

## Розділ 2

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ДІАГНОСТИКА РОБОТИ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

УДК 624.012

## АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ А500С У СТАЛЕФІБРОБЕТОНІ

**В. Білозір, к. т. н.**

*ORCID ID: 0000-0002-8231-1325*

**Р. Мазурак, здобувач**

*ORCID ID: 0000-0001-8369-6258*

*Львівський національний університет природокористування*

<https://doi.org/10.31734/architecture2022.23.019>

### **Білозір В., Мазурак Р. Анкерування стрижневої арматури класу А500С у сталеві фібробетоні**

Анкерування арматурних стрижнів періодичного профілю за рахунок зчеплення з бетоном забезпечує спільну роботу цих матеріалів у конструкціях. Зусилля, які виникають у зоні контакту стрижнів і бетону, залежать від адгезії, тертя по поверхні контакту і розклинювання, перпендикулярного до поперечних ребер стрижнів. Посилення бетону фібровою арматурою сприяє заклинюванню стрижнів, збільшенню значень як радіальних зусиль, так і максимальних зусиль за витягування стрижнів із бетону.

Програмою наших досліджень передбачено вивчення впливу міцності бетону (класи бетону С20/25 і С30/35), відношення довжини анкерування стрижня до його діаметра (8 і 12), коефіцієнта фібрового армування за об'ємом (0,007 і 0,018) і діаметра стрижнів (8 і 12 мм) на розвиток зсувів і напруження у стрижнях. Експериментальні дослідження передбачали випробування стрижнів арматури класу А500С, зароблених по центру основи призматичних зразків розмірами 150×150×200 мм, на витягування.

Використано повний чотирифакторний план експерименту (план 2<sup>4</sup>) і отримані рівняння регресії для напружень у стрижнях на початковій зсуву, за зсуву 0,1 мм (умовний критерій міцності зчеплення) і для максимальних значень напружень.

Аналіз отриманих рівнянь регресії плану експерименту 2<sup>4</sup> засвідчив, що вміст фібрового армування суттєво впливає на подані вище напруження. Так, наприклад, за довжини закладання 144 мм стрижнів Ø12 мм у бетон класу С30/35, армований 1,8 % фібри за об'ємом, напруження у стрижнях за зсуву 0,1 мм дорівнювали в середньому 622,39 МПа, а за вмісту фібри 0,7 % – 514,81 МПа. За довжини закладання 144 мм стрижнів Ø12 мм у бетон класу С20/25, армований 1,8 % фібри за об'ємом, напруження у стрижнях за зсуву 0,1 мм дорівнювали в середньому 446,92 МПа, а за вмісту фібри 0,7 % – 386,22 МПа. За довжини закладання 64 мм стрижнів Ø8 мм у бетон класу С20/25, армований 1,8 % фібри за об'ємом, напруження у стрижнях за зсуву 0,1 мм дорівнювали в середньому 301,94 МПа, а за вмісту фібри 0,7 % – 249,76 МПа.

**Ключові слова:** сталева фібра, сталеві фібробетон, стрижнева арматура, випробування на витягування, зчеплення.

### **Bilozir V., Mazurak R. Anchoring of rod reinforcement of class A500C in steel fiber concrete**

Anchoring of reinforcement rods of a periodic profile due to adhesion with concrete ensures the joint operation of these materials in structures. The forces that arise in the area of contact between the rods and concrete depend on adhesion, friction on the contact surface and wedging perpendicular to the transverse ribs of the rods. Reinforcement of concrete with fiber reinforcement contributes to jamming of rods, increasing the values of both radial forces and maximum forces for pulling rods out of concrete.

The program of our research includes the study of the influence of concrete strength (concrete classes C20/25 and C30/35), the ratio of the anchoring length of the rod to its diameter (8 and 12), the coefficient of fiber reinforcement by volume (0.007 and 0.018) and the diameter of the rods (8 and 12 mm) on the development of shifts and stresses in the rods. The experimental studies involved tensile testing of A500C reinforcement rods, driven in the center of the base of prismatic samples with dimensions of 150×150×200 mm.

A full four-factor experiment plan (plan 2<sup>4</sup>) was used and regression equations were obtained for the stresses in the rods for the initial shear, for a shear of 0.1 mm (conditional bond strength criterion) and for the maximum stress values.

The analysis of the obtained regression equations of the plan of experiment 24 proved that the content of fiber reinforcement has a significant effect on the stresses presented above. So, for example, for the laying length of 144 mm of rods  $\varnothing 12$  mm in concrete of class C30/35, reinforced with 1.8 % fiber by volume, the stress in the rods for a displacement of 0.1 mm was equal to 622.39 MPa on average, and for the content fibers 0.7 % – 514.81 MPa. For the laying length of 144 mm of  $\varnothing 12$  mm rods in concrete of class C20/25, reinforced with 1.8 % fiber by volume, the stress in the rods for a shear of 0.1 mm was equal to 446.92 MPa on average, and for the fiber content 0.7 % – 386.22 MPa. For the laying length of 64 mm of rods  $\varnothing 8$  mm in concrete of class C20/25, reinforced with 1.8 % fiber by volume, the stress in the rods for a displacement of 0.1 mm equaled 301.94 MPa on average, and for the fiber content 0.7 % – 249.76 MPa.

**Key words:** steel fiber, steel fiber concrete, rod reinforcement, tensile test, adhesion.

**Постановка проблеми.** Анкерування арматурних стрижнів періодичного профілю за рахунок зчеплення з бетоном забезпечує спільну роботу цих матеріалів у конструкціях. Зусилля, які виникають у зоні контакту стрижнів і бетону, залежать від адгезії, тертя по поверхні контакту і розклинювання, перпендикулярного до поперечних ребер стрижнів [10]. Зусилля розклинювання виникають через тиск поперечних ребер арматурних стрижнів на бетон, що зумовлює виникнення конусоподібних і радіальних тріщин. Бетон, що оточує арматурний стрижень, перешкоджає розвитку цих тріщин. Посилення бетону фібровою арматурою сприяє заклинюванню стрижнів, збільшенню значень як радіальних зусиль, так і максимальних зусиль за витягування стрижнів із бетону.

Найпоширенішим методом дослідження анкерування стрижнів у бетоні є випробування на їх витягування з призматичних зразків. Згідно з рекомендаціями RILEM-CEB-FIP-RC6, випробування полягає у витяганні арматурного стрижня з бетонного кубічного зразка. Під час випробувань контролюють зусилля, прикладене до стрижня, і переміщення його незавантаженого кінця [11]. Дослідження анкерування стрижневої арматури класу A500C у бетоні, армованому сталеву фіброю зі загнутими кінцями, мали б сприяти обґрунтованому призначенню напруження і необхідної довжини анкерування стрижнів.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Іспанські дослідники E. Garcia-Taengua, J. R. Marti-Vargas та P. Serna-Ros виконали експериментальні дослідження зчеплення арматурних стрижнів класу B 500 S діаметром 8, 16 і 20 мм при витягуванні їх із бетонних і сталевібробетонних призм (при вмісті фібри 40 і 70 кг/м<sup>3</sup>) з міцністю бетону-матриці на стиск 30 МПа [8]. Автори вказують, 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<sup>3</sup>, коли використовувалася фібра довжиною 60 мм, максимальні напруження збільшилися на 21,0–47,8 %, а максимальне зміщення незавантаженого кінця стрижня  $s_{max}$  – не більше ніж на 10,3 %.

У працях [6; 7] E. Garcia-Taengua, J. R. Marti-Vargas і P. Serna висвітлили результати експериментальних досліджень анкерування стрижневої арматури класу B 500 S у бетоні прямокутних призм товщиною 200 мм. Автори вказують на те, що збільшення захисного шару бетону та вмісту фібри позитивно впливають 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:

Анкерування стрижневої арматури діаметром 16 мм, з'єднаної внапуск довжиною 160 мм у середині прольоту балок, виконаних із бетону і сталевібробетону, досліджували M. J. Vandelt, S. L. Billington [5]. Експериментально встановлено, що при 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 %.

Учені M. H. Narajli, B. Namad і K. Karam [9] 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. Автори відзначили, що додавання 1 і 2 % фібри за об'ємом збільшило міцність зв'язку за витягування стрижнів у середньому на 26 та 33 % відповідно.

Xuhui Zhang, Wei Zhang, Cuodong Cao, Fu Xu, Caiqian Yang [12] досліджували вплив намагнічування стрижня, до якого притягувалася

фібра під час бетонування, на напруження під час витягування стрижня з тіла сталевіробетону. Встановлено, що збільшення інтенсивності магнітного поля до 30 мТ підвищило напруження при початковій зсуву незавантаженого кінця стрижня в середньому на 28,2 % і на 20,8 % – максимальні напруження при витягуванні. Максимальний приріст цих напружень дорівнював 50 %. Автори вказують, що при 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 %.

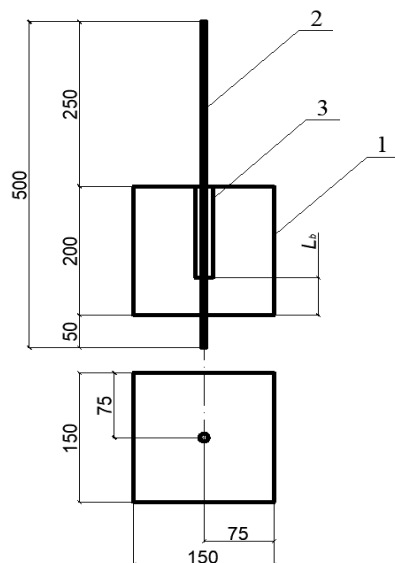
Аналіз різних методик розрахунку напружень зчеплення стрижнів серпоподібного профілю з бетоном, поданий у праці [3], засвідчив необхідність урахування впливу як геометричних параметрів профілю арматури і міцності бетону, так і участі в роботі об'єму бетону, який безпосередньо примикає до контактної шару, об'ємного вмісту фібрової арматури.

**Постановка завдання.** Наше завдання – виявлення особливостей анкерування стрижневої арматури класу А500С у бетоні, армованому сталеву анкерною фіброю масового виробництва, яка має довжину 50 мм і діаметр 0,5 мм, і

встановлення відповідних розрахункових параметрів, які характеризують міцність зчеплення.

**Виклад основного матеріалу.** Відоме застосування трифакторних планованих експериментів Бокса-Бенкена для отримання рівнянь регресії, у яких як функції виступають граничні напруження зчеплення стрижнів із бетоном  $f_b$ , а як аргументи – різні параметри, які можуть впливати на ці напруження [1; 2]. Автори обґрунтовують використання плану Бокса-Бенкіна тим, що для бетону характерні нелінійні діаграми механічного стану, а тому вибрано план для отримання квадратичних залежностей.

Програмою наших досліджень передбачено вивчення впливу призмової міцності бетону  $f_{cm,prism}$ , відношення довжини анкерування стрижня до його діаметра  $l_b / \phi$ , коефіцієнта фібрового армування за об'ємом  $\rho_{fv}$  та діаметра стрижня  $\phi$  на розвиток зсувів  $s$  і напруження у стрижнях  $\sigma_s$  за початку зсуву незавантаженого кінця стрижня ( $\sigma_{s,0}$ ), за його зсуву  $s$ , що дорівнює 0,1 мм ( $\sigma_{s,0,1mm}$ ), і максимального напруження за втрати зчеплення ( $\sigma_{s,max}$ ), а також на дотичні напруження. Це дасть змогу обґрунтовано призначити граничні напруження зчеплення стрижнів  $f_{bd}$  із фібробетоном, від яких залежать основна довжина анкерування  $l_{b,rqd}$  і розрахункова довжина анкерування  $l_{bd}$ .



а)



б)

Рис. Конструкція дослідного зразка (а) і випробування стрижнів на витягування (б): 1 – призма; 2 – арматурний стрижень; 3 – полімерний ущільнювач.

Експериментальні дослідження передбачали випробування стрижнів арматури класу А500С, зароблених по центру основи призматичних зразків розмірами 150×150×200 мм, на витягування (див. рис.).

Програмою наших досліджень передбачено вивчення впливу міцності бетону (класи бетону С20/25 і С30/35), відношення довжини анкерування стрижня до його діаметра (8 і 12), коефіцієнта фібрового армування за об'ємом (0,007 і 0,018) та діаметра стрижнів (8 і 12 мм) на розвиток зсувів і напруження у стрижнях (табл. 1). Експериментальні дослідження передбачали випробування стрижнів арматури класу А500С, зароблених по центру основи призматичних зразків розмірами 150 х 150 х 200 мм, на витягування.

Відношення довжини анкерування стрижня до його діаметра  $l_b \text{ } \emptyset$  (8 і 12) призначені такими, щоб, з одного боку, на напруження у стрижні при витягуванні не впливало можливе недоуцільнення приповерхневого шару бетону, а з іншого – щоб стрижень під час витягування не розірвався. Класи бетону С20/25 і С30/35 призначені такими, які рекомендуються національними нормами проектування дисперсно армованих конструкцій без попереднього напруження бетону. Коефіцієнти армування фіброю діаметром 1 мм і довжиною 50 мм за об'ємом (0,007 і 0,018) призначені з огляду на те, що при менших коефіцієнтах за 0,007 силового ефекту від фібрового армування практично немає, а за коефіцієнта фібрового армування, більшого за 0,018, конструкції стають неконкурентоспроможними. Діаметри стрижнів (8 і 12 мм) призначені такими, які часто можуть використовуватися у комбіновано армованих сталевібробетонних конструкціях із відносно низьким відсотком стрижневого армування. Це дозволяє проектувати такі згинані елементи, в яких роль поперечної арматури виконуватиме фібра. З іншого боку, ширина

розкриття нормальних тріщин, як відомо, тим менша, чим менший діаметр стрижневої арматури. Оскільки вимоги щодо гранично допустимої ширини розкриття тріщин за використання сталевібробетону є доволі жорсткими, використання таких діаметрів стрижнів можна вважати обґрунтованим.

Ми використали повний чотирифакторний план експерименту (план  $2^4$ ) і отримали рівняння регресії для напружень у стрижнях на початковій зсуву, за зсуву 0,1 мм (умовний критерій міцності зчеплення) і для максимальних значень напружень [4], оскільки припускалося, що фактори приблизно лінійно впливають на напруження у стрижнях при витягуванні. Крім цього, виготовлені і випробувані зразки, які б доповнили матрицю вказаного плану експерименту  $2^4$  таким чином, щоб отримати D-оптимальний трирівневий композиційний план типу  $V_4$ , на випадок, якщо б спочатку рівняння регресії виявилось неадекватним.

У цій праці подані результати повного чотирифакторного експерименту з вивчення впливу поданих вище факторів на напруження в стрижнях за зсуву незавантаженого кінця 0,1 мм (табл. 2).

Одночасно з дослідними зразками-близнюками виготовляли по три бетонні куби з ребром 150 мм і по шість призм 150 × 150 × 600 мм, три з яких випробовували на стиск, а три – на згин. За результатами експериментів отримані такі середні значення: для бетону класу С20/25 кубова міцність  $f_{cm,cube} = 32,71$  МПа, призмova міцність  $f_{cm,prism} = 26,07$  МПа, міцність на розтяг  $f_{ctm} = 2,34$  МПа, модуль пружності  $E_{cm} = 31213$  МПа; для бетону класу С30/35 кубова міцність  $f_{cm,cube} = 44,33$  МПа, призмova міцність  $f_{cm,prism} = 34,75$  МПа, міцність на розтяг  $f_{ctm} = 2,83$  МПа, модуль пружності  $E_{cm} = 34473$  МПа.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Фактор		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	-1	0	+1	
$f_{cm,prism}$ , МПа	$X_1$	26,07	30,41	34,75	4,34
$l_b \text{ } \emptyset$	$X_2$	8	10	12	2
$\rho_{fv}$	$X_3$	0,007	0,0125	0,018	0,0055
$\emptyset$ , мм	$X_4$	8	10	12	2

Таблиця 2

**Матриця планування і експериментальні значення нормальних максимальних напружень в арматурі при зсуві незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм  $\sigma_{S,0,1\text{мм}}$**

Марки зразків*	Точка плану	Фактор				Нормальні напруження в арматурі при зсуві 0,1 мм $\sigma_{S,0,1\text{мм}}$ , МПа			Середнє значення нормальних напружень в арматурі при зсуві 0,1 мм $\sigma_{S,0,1\text{мм}}$ , МПа
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	
3.3PF12.144	1	+1	+1	+1	+1	627,11	618,38	621,68	622,39
3.3PF8.96	2	+1	+1	+1	-1	601,59	602,85	606,72	603,72
3.1PF12.144	3	+1	+1	-1	+1	516,55	516,64	511,24	514,81
3.1PF8.96	4	+1	+1	-1	-1	496,97	503,95	497,19	499,37
3.3PF12.96	5	+1	-1	+1	+1	414,76	411,94	418,06	414,92
3.3PF8.64	6	+1	-1	+1	-1	403,65	404,43	399,33	402,47
3.1PF12.96	7	+1	-1	-1	+1	344,66	337,08	347,89	343,21
3.1PF8.64	8	+1	-1	-1	-1	335,73	332,29	330,71	332,91
1.3PF12.144	9	-1	+1	+1	+1	468,75	462,28	469,73	466,92
1.3PF8.96	10	-1	+1	+1	-1	454,16	451,13	453,44	452,91
1.1PF12.144	11	-1	+1	-1	+1	386,5	382,24	389,92	386,22
1.1PF8.96	12	-1	+1	-1	-1	375,09	377,44	371,36	374,63
1.3PF12.96	13	-1	-1	+1	+1	315,75	309,85	308,24	311,28
1.3PF8.64	14	-1	-1	+1	-1	300,16	305,01	300,65	301,94
1.1PF12.96	15	-1	-1	-1	+1	256,48	254,03	261,93	257,48
1.1PF8.64	16	-1	-1	-1	-1	249,04	248,61	251,63	249,76
Сума									6534,94
									$b_0 = 408,43$

\* – маркування для трьох зразків-близнюків.

Попередньо визначений індекс Рема  $f_r$  для стрижнів діаметром 8 мм дорівнює 0,0565, а для стрижнів діаметром 12 мм – 0,0572.

Таблиця 3

**Коефіцієнти рівняння регресії**

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів									
при лінійних членах				при взаємодіях					
$\bar{y} \bar{d}_1$	$\bar{y} \bar{d}_2$	$\bar{y} \bar{d}_3$	$\bar{y} \bar{d}_4$	$\bar{y} \bar{d}_1 \bar{d}_2$	$\bar{y} \bar{d}_1 \bar{d}_3$	$\bar{y} \bar{d}_1 \bar{d}_4$	$\bar{y} \bar{d}_2 \bar{d}_3$	$\bar{y} \bar{d}_2 \bar{d}_4$	$\bar{y} \bar{d}_3 \bar{d}_4$
+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39
+603,72	+603,72	+603,72	-603,72	+603,72	+603,72	-603,72	+603,72	-603,72	-603,72
+514,81	+514,81	-514,81	+514,81	+514,81	-514,81	+514,81	-514,81	+514,81	-514,81
+499,37	+499,37	-499,37	-499,37	+499,37	-499,37	-499,37	-499,37	-499,37	+499,37
+414,92	-414,92	+414,92	+414,92	-414,92	+414,92	+414,92	-414,92	-414,92	+414,92
+402,47	-402,47	+402,47	-402,47	-402,47	+402,47	-402,47	-402,47	+402,47	-402,47
+343,21	-343,21	-343,21	+343,21	-343,21	-343,21	+343,21	+343,21	-343,21	-343,21
+332,91	-332,91	-332,91	-332,91	-332,91	-332,91	-332,91	+332,91	+332,91	+332,91
-466,92	+466,92	+466,92	+466,92	-466,92	-466,92	-466,92	+466,92	+466,92	+466,92
-452,91	+452,91	+452,91	-452,91	-452,91	-452,91	+452,91	+452,91	-452,91	-452,91
-386,22	+386,22	-386,22	+386,22	-386,22	+386,22	-386,22	-386,22	+386,22	-386,22
-374,63	+374,63	-374,63	-374,63	-374,63	+374,63	+374,63	-374,63	-374,63	+374,63
-311,28	-311,28	+311,28	+311,28	+311,28	-311,28	-311,28	-311,28	-311,28	+311,28
-301,94	-301,94	+301,94	-301,94	+301,94	-301,94	+301,94	-301,94	+301,94	-301,94
-257,48	-257,48	-257,48	+257,48	+257,48	+257,48	-257,48	+257,48	-257,48	-257,48
-249,76	-249,76	-249,76	-249,76	+249,76	+249,76	+249,76	+249,76	+249,76	+249,76
$\Sigma = +932,66$	$\Sigma = +1307$	$\Sigma = +618,16$	$\Sigma = +99,53$	$\Sigma = +186,56$	$\Sigma = +88,24$	$\Sigma = +14,20$	$\Sigma = +123,66$	$\Sigma = +19,90$	$\Sigma = +9,42$
$b_1 = 58,29$	$b_2 = 81,69$	$b_3 = 38,64$	$b_4 = 6,22$	$b_{12} = 11,66$	$b_{13} = 5,52$	$b_{14} = 0,89$	$b_{23} = 7,73$	$b_{24} = 1,24$	$b_{34} = 0,59$

Також випробовували на розтяг три арматурні стрижні Ø8A500С, для яких умовна межа текучості в середньому дорівнює 571 МПа, а тимчасовий опір – 673 МПа, і три стрижні Ø12A500С, для яких ці показники дорівнюють 584 МПа і 689 МПа відповідно.

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії обчислені за відомою методикою [4] і подані в табл. 2 і 3.

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра  $S_{(y)}^2$  знаходили за формулою

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r y_{ui} - y_m}{N r - 1} = \frac{382,1478}{16 \cdot 3 - 1} = 11,94, \quad (1)$$

де  $N$  – кількість точок плану експерименту;  $r$  – кількість повторюваних дослідів у рядку матриці плану експерименту;  $\sum_{i=1}^r$  – сума за рядками матриці;  $\sum_{u=1}^N$  – те ж за стовпцями.

Середньоквадратичне відхилення:

$$S_{(y)} = \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{11,94} = 3,46. \quad (2)$$

Середньоквадратична помилка:

$$S_{b_0} = S_{(b_i)} = S_{(b_{ij})} = \frac{S_{(y)}}{\sqrt{N}} = \frac{3,46}{\sqrt{16}} = 0,86. \quad (3)$$

Табличне значення t-критерію Стьюдента при рівні значущості  $\alpha = 0,005$  ( $P = 95\%$ ) дорівнює 2,04, що відповідає числу ступенів свободи  $f_y = N r - 1 = 16 \cdot 3 - 1 = 32$ .

Таблиця 4

Розрахунок дисперсії відтворюваності за рядками матриці

Точки плану $u$	$(y_1 - y_m)^2$	$(y_2 - y_m)^2$	$(y_3 - y_m)^2$	$S_{(y)}^2$
1	22,2784	16,0801	0,5041	38,8626
2	4,5369	0,7569	9	14,2938
3	3,0276	3,3489	12,7449	19,1214
4	5,76	20,9764	4,7524	31,4888
5	0,0256	8,8804	9,8596	18,7656
6	1,3924	3,8416	9,8596	15,0936
7	2,1025	37,5769	21,9024	61,5818
8	7,9524	0,3844	4,84	13,1768
9	3,3489	21,5296	7,8961	32,7746
10	1,5625	3,1684	0,2809	5,0118
11	0,0784	15,8404	13,69	29,6088
12	0,2116	7,8961	10,6929	18,8006
13	19,9809	2,0449	9,2416	31,2674
14	3,1684	9,4249	1,6641	14,2574
15	1	11,9025	19,8025	32,705
16	0,5184	1,3225	3,4969	5,3378
Сума				382,1478

З табл. 2 вибираємо найменші значення коефіцієнтів і знаходимо розрахункове значення

$t_p$ :

$$t_p = \frac{b_{34}}{S_{b_{34}}} = \frac{0,59}{0,86} = 0,69 < t = 2,04. \quad (4)$$

$$t_p = \frac{b_{14}}{S_{b_{14}}} = \frac{0,89}{0,86} = 1,03 < t = 2,04. \quad (5)$$

$$t_p = \frac{b_{24}}{S_{b_{24}}} = \frac{1,24}{0,86} = 1,44 < t = 2,04. \quad (6)$$

Отже, коефіцієнти  $b_{14}, b_{24}, b_{34}$  є незначущими, і рівняння регресії у кодованому вигляді таке:

$$Y = 408,43 + 58,29X_1 + 81,69X_2 + 38,64X_3 + 6,22X_4 + 11,66X_1X_2 + 5,52X_1X_3 + 7,73X_2X_3. \quad (7)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення  $Y$  для кожного

рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (табл. 4).

Дисперсія адекватності:

$$S_{\text{аа}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - y_m)^2}{m - 1} = \frac{3 \cdot 66,8361}{16 - 8} = 25,06, \quad (8)$$

де  $m$  – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_p = \frac{S_{\text{аа}}^2}{S_{(y)}^2} = \frac{25,06}{11,94} = 2,099. \quad (9)$$

Табличне значення критерію Фішера  $F_T$  при  $f_1 = 16 \cdot 3 - 1 = 32$  і  $f_2 = 16 - 8 = 8$  за інтерполяцією дорівнює 2,29. Отже,  $F_p < F_T$ , тому рівняння регресії є адекватним.

Натуральні  $X_i$  і кодовані значення  $x_i$  є взаємопов'язаними:

Таблиця 4

## Розрахунок дисперсій адекватності

Точки плану	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_1X_4$	$X_2X_3$	$X_2X_4$	$X_3X_4$	$Y$	$Y_m$	$Y-Y_m$	$(Y-Y_m)^2$		
1	408,43	+58,29	+81,69	+38,64	+6,22	+11,66	+5,52	0	+7,73	0	0	618,18	622,39	-4,21	17,7241		
2	408,43	+58,29	+81,69	+38,64	-6,22	+11,66	+5,52	0	+7,73	0	0	605,74	603,72	2,02	4,0804		
3	408,43	+58,29	+81,69	-38,64	+6,22	+11,66	-5,52	0	-7,73	0	0	514,4	514,81	-0,41	0,1681		
4	408,43	+58,29	+81,69	-38,64	-6,22	+11,66	-5,52	0	-7,73	0	0	501,96	499,37	2,59	6,7081		
5	408,43	+58,29	-81,69	+38,64	+6,22	-11,66	+5,52	0	-7,73	0	0	416,02	414,92	1,1	1,21		
6	408,43	+58,29	-81,69	+38,64	-6,22	-11,66	+5,52	0	-7,73	0	0	403,58	402,47	1,11	1,2321		
7	408,43	+58,29	-81,69	-38,64	+6,22	-11,66	-5,52	0	+7,73	0	0	343,16	343,21	-0,05	0,0025		
8	408,43	+58,29	-81,69	-38,64	-6,22	-11,66	-5,52	0	+7,73	0	0	330,72	332,91	-2,19	4,7961		
9	408,43	-58,29	+81,69	+38,64	+6,22	-11,66	-5,52	0	+7,73	0	0	467,24	466,92	0,32	0,1024		
10	408,43	-58,29	+81,69	+38,64	-6,22	-11,66	-5,52	0	+7,73	0	0	454,8	452,91	1,89	3,5721		
11	408,43	-58,29	+81,69	-38,64	+6,22	-11,66	+5,52	0	-7,73	0	0	385,54	386,22	-0,68	0,4624		
12	408,43	-58,29	+81,69	-38,64	-6,57	-11,66	+5,52	0	-7,73	0	0	372,75	374,63	-1,88	3,5344		
13	408,43	-58,29	-81,69	+38,64	+6,57	+11,66	-5,52	0	-7,73	0	0	312,07	311,28	0,79	0,6241		
14	408,43	-58,29	-81,69	+38,64	-6,57	+11,66	-5,52	0	-7,73	0	0	298,93	301,94	-3,01	9,0601		
15	408,43	-58,29	-81,69	-38,64	+6,22	+11,66	+5,52	0	+7,73	0	0	260,94	257,48	3,46	11,9716		
16	408,43	-58,29	-81,69	-38,64	-6,22	+11,66	+5,52	0	+7,73	0	0	248,5	249,76	-1,26	1,5876		
																Сума	66,8361

$$\tilde{\delta}_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (10)$$

де  $X_{i0}$  – значення нульової точки;  $\Delta X_i$  – інтервал варіювання.

Отож, отримуємо:

$$x_1 = \frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34}; \quad (11)$$

$$x_2 = \frac{l_b \cdot \phi - 10}{2}; \quad (12)$$

$$x_3 = \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055}; \quad (13)$$

$$x_4 = \frac{\phi - 10}{2}. \quad (14)$$

Рівняння регресії має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{S,0,1\text{ мм}} = & 408,43 + 58,29 \frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34} + \\ & + 81,69 \frac{l_b \cdot \phi - 10}{2} + 38,64 \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055} + 6,22 \frac{\phi - 10}{2} + \\ & + 11,66 \frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34} \frac{l_b \cdot \phi - 10}{2} + \\ & + 5,52 \frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34} \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055} + \\ & + 7,73 \frac{l_b \cdot \phi - 10}{2} \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055}. \quad (15) \end{aligned}$$

Рівняння регресії (15) дає змогу отримати, наприклад, необхідну базову довжину анкерування фібри, якщо напруження у стрижні призначити такими, що дорівнюють розрахунковій міцності стрижня. Це уможливило підбір класу бетону, витрат фібри, діаметра арматури.

Крім цього, поданим вище методом отримане рівняння регресії для визначення граничних напружень зчеплення стрижнів із фібробетоном:

$$f_b = 10,2 + 1,45 \frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34} + 0,97 \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055} + 0,16 \frac{\phi - 10}{2} + 0,14 \frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34} \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055}. \quad (16)$$

Дисперсія адекватності для цього рівняння регресії  $S_{aa}^2 = 0,0033$ , а розрахункове значення критерію Фішера  $F_p = 0,39$ .

Табличне значення критерію Фішера  $F_T$ , як і для рівняння регресії (15) при  $f_1 = 16 - 3 - 1 = 32$  і  $f_2 = 16 - 5 = 11$  за інтерполяцією, дорівнює 2,22. Отже,  $F_p < F_T$ , тому рівняння регресії є адекватним.

Порівнюючи рівняння (15) і (16), бачимо, що відносна довжина закладання стрижнів у сталеві фібробетон впливає на напруження у стрижнях, тоді як граничні напруження зчеплення від неї не залежать.

Рівняння (16) можна використати для визначення базової довжини заанкерування  $l_{b,rq}$  і обґрунтованого призначення необхідної довжини зони анкерування.

**Висновки.** Напруження у стрижнях при витягуванні зі сталеві фібробетону 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 можна використати для підбору класу бетону, витрат фібри і діаметра стрижнів з метою зменшення необхідної довжини зони анкерування стрижнів.

### Бібліографічний список

1. Бабич Є. М., Бабич В. Є., Поляновська О. Є. Зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю та її анкерування в згинальних залізобетонних елементах: монографія. Рівне: Волин. обереги, 2017. 160 с.
2. Бабич Є. М., Кочкар'єв Д. В., Філіпчук С. В. Математична модель зчеплення арматури з високоміцним бетоном. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*: зб. наук. праць. Київ: КНУБА, 2018. Вип. 2. С. 154–161.
3. 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.
4. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2011. 174 с.
5. 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.
6. Garcia-Taengua E., Marti-Vargas J. R., Serna P. Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105. P. 275–284.
7. Garcia-Taengua E., Marti-Vargas J. R., Serna P. 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.
8. Garcia-Taengua E., Marti-Vargas J. R., Serna P. 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.
9. 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.
10. Rehm G. The basic principles of the bond between steel and concrete: Translation. Cement and concrete association. London, 1968. № 134. 66 p.
11. TC R. RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials. New York: E & FN SPON, 1994. P. 218–220.
12. 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. 103828.

Стаття надійшла 03.08.2022