УДК 624. 012. 25 **https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-03**

ЗЧЕПЛЕННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ А500С ЗІ СТАЛЕФІБРОБЕТОНОМ ЗРАЗКІВ БАЛКОВОГО ТИПУ

COUPLING STRENGTH OF CLASS A500C ROD REINFORCEMENT WITH STEEL FIBER CONCRETE OF BEAM TYPE SPECIMENS

Білозір В.В., к.т.н., доц., Мазурак Р.А., аспірант (Львівський національний університет природокористування)

Bilozir V., PhD, Associate Professor, Mazurak R., postgraduate (Lviv National Environmental University)

Проаналізовано результати експериментів з витягування стрижневої арматури класу А500С зі сталефібробетону елементів балкового типу. Показано, що напруження зчеплення, які відповідають зсувові незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм, можна достатньо точно оцінити рівнянням регресії, отриманим за результатами випробування на витягування стрижнів з призматичних зразків та з використанням поправочного коефіцієнта 0,84. При цьому відношення експериментальних і теоретичних напружень знаходиться в межах 0,95 – 1,05.

The coupling of reinforcement with concrete ensures their joint work from the beginning of loading of the structural element until its destruction. It depends on a number of factors that affect the reliability of anchoring rods in reinforced concrete, which must be taken into account when designing structures.

Fiber reinforcement can be considered as a type of indirect reinforcement that affects the bond strength with concrete. In this study, fiber reinforcement with bent ends of the HE1050 type, 50 mm long and 1 mm in diameter, was used.

It is known to use the three-factor design of the Box-Behnken experiment to obtain the regression equation, the function of which is the shear bond strength of the unloaded end of the rod 0.1 mm fb, and the arguments are the parameters affecting these stresses. This experimental plan was also used to study issues of crack resistance of composite reinforced steel fiber concrete stretched elements. In previous studies, we used a full four-factor experiment, and accepted the hypothesis of a linear influence of factors on the coupling stress fb. According to the results of experiments on pulling out rods of class A500C Ø 8 and Ø 12 mm from fiber concrete prisms 150 x 150 x 200 mm, the regression equation was obtained.

In this work, the beam method of tests for pulling out rods from fiber concrete is used. Evaluation of the experimental values of $f_{b,exp}$ *proved that the theoretical values of* $f_{b,theor}$*, are greater than the experimental ones. The ratio of experimental values to theoretical values is within 0,79 – 0,88. Therefore, it is proposed to accept the right-hand side of the regression equation obtained from the results of experiments on pulling rods from prisms with the average value of this ratio of 0.84. This makes it possible to*

approximate experimental and theoretical data, and the mentioned ratio will be in the range of 0.95 - 1.05, which can be considered quite satisfactory.

In addition, in order to evaluate the effect of fiber reinforcement on the bond stress f_b*, two twin samples were made, which did not contain fibers. Stress* f_b *of fiber concrete samples exceeded the corresponding stress of concrete by 14-40% depending on* $f_{c,prism}$ *and* ρ_{fv} *.*

Ключові слова: арматура, серпоподібний профіль, сталефібробетон, зчеплення, балка, розрахунок.

Key words: armature, sickle profile, steel fiber concrete, coupling, beam, calculation.

Постановка проблеми. Зчеплення арматури з бетоном забезпечує їх спільну роботу від початку завантаження елемента конструкції аж до його руйнування. Воно залежить від низки факторів, які впливають на надійність анкерування стрижнів у залізобетоні, що потрібно враховувати при проектуванні конструкцій.

Фіброве армування можна розглядати як різновид непрямого армування, який впливає на міцність зчеплення з бетоном [1]. У даному дослідженні використовували фіброву арматура зі загнутими кінцями типу НЕ 1050 довжиною 50 мм і діаметром 1мм українського виробництва.

Найрозпоширенішими є два способи випробувань стрижнів на витягування з бетону [2, 3]. Перший спосіб полягає у тому, що стрижень витягують з призми, а згідно з другим способом стрижень витягують з розтягнутої зони балки. Перший спосіб випробувань є менш трудомістким, однак другий спосіб ліпше моделює роботу стрижня у балкових елементах. Тому порівняння результатів випрбувань, отриманих обома способами є важливим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментально-теоретичними дослідженнями зчеплення арматурних стрижнів з бетоном займалося багато як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників. Сюди належать дослідження Бабича В. Є., Бабича Є. М., Гвоздєва О. О., Климова Ю. А., Мадатяна С. А., Муліна М. М., Оатула О. О., Овчиннікової М. Г., Поляновської О. Є., Семченкова О. С., Холмянського М. М., Чапюка О. С., Bigai A. J., Darwin D., Eligehausen R., Gambarova P. G., Martin H., Mayer U., Muller H. H., Rehm G. та інших.

Аналіз зарубіжних досліджень, поданий у праці [4], засвідчив, що на значення дотичних напружень за витягування сталевих арматурних стрижнів зі сталефібробетону впливають міцність бетону-матриці, об'ємний вміст фібри, її довжина, відношення довжини фібри до її діаметра, діаметр стрижневої арматури, відношення товщини захисного шару бетону до діаметра стрижня. У цій же праці окреслено коло питань,

які торкаються зчеплення стрижнів з фібробетоном, які потрібно вивчити. Особливо це стосується зчеплення стрижневої арматури класу А500С з фібробетоном на фібрі українського виробництва типу НЕ1050.

Відомим є використання трифакторного плану експерименту Бокса - Бенкена для отримання рівняння регресії, функцією якого є міцність зчеплення за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм f_b, а аргументами – параметри, що впливають на ці напруження [5, 6]. Цей план експерименту використано також за вивчення питань тріщиностійкості комбіновано армованих сталефібробетонних розтягнутих елементів [7]. Особливістю цього плану експерименту є те, що він передбачає три рівні варіювання факторів, одним з яких є призмова міцність бетону. Експериментально отримати точно міцність бетону для нульового рівня варіювання є складно, тому нами використаний повний чотирифакторний експеримент [8] за відомою апробованою методикою [9].

Постановка завдання. Завданням даних досліджень є оцінювання впливу фібрового армування на міцність зчеплення f_b стрижнів з фібробетоном, розроблення пропозицій щодо розрахунку міцності зчеплення f_b стрижневої арматури зі сталефібробетоном на основі результатів власних експериментальних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Методика досліджень, подана у праці [8], передбачала використання повного факторного експерименту (ПФЕ 2^4) для подальшого отримання рівняння регресії функції f_b. За фактори прийнято призмову міцність бетону $f_{cm,prism}$, відносну довжину закладання стрижня у фібробетон $l_b/\emptyset$, коефіцієнт фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} і діаметр стрижнів $\emptyset$. Випробування проводилися за методикою [3], яка передбачає витягування стрижнів з призматичних зразків розмірами 150 х150 х 200 мм. Як виявилося, рівняння регресії ПФЕ 2^4 є адекватним і має вигляд [8]:

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

У праці [8] подано також рівняння регресії для визначення нормальних напружень в стрижнях за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм.

На випадок, якщо б рівняння регресії ПФЕ 2^4 незадовільно оцінювало експериментальні результати, виготовлено і випробувано додаткові зразки

для побудови плану експерименту, близького до оптимального (D4). Для кожної точки експерименту випробувано по три зразки-близнюки.

Результати випробувань вказаних додаткових зразків оцінювали, використовуючи формулу (1). Відношення експериментальних значень до теоретичних знаходиться в межах 1,01 – 1,05 (Таблиця 1).

Таблиця 1

Експериментальні і теоретичні значення нормальних напружень в арматурі за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм

Марки зразків*	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b, МПа	Теоретичні значення дотичних напружень в арматурі при зсуві 0,1 мм $f_{b,theor}$, МПа	$\frac{f_b}{f_{b,theor}}$
1.2PF10.100	8,79	8,75	1,005
2.1PF10.100	9,87	9,41	1,049
2.2PF8.80	10,38	9,87	1,052
2.2PF10.80	11,52	11,01	1,046
2.2PF10.120	9,63	9,26	1,040
2.2PF12.120	10,26	10,05	1,021
2.3PF10.100	11,34	10,78	1,052
3.2PF10.100	11,60	11,07	1,048

* – У маркуванні зразків: перша цифра – клас бетону (1 – С20/25, 2 – С25/30, 3 – С30/35); друга цифра – коефіцієнт ρ_{fv} (1 – 0,007, 2 – 0,125, 3 – 0,18); PF – призма фібробетонна; перше число після PF – діаметр стрижня, мм; друге число – довжина закладання стрижня у фібробетон, мм. У таблиці подано маркування для трьох зразків-близнюків.

Для порівняння з даними призмовими зразками були виготовлені і випробувані зразки, які не містили фібри. Порівняння напружень f_b за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм для фібробетонних і сталефібробетонних призм подано в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння напружень f_b за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм для фібробетонних і бетонних призм

Марки фібробетонних зразків*	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b, МПа	Марки бетонних зразків	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b, МПа	Відношення f_b фібробетонних зразків до бетонних
1.2PF10.100	8,79	1.0P10.100	7,64	1,15
2.1PF10.100	9,87	2.0P10.100	8,19	1,21
2.2PF8.80	10,38	2.0P8.80	7,44	1,40
2.2PF10.80	11,52	2.0P10.80	8,23	1,40
2.2PF10.120	9,63	2.0P10.120	7,79	1,24
2.2PF12.120	10,26	2.0P12.120	7,60	1,35
2.3PF10.100	11,34	2.0P10.100	8,19	1,38
3.2PF10.100	11,60	3.0P10.100	9,36	1,24

Для оцінювання різниці між міцністю зчеплення f_b зразків, поданих в таблиці 1, призмового і балкового типу були виготовлені і випробувані фібробетонні і бетонні балки за методикою [2] (Рис.1). Балки мали поперечний переріз 120 х 220 мм, складалися з двох ділянок довжиною 600 мм і містили по одному стрижню з відстанню від його центру до центру шарніра 135 мм. Відстань від нижньої грані до центру стрижня дорівнювала 60 мм. Балка під час випробувань показана на рис. 2. Робочий проліт балки дорівнював 860 мм, а відстань між зосередженими силами, прикладеними до балки, – 400 мм. Виготовляли і випробовували по два зразки-близнюки балок.

За значеннями зовнішніх згинальних моментів отримували витягуюче зусилля, прикладене до арматури, нормальні напруження в стрижнях,

дотичні напруження між стрижнем і фібробетоном балки. Характерна залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від зусилля у стрижні подана на рис. 3.

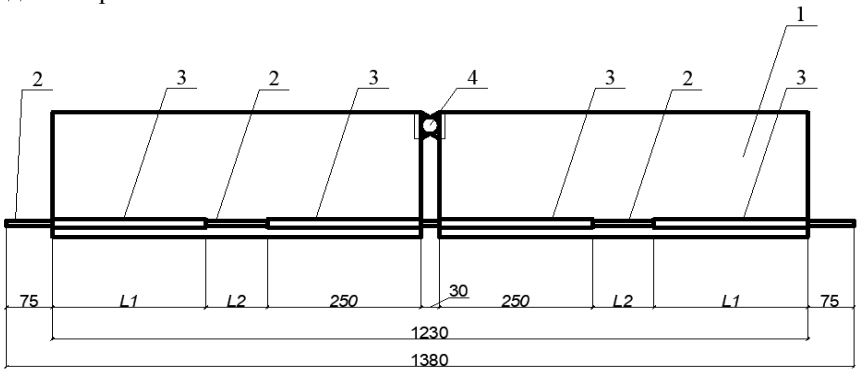

Рис. 1. Конструкція балочних зразків
1- балка; 2-арматура; 3-полімерний трубний ущільнювач; 4-шарнір

Рис 2. Балка під час випробувань

Результати випробувань зразків балкового типу подані в таблиці 3. Оцінювання експериментальних значень $f_{b,exp}$ засвідчило, що теоретичні значення $f_{b,theor}$, обчислені за формулою (1), є більшими за експериментальні. Відношення експериментальних значень до теоретичних знаходиться в межах 0,79 – 0,88. Тому пропонується праву

частину рівняння (1) приймати зі середнім значенням цього відношення (k_m=0,84). Це дозволяє зблизити експериментальні і теретичні дані, і згадане відношення знаходитиметься в межах 0,95 – 1,05, що можна вважати цілком задовільним.

Таблиця 3

Результати випробувань дослідних зразків за балковим методом [6]

Марки балкових фібробетонних зразків*	$f_{c,prism}$ МПа	$f_{b,exp}$, МПа	$f_{b,theor}$ МПа	$k = \frac{f_{b,exp}}{f_{b,theor}}$	k_m	$f_{b,theor,m}$ МПа	$\frac{f_{b,exp}}{f_{b,theor,m}}$
1.2BF10.100	26,07	7,33	8,75	0,84	0,84	7,35	0,99
2.1BF10.100	29,14	7,8	9,41	0,88		7,43	1,05
2.2BF8.80	29,14	8,51	9,87	0,88		8,08	1,05
2.2BF10.80	29,14	8,74	11,01	0,80		8,08	0,96
2.2BF10.120	29,14	7,77	9,26	0,79		8,22	0,95
2.2BF12.120	29,14	8,41	10,05	0,85		8,35	1,01
2.3BF10.100	29,14	9,45	10,78	0,88		9,00	1,05
3.2BF10.100	34,75	9,59	11,07	0,82		9,79	0,98

* BF – балка фібробетонна. У таблиці подано маркування для двох зразків-близнюків.

Рис.3. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 1.2BF10.100 і 1.2B10.100

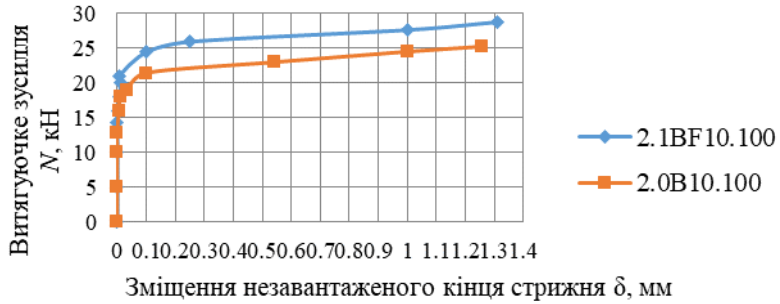

Рис.4. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.1BF10.100 і 2.0 B10.100

Рис.5. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.2BF8.80 і 2.0 B8.80

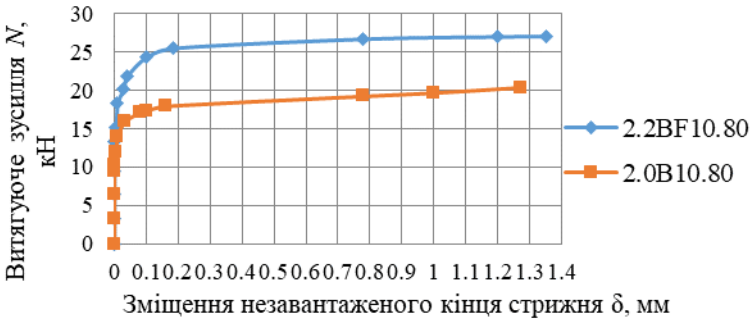

Рис.6. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.2BF10.80 і 2.0 B10.80

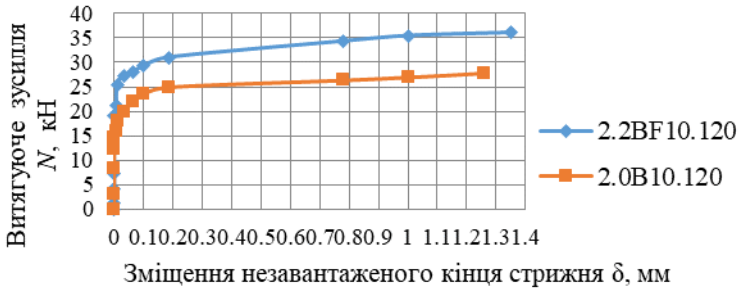

Рис.7. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.2BF10.120 і 2.0 B10.120

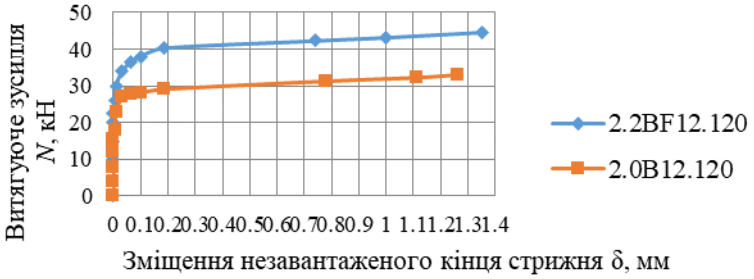

Рис.8. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.2BF12.120 і 2.0 B12.120

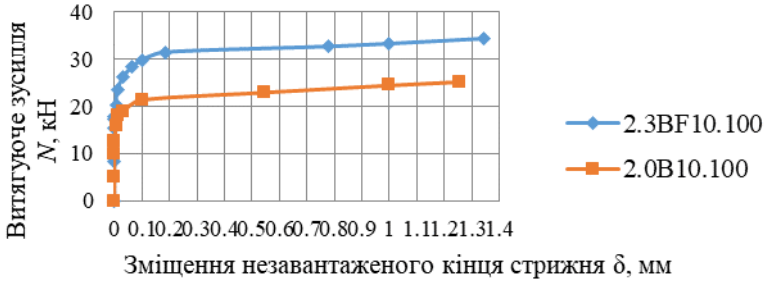

Рис.9. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.3BF10.100 і 2.0 B10.100

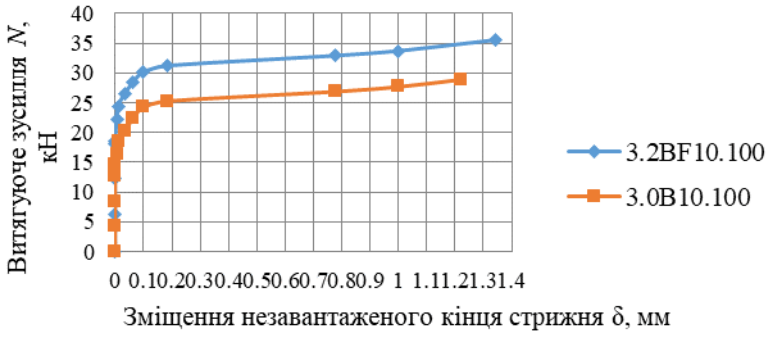

Рис.10. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 3.2BF10.100 і 3.0 B10.100

Таким чином, f_b для балкових елементів можна обчислити за формулою:

$$f_b = 0{,}84\left[10{,}2 + 1{,}45\frac{f_{cm,prism}-30{,}41}{4{,}34} + 0{,}97\frac{\rho_{fv}-0{,}0125}{0{,}0055} + 0{,}16\frac{\emptyset-10}{2} + 0{,}14\left(\frac{f_{cm,prism}-30{,}41}{4{,}34}\right)\left(\frac{\rho_{fv}-0{,}0125}{0{,}0055}\right)\right] \quad (2)$$

Крім цього, для оцінювання впливу фібрового армування на напруження зчеплення f_b були виготовлені по два зразки-близнюки, які не містили фібри. Напруження f_b фібробетонних зразків перевищували відповідні напруження бетонних на 12 – 40% залежно від $f_{c,prism}$ і ρ_{fv} (Таблиця 4).

Висновки

1. Міцність зчеплення f_b стрижневої арматури зі сталефібробетоном призмових зразків добре описується рівнянням регресії (1) і є більшою у порівнянні зі зразками, які не містили фібри, в 1,15 – 1,4 рази.

2. Відношення міцності зчеплення стрижнів із фібробетоном балкових зразків f_b до теоретичної у призмових зразках, обчисленої за формулою (1), в середньому дорівнює 0,84. Тому праву частину формули (1) рекомендується множити на коефіцієнт, що дорівнює цьому відношенню (формула (2)).

Таблиця 4

Порівняння напружень f_b за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм для сталефібробетоннихт і бетонних балок

Марки фібробетонних зразків	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b, МПа	Марки бетонних зразків	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b, МПа	Відношення f_b фібробетонних зразків до бетонних
1.2BF10.100	7,33	1.2B10.100	6,4	1,15
2.1BF10.100	7,8	2.1B10.100	6,83	1,14
2.2BF8.80	8,51	2.2B8.80	6,1	1,40
2.2BF10.80	7,74	2.2B10.80	6,92	1,12
2.2BF10.120	7,77	2.2B10.120	6,28	1,24
2.2BF12.120	8,41	2.2B12.120	6,23	1,35
2.3BF10.100	9,45	2.3B10.100	6,83	1,38
3.2BF10.100	9,59	3.2B10.100	7,74	1,24

References

1. Bilozir V. V., Mazurak R. A. Analiz chynnykiv, shcho vplyvaiut na zcheplennia armatury serpopodibnoho profiliu z betonom i fibrobetonom. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. 2020. Vyp. 14. S. 47- 54.

2.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.

3. 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.

4. Mazurak R. Ohliad doslidzhen ankeruvannia armaturnykh stryzhniv u stalefibrobetoni. Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Ser. Arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo. 2021. № 22. S. 47 – 53.

5. Babych Ye. M., Babych V. Ye., Polianovska O. Ye. Zcheplennia z betonom armatury serpopodibnoho profiliu ta yii ankeruvannia v zghynalnykh zalizobetonnykh elementakh: monohrafiia. Rivne: Volynski oberehy, 2017. 160 s.

6. Babych Ye. M., Kochkarov D. V., Filipchuk S. V. Matematychna model zcheplennia armatury z vysokomitsnym betonom. Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka: zb. nauk. prats. Kyiv: KNUBA, 2018. Vyp. 2. S. 154 – 161.

7. Andriichuk O. V., Babych V. Ye., Polianovska O. Ye., Shvets I. V. Trishchynostiikist tsentralno roztiahnutykh kombinovano armovanykh zalizobetonnykh elementiv. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. 2020. Vyp. 14. S. 13- 25.

8. Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Zhytkovskyi V. V. Rozviazuvannia budivelno-tekhnolohichnykh zadach metodamy matematychnoho planuvannia eksperymentu: Navch. posibnyk. Rivne: NUVHP, 2011. 174 s.

9. Bilozir V. V., Mazurak R. A. Matematychna model zcheplennia stryzhnevoi armatury zi stalefibrobetonom. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy.2022. Vyp. 41. S. 103- 109.

Список використаної літератури

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.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.

3. 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.

4. Мазурак Р. Огляд досліджень анкерування арматурних стрижнів у сталефібробетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2021. № 22. С. 47 – 53.

5. Бабич Є. М., Бабич В. Є., Поляновська О. Є. Зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю та її анкерування в згинальних залізобетонних елементах: монографія. Рівне: Волинські обереги, 2017. 160 с.

6. Бабич Є. М., Кочкарьов 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.

7. Андрійчук О. В., Бабич В. Є., Поляновська О. Є., Швець І. В. Тріщиностійкість центрально розтягнутих комбіновано армованих залізобетонних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. Вип. 14. С. 13- 25.

8.Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту: Навч. посібник. Рівне: НУВГП, 2011. 174 с.

9. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Математична модель зчеплення стрижневої арматури зі сталефібробетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. Вип. 41. С. 103- 109.