіршення жорсткості зв'язку була приблизно втричі більшою, ніж у спіральні армованих зразків.

Chu S. H. та Kwan A. K. H. [14] досліджували зчеплення арматури класу HRB500 діаметром 12 мм з межею текучості 530 МПа і тимчасовим опором 663 МПа з бетоном і сталеві фібробетоном кубів із ребром 150 мм циліндричною міцністю 50.1 МПа. Довжина закладання стрижнів у бетон дорівнювала 50 мм. В експериментах використовували фібру з загнутими кінцями (рис. 5) при відсотках армування за об'ємом кубів від 0,2 до 1,6.

Рис. 5. Геометричні розміри фібрової арматури [14].

Деформації на контакт «бетон-стрижень» вимірювали з боку завантаженого кінця. Результати експериментів засвідчили, що фіброве армування незначно впливало на початок зсуву стрижнів, проте суттєвим був його вплив, залежно від геометрії фібри і її витрат, на максимальні напруження за повної втрати зчеплення. Так, прирізом, максимальні дотичні напруження за витягування стрижнів із бетону дорівнювали 16.74 МПа, а з бетону, армованого фіброю типу SC (рис. 5) при об'ємному відсотку армування 1,6 %, – 27,12 МПа. Автори запропонували максимальні дотичні напруження за витягування стрижнів зі сталеві фібробетону τ_b визначати за формулою:

$$\tau_b = \tau_{b0} (1 + \alpha x^{0.7}), \quad (5)$$

де τ_{b0} – максимальні дотичні напруження за витягування стрижнів із неармованого бетону; α – емпіричний коефіцієнт, який можна визначити шляхом регресійного аналізу; x – відсоток фібрового армування за об'ємом.

Коефіцієнт α може мати значення в межах 0,21–0,40 при коефіцієнті детермінації R^2 в межах

0,712–1,000. Автори встановили, що він залежить від класу бетону і може визначатися за формулою:

$$\alpha = 0.0072 f_c. \quad (6)$$

Xuhui Zhang, Wei Zhang, Cuodong Cao, Fu Xu, Caiqian Yang [15] досліджували вплив намагнічування стрижня, до якого притягувалася фібра під час бетонування, на напруження під час витягування стрижня з тіла сталеві фібробетону. Встановлено, що збільшення інтенсивності магнітного поля до 30 мТл підвищило напруження на початку зсуву незавантаженого кінця стрижня в середньому на 28,2 % і на 20,8 % – максимальні напруження за витягування. Максимальний приріст цих напружень дорівнював 50 %. Науковці вказують, що за 1,5 % фібрового армування від об'єму бетону приріст напружень у попередньо намагніченому стрижні на початку зсуву не спостерігався, тому рекомендують використовувати за такого способу вміст фібри в межах 0,25 % – 0,75 %.

Висновки. Результати експериментальних досліджень, висвітлених у цьому огляді, свідчать про те, що на значення дотичних напружень за витягування зі сталеві фібробетону сталевих арматурних стрижнів періодичного профілю впливають, крім міцності бетону-матриці, об'ємний вміст фібрової арматури, довжина фібри, відношення довжини фібри до її діаметра, діаметр стрижневої арматури, відношення товщини захисного шару бетону до діаметра стрижня. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення впливу тривалої дії навантаження, орієнтації фібрової арматури в контактній зоні на початок зсуву незавантажених кінців стрижнів і максимальні напруження зчеплення. Також потребують вивчення питання щодо обґрунтування призначення необхідної довжини анкерування стрижнів, які входять до складу в'язаних сіток, у місці їх стику внапуск у плитних конструкціях за відстані між стрижнями, скажімо, 5–10 см. Виникає потреба й у вивченні питань анкерування стрижнів сталеві фібробетонних балок, коли частина цих стрижнів не доводиться до опор, а також щодо призначення довжини анкерування стрижнів на опорах балок. Цікавим питанням, яке може привернути увагу дослідників, є вивчення впливу фібрового армування на довжину зони передачі напружень з арматури на сталеві фібробетон попередньо напружених елементів, оскільки попереднє напруження є радикальним способом забезпечення корозійної стійкості фібрової арматури.

Бібліографічний список

1. Rehm G. The basic principles of the bond between steel and concrete: Translation № 134. Cement and concrete association. London, 1968. 66 p.
2. 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.
3. 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.
4. Fernandes D. S. G., de Azevedo R. C., Carvalh E. P., Mirand M. P. A Review on the Study of Bond Behavior between Reinforcement Thin Bars and Concrete. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2017. Vol. 6 (70). P. 125–130.
5. E. Garcia-Taengua, J. R. Marti-Vargas, P. Serna. Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2016. Vol. 105. P. 275–284.
6. E. Garcia-Taengua, J. R. Marti-Vargas, P. Serna-Ros. Statistical approach to effect of factors involved in bond performance of steel fiber-reinforced concrete. *ACI Structural Journal*. 2011. Vol. 108 (4). P. 461–468.
7. Holschemacher K., Weiße D. Bond of Reinforcement in Fibre Reinforced Concrete. Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes 20–22 September 2004. Varenna, Italy: RILEM Publications SARL. P. 349–358.
8. E. Garcia-Taengua, J. R. Marti-Vargas, P. Serna. Splitting of concrete cover in steel fiber reinforced concrete: Semi-empirical modeling and minimum confinement requirements. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66. P. 743–751.
9. Bandelt M. J., Billington S. L. Bond behavior of steel reinforcement in high-performance fiber-reinforced cementitious composite flexural members. *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49. P. 71–86.
10. Harajli M. H., Hamad B., Karam K. Bond-slip Response of Reinforcing Bars Embedded in Plain and Fiber Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2002. Vol. 14. P. 503–511.
11. Harajli M. H. Effect of confinement using steel, FRC, or FRP on the bond stress-slip response of steel bars under cyclic loading. *Materials and Structures*, 2006. Vol. 39. P. 621–634.
12. Harajli M. H. Bond Stress–Slip Model for Steel Bars in Unconfined or Steel, FRC, or FRP Confined Concrete under Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2009. Vol. 135. P. 509–518.
13. Chao S.-H., Naaman A. E., Parra-Montesinos G. J. Bond Behavior of Reinforcing Bars in Tensile Strain-Hardening Fiber-Reinforced Cement Composites. *ACI Structural Journal*. 2009. V. 106. № 6. P. 897–906.
14. Chu S. H., Kwan A. K. H. A new bond model for reinforcing bars in steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 104. 12 p.
15. Zhang X., Zhang W., Cao C., Xu F., Yang C. Positive effects of aligned steel fiber on bond behavior between steel rebar and concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 114. 11 p.

Стаття надійшла 30.07.2021