

УДК 624.012.25

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО АРМУВАННЯ РОЗТЯГНУТИХ ТА ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ЗАДАНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ

Кандидати техн. наук В. Є. Бабич, О. Є. Полянська, асп. І. В. Швець

THE DETERMINATION OF PARAMETERS OF COMBINED REINFORCEMENT OF STRETCHED AND BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH THE SPECIFIC CRACK RESISTANCE

PhD (Tech.) V. Babich, PhD (Tech.) O. Polianovska, Postgraduate student I. Shvets

Анотація. Для поліпшення експлуатаційних якостей залізобетонних конструкцій частіше почали використовувати їхнє комбіноване армування, яке поєднує одночасне армування традиційними сталевими стержнями та хаотично розташованою в масі бетону сталевією фіброю, але методика їх проєктування досконало ще не розроблена. У статті наводиться методика встановлення параметрів дисперсного армування бетону, яка базується на отриманні рівнянь регресії для визначення зусиль у комбіновано армованих централью розтягнутих та згинальних елементах перед утворенням тріщин, для чого виконуються числові математично плановані експерименти.

Ключові слова: комбіновано армовані елементи, тріщиностійкість, числовий експеримент, рівняння регресії, параметри дисперсного армування.

Abstract. Recently, there has been an increase in the use of reinforced concrete structures with combined reinforcement in construction, which makes it possible to increase the resistance of such structures to deformation and cracking. Dispersed reinforced concrete was used to cover roads,

flooring in industrial buildings, the manufacture of curbs and more. For the construction of public and industrial buildings, the use of combined reinforced structures has not been widely used, as no perfect method of their calculation has been developed.

Combined reinforcement structures include concrete structures that are reinforced with steel rods and steel fiber, which is randomly arranged in the mass of concrete. The strength of reinforced concrete depends on such factors as: the strength of concrete, reinforcement with rod reinforcement, the type of fiber and its characteristics, the volume of fiber per unit volume of concrete, the size of the cross section of the elements. These factors affect the tensile strength of reinforced concrete both directly and by their interaction. Therefore, determining the effective parameters of dispersed concrete reinforcement is a complex multivariate task, its solution is proposed to be achieved by performing mathematically planned experiments.

When choosing the parameters of dispersed reinforcement of centrally stretched and bending reinforced concrete elements (lower truss belt, arch tightening, cylindrical tank wall, beams, slabs), it is advisable to choose the strength of concrete f_{ck} , fiber length l_f and volume dispersion coefficient. The optimal choice of values of these parameters is proposed to be performed using quadratic regression equations, which are based on the results of three-factor three-level mathematically planned experiments, which are based on the matrix of the Box-Behnken plan.

The obtained mathematical models make it possible to analyze the influence of disperse reinforcement parameters on crack formation forces in combined reinforced concrete elements and to determine their optimal values. The use of combined reinforcement allows increasing the crack resistance of reinforced concrete elements in two or more times.

Keywords: combined reinforced elements, crack resistance, numerical experiment, regression equation, disperse reinforcement parameters.

Вступ. Залізобетонним конструкціям притаманні суттєві недоліки, що пов'язані з виникненням тріщин у розтягнутих зонах, які можуть утруднювати їх нормальну експлуатацію. Крім цього, до багатьох конструкцій за умовами експлуатації ставляться вимоги недопущення утворення тріщин у бетоні, щоб не знизити їхню довговічність. Досягти збільшення опору бетону розтягнутої зони в залізобетонних конструкціях можна підвищенням класу бетону або застосуванням високоміцної попередньо напруженої арматури, що спричиняє додаткові матеріальні та енергетичні витрати.

Останнім часом спостерігається збільшення об'ємів використання в будівництві залізобетонних конструкцій з комбінованим армуванням, що дає можливість підвищити опір таких конструкцій деформуванню та утворенню тріщин. До конструкцій з комбінованим армуванням належать конструкції з бетону, які армовані сталевими поздовжніми

стержнями та сталевую фібру, що хаотично розташована в масі бетону. Міцність сталевібробетону залежить від таких факторів, як: міцність бетону, армування стержневою арматурою, вид фібри і її характеристик, об'єм фібри в одиниці об'єму бетону, розміри поперечного перерізу елементів. Ці фактори впливають на міцність сталевібробетону при розтягу як безпосередньо, так і своєю взаємодією, а тому визначення ефективних параметрів дисперсного армування бетону є складною багатоваріантною задачею.

Дисперсно армований бетон використовується переважно для покриття автодоріг, улаштування підлог у промислових будівлях, виготовлення бордюрів, а зараз і для захисних плит фортифікаційних споруд. Для зведення громадських і промислових будівель застосування комбіновано армованих конструкцій не набуло широкого використання, оскільки не розроблена досконала методика їх розрахунку. Для

центрально розтягнутих та згинальних комбіновано армованих залізобетонних елементів вирішення цієї задачі пропонується досягти шляхом виконання математично планованих експериментів, на основі яких отримуються математичні моделі опору утворенню тріщин у розтягнутому бетоні названих елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 2] встановлено, що дисперсне армування бетону може суттєво підвищити опір тріщиноутворенню в розтягнутих та згинальних залізобетонних елементах.

На прикладі стіни циліндричного резервуара діаметром 18 м, товщина якої становить 0,16 м, доведено доцільність одночасного армування стержневою сталевую арматурою і сталевую хвилеподібною фіброю. Оптимальні параметри дисперсного армування визначалися на основі математичної моделі опору елемента розтягання. Для цього виконано математично планований експеримент, у якому за фактори варіювання прийнята міцність (клас) бетону, довжина фібри та коефіцієнт об'ємного дисперсного армування.

На основі аналізу отриманої математичної моделі запропоновано варіанти оптимальних параметрів названих факторів впливу. Показано, що застосування комбінованого армування стіни резервуара при виборі відповідних параметрів може збільшити зусилля тріщиноутворення майже у 2,9 рази. У цьому випадку комбіноване армування дає змогу уникнути застосування високоміцної арматури та її попереднє напружування [1].

Позитивно впливає комбіноване армування і на тріщиностійкість згинальних елементів. У роботі [2] розглянуто вплив дисперсного армування на тріщиностійкість залізобетонної балки з поперечним перерізом $0,25 \times 0,60$ м. За фактори впливу прийнято відсоток поздовжнього армування (від 0,5 до 1,5 %), відсоток вмісту фібри (від 0,2 до 1,8 %) і товщина шару дисперсно

армованого бетону в розтягнутій зоні c_f ($c_f/h = 0,05; 0,15$ та $0,25$). У розрахунках прийнято клас бетону С25/30, поздовжню арматуру класу А500С та сталеву хвилеподібну фібру довжиною 60 мм.

На підставі отриманої моделі для визначення моменту тріщиноутворення залежно від прийнятих факторів варіювання в роботі [2] зроблено висновок, що дисперсне армування шару бетону в розтягнутій зоні змінює напружено-деформований стан поперечного перерізу та суттєво збільшує момент тріщиноутворення. Так, у балці з відсотком армування поздовжньою арматурою 1,5 %, відсотком дисперсного армування 1,8 % і товщиною шару дисперсного армування 9 см момент тріщиноутворення збільшився у 2,4 рази порівняно з балкою, у якої відповідні фактори впливу мали значення 0,5%; 1,0 %; 15 см.

У роботі [2] запропоновано методику визначення моменту тріщиноутворення в комбіновано армованих згинальних елементах та виявлено зменшення міцності дисперсно армованого бетону за однакового коефіцієнта фібрового армування зі збільшенням розмірів поперечного перерізу елементів.

Об'ємні експериментально-теоретичні дослідження фізико-механічних характеристик високоміцних бетонів і фібробетонів висвітлено в роботі [3]. Наведено загальні характеристики фібробетонів, методику визначення оптимального вмісту фібри в бетоні та способи її введення, розглянуто особливості структури, деформативності та морозостійкості фібробетонів.

У виконаних дослідженнях в роботі [4] доведена доцільність комбінованого армування при зведенні висячих оболонок, описаних по поверхні гіперболічного параболоїда.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою досліджень є узагальнення та удосконалення методики визначення оптимальних параметрів комбінованого армування залізобетонних

центрально розтягнутих і згинальних елементів, у яких у процесі експлуатації не допускається утворення тріщин.

Для досягнення мети поставлені для вирішення такі завдання:

- вибрати для дослідження залізо-бетонні елементи, встановити їх розміри;
- встановити основні фактори впливу та умови планування експерименту;
- виконати математично планований експеримент та побудувати математичні моделі для визначення внутрішніх зусиль в елементах перед утворенням тріщин;
- на основі аналізу отриманих математичних моделей визначити оптимальні параметри дисперсного армування досліджуваних елементів.

Основна частина дослідження. Для дослідження як центрально розтягнутий елемент прийнято нижній пояс ферми прольотом 18 м, який має поперечний прямокутний поперечний переріз розміром $b \times h = 0,28 \times 0,24$ м. За розрахунком несучої здатності за граничними станами першої групи нижній пояс армується 4 \emptyset 28A500C ($A_s = 24,63$ см²). Прийнятий поперечний переріз за розміром і формою суттєво відрізняється від поперечного перерізу, який досліджено в роботі [1]. Це дасть додаткову можливість оцінити вплив розмірів елементів на величину міцності дисперсно армованого бетону.

Як згинальний елемент розглядається балка з розмірами поперечного перерізу $h \times b = 0,4 \times 0,2$ м. У розтягнутій зоні балка армована 2 \emptyset 25A500C ($A_s = 9,82$ см²), які розташовано в один ряд по висоті. Віддалі від нижньої розтягнутої грані балки до центра ваги арматури становить $a_s = 4,5$ см.

Для підвищення тріщиностійкості нижній пояс ферми виконується з дрібнозернистого бетону з дисперсним армуванням усього об'єму. У згинальних елементах дисперсне армування бетону з товщиною шару c_f доцільно застосовувати тільки в розтягнутій зоні.

Дисперсне армування досягається введенням в об'єм бетонної матриці певної

кількості фібри. Бетон, армований рівномірно розподіленими в його об'ємі сталевими фібрами, називають сталевібро-бетоном [5]. Відношення об'єму фібри до одиниці об'єму бетонної матриці називають коефіцієнтом об'ємного дисперсного армування μ_f (може виражатися у відсотках).

Опір сталевібробетону утворенню тріщин значною мірою залежить від його міцності при розтяганні, яка на стадії проєктування визначається за формулами, наведеними в [5], і залежить від призмової міцності бетону при стисканні f_{ck} , а тому її слід приймати як основний фактор впливу і в числовому експерименті вона підлягає варіюванню.

На міцність сталевібробетону на розтяг суттєво впливають такі параметри дисперсного армування, як вид і товщина фібри l_f та коефіцієнт (відсоток) об'ємного армування μ_f . Ці фактори потрібно включати до основних факторів впливу, і вони в числовому експерименті підлягають варіюванню.

Щодо впливу на міцність сталевібробетону геометричних розмірів поперечного перерізу елементів, то вони, як правило, призначаються за конструктивними й економічними міркуваннями і варіюванню в числовому експерименті не підлягають. У згинальних елементах також впливає на міцність сталевібробетону при розтягу товщина його шару в розтягнутій зоні. Як доведено в експериментах [2], міцність сталевібробетону збільшується зі зменшенням товщини його шару c_f , але за конструктивними вимогами вона повинна бути не меншою за захисний шар сталевібробетону. З метою забезпечення надійного зчеплення поздовжньою арматурою рекомендується товщину шару сталевібробетону в розтягнутій зоні згинальних елементів приймати у подвійній віддалі від нижньої грані елемента до центра ваги розтягнутої арматури ($c_f = 2a_s$). У цьому разі варіювання величини c_f в експерименті також не доцільно.

Площа поперечного перерізу поздовжньої арматури A_s також не підлягає варіюванню, оскільки вона визначається розрахунком елементів за першою групою граничних станів.

Зважаючи на наведене, сформовано узагальнені умови планування експериментів для центрально розтягнутих та згинальних елементів (табл. 1).

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований	-1	0	+1	
Міцність f_{ck} , МПа	x_1	18,5	22,0	25,5	3,5
Довжина фібр l_f , мм	x_2	40	50	60	10
Коефіцієнт армування μ_{fv}	x_3	0,004	0,011	0,018	0,007

В умовах планування експерименту характеристичні значення міцності бетону f_{ck} представлені для бетонів класів С20/25, С25/30 та С30/35. Довжина сталевих фібр відповідає вимогам ТУ У В.2.7.-28.7-00191046-015:2007 «Фібра із сталевого дроту». Коефіцієнт об'ємного армування фіброю з економічних міркувань приймається не більшим $\mu_{fv} < 0,018$ [5].

За вихідні параметри u_i в числових математично планованих експериментах прийнято міцність сталевібробетону при розтягу f_{cftk} , розтягуючі зусилля в

центрально розтягнутому елементі перед утворенням тріщин S_{cftk} , момент у згинальному елементі перед утворенням тріщин M_{cftk} .

Міцність сталевібробетону на розтяг визначається за формулами держстандарту [5], структура яких залежить від відношення довжини анкерування фібри в бетоні f_{fb} , що забезпечує її розрив при висмикуванні, до її довжини l_f . При $f_{fb} \geq l_f/2$, що буває в цих експериментах, для всіх сполучень бетону і фібри значення f_{cftk} обчислюються за формулою

$$f_{cftk} = 1,1 f_{ck} \left[K_T \frac{k_{000}^2 \mu_{fv}^{l_{ff}}}{8 y_{ff} d_{ff}} + 0,008 - \sigma_{\mu} \right]_{ccv}, \quad (1)$$

де K_T – коефіцієнт, який залежить від коефіцієнта μ_{fv} і знаходиться за формулою [5] (при $\mu_{fv} = 0,004; 0,011$ і $0,018$ відповідно $K_T = 0,47; 0,96$ і $0,98$);

k_{or} – коефіцієнт, який ураховує орієнтацію фібр в об'ємі бетону залежно від співвідношення розмірів поперечного перерізу елемента до довжини фібри, приймається за таблицю [6];

η_f – коефіцієнт, що враховує вид фібр (для хвилеподібної фібри $\eta_f = 0,85$);

d_f – діаметр фібри ($d_f = 1$ мм).

У центрально розтягнутому елементі опір зовнішньому навантаженню чинять внутрішні зусилля, які виникають у перерізі із сталевібробетону $S_{cf,cre}$ та в розтягнутій арматурі $S_{s,cre}$ [1, 5]. Вважається, що тріщини в сталевібробетоні можуть виникати, коли граничні деформації будуть перевищувати $\varepsilon_{cftu} = 2 f_{cftk} / E_{ck}$ (E_{ck} – початковий модуль пружності дрібнозернистого бетону) [1]. Приймавши деформації в арматурі перед утворенням тріщин рівними $\varepsilon_s = \varepsilon_{cftu}$, повне зусилля S_{cftk} (рис. 1), яке може сприйняти елемент перед утворенням тріщин, можна визначити за формулою

$$S_{ccctk} = S_{ccc,crk} + S_{s,crk} = bhf_{ccctk} + \varepsilon_{ccctu} E_s A_s, \quad (2)$$

де E_s – модуль пружності поздовжньої арматури.

У згинальних елементах зовнішньому згинальному моменту перед утворенням

тріщин у розтягнутій зоні чинять опір моменти, які виникають від внутрішніх зусиль у стиснутій зоні бетону, у розтягнутій зоні бетону і сталевібробетону та в розтягнутій арматурі (рис. 2).

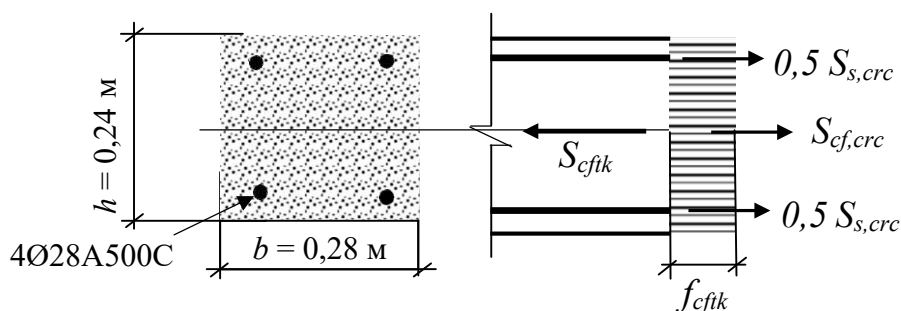


Рис. 1. Напружений стан центрально розтягнутого елемента перед утворенням тріщин

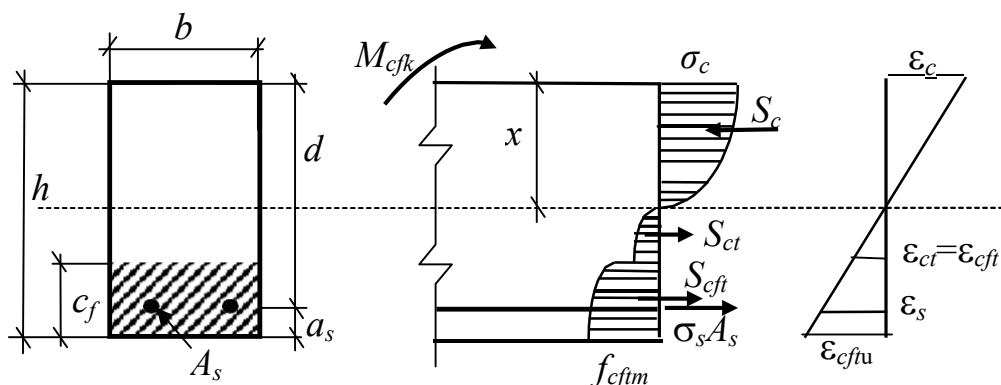


Рис. 2. Напружено-деформований стан поперечного перерізу згинального залізобетонного елемента з дисперсно армованим шаром у розтягнутій зоні перед утворенням тріщин

Згинальний момент, який може сприйняти згинальний елемент перед утворенням тріщин можна визначити за формулами, які наведено в роботі [2]

$$MM_{ccck} = MM_c + MM_{ct} + MM_{ccct} + M_s \quad (3)$$

де M_c , M_{ct} , M_{cft} і M_s – згинальні моменти від внутрішніх зусиль відповідно в стиснутій зоні бетону, у розтягнутому бетони без

додавання фібри, в розтягнутому дисперсно армованому бетони і в розтягнутій арматурі відносно нейтральної лінії (рис. 2).

Умови планованого експерименту реалізуються за допомогою матриці плану Бокса – Бенкіна [6], яка містить у собі 13 точок плану, у кожній із яких визначаються вихідні параметри y_i за формулами (1) – (3). План числового експерименту та значення вихідних параметрів наведено в табл. 2.

Матриця плану Бокса-Бенкіна та вихідні параметри
(в дужках подано кодові значення факторів)

Точки плану	Матриця планування			Вихідні параметри			
	x_1	x_2	x_3	Розтягнутий елемент		Згинальний елемент	
	f_{ck} , МПа	l_f , мм	μ_{fv}	f_{ctk} , МПа	S_{ctk} , кН	f_{ctk} , МПа	M_{ctk} , МПа
1	25,5 (1)	60 (1)	0,011(0)	2,92	317,0	3,16	17,1
2	25,5 (1)	40 (-1)	0,011 (0)	2,61	304,0	2,70	16,9
3	18,5 (-1)	60 (1)	0,011 (0)	2,12	246,9	2,29	14,0
4	18,5(-1)	40 (-1)	0,011(0)	1,83	220,1	1,96	11,9
5	25,5 (1)	50 (0)	0,018 (1)	3,10	336,6	3,38	18,3
6	25,5 (1)	50 (0)	0,004(-1)	2,31	250,8	2,34	12,4
7	18,5 (-1)	50 (0)	0,018(1)	2,25	262,0	2,45	15,2
8	18,5 (-1)	50 (0)	0,004(-1)	1,67	194,5	1,70	10,2
9	22,0 (0)	60 (1)	0,018(1)	2,92	327,6	3,26	19,2
10	22,0 (0)	60 (1)	0,004(-1)	2,02	226,6	2,05	11,6
11	22,0 (0)	40 (-1)	0,018(1)	2,47	277,1	2,60	15,0
12	22,0 (0)	40 (-1)	0,004(-1)	1,97	221,0	1,98	11,2
13	22,0 (0)	50 (0)	0,011(0)	2,37	265,9	2,52	13,5

За результатами числового планового експерименту для кожного вихідного

параметра отримують квадратичне рівняння регресії, яке має такий вигляд:

$$y_{ii} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (4)$$

де b_0 , b_{ii} , b_{iii} , b_{iiii} – коефіцієнти рівняння регресії, які для плану Бокса-Бенкіна визначаються статистичним шляхом за формулами [6].

Ураховуючи значущі коефіцієнти, які визначаються за критерієм Стюдента, рівняння (4) набуває вигляду математичної моделі для кожного вихідного параметра:

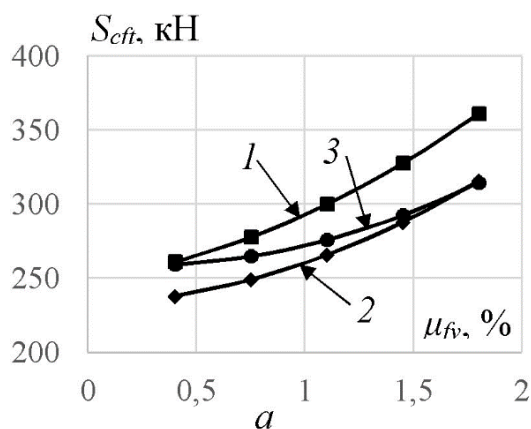
$$S_{ccctk} = 265,9 + 32,6x_1 + 12,0x_2 + 38,8x_3 + 20,0x_1^2 + 21,1x_2^2 + 11,0x_3^2 + 11,2x_2x_3. \quad (5)$$

$$M_{ccck} = 13,5 + 1,7x_1 + 2,8x_3 + 1,3x_1^2 + 1,8x_2^2 + 2,2x_3^2 + 1,0x_2x_3. \quad (6)$$

Аналіз результатів, наведених у табл. 2, свідчить, що дисперсне армування нижнього поясу ферми може збільшити його опір тріщиноутворенню на 50–60 %. Так, для класу бетону C25/30 при

використанні фібри 60 мм і коефіцієнті об'ємного дисперсного армування збільшення зусилля перед утворенням тріщин становить 62,2 %.

З графіків залежності зусилля тріщиноутворення від основних факторів впливу для класу бетону С 25/30 (рис. 3, а) видно, що воно збільшується майже пропорційно зі збільшенням коефіцієнта



об'ємного дисперсного армування. Залежність зусилля тріщиноутворення від довжини фібри має криволінійний характер (рис. 3, б), водночас найбільш ефективною є фібра довжиною 60 мм.

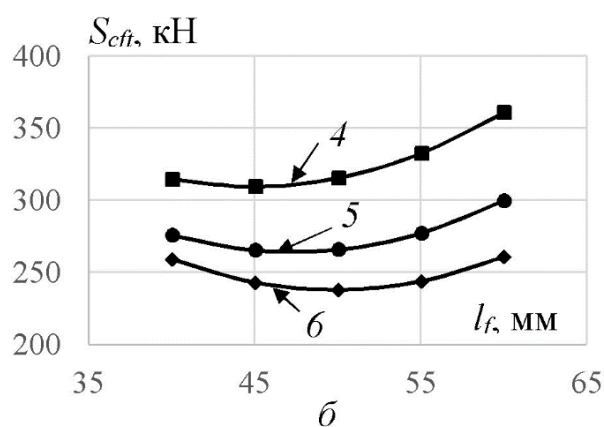


Рис. 3. Залежність зусилля тріщиноутворення S_{cft} від відсотка об'ємного дисперсного армування μ_{fv} (а) та довжини фібри l_f (б):
1, 2, 3 – відповідно довжина фібри 60, 50, 40 мм; 4, 5, 6 – відповідно коефіцієнт об'ємного армування 0,018; 0,011; 0,004

Суттєво підвищується тріщиноустійкість згинальних елементів з частковим дисперсним армуванням розтягнутої зони бетону. Графіки залежності моменту тріщиноутворення M_{cft} від довжини фібри та коефіцієнта об'ємного армування, які побудовано за формулою (6) засвідчують криволінійний їх характер (рис. 4).

Особливо момент тріщиноутворення стрімко зростає зі збільшенням відсотка об'ємного армування при використанні фібри довжиною 60 мм (рис. 4, а).

В елементі, для якого використовується бетон класу С25/30, при армуванні фіброю довжиною 60 мм з коефіцієнтом об'ємного армування 0,018 момент тріщиноутворення збільшується у 2,4 рази. Для класів бетону С20/25 і С30/35 таке збільшення становить 2,2 рази.

Якщо аналізувати графіки на рис. 3, б і 4, б, можна дійти висновку, що найбільш ефективна фібра для дисперсного армування довжиною 40 і 60 мм. Найбільш раціональним класом бетону виявився клас бетону С25/30.

Отримані математичні моделі (5) і (6) дають можливість проаналізувати вплив параметрів дисперсного армування на зусилля тріщиноутворення в комбіновано армованих залізобетонних елементах та визначити їхні оптимальні значення. Для розглянутих центрально розтягнутого та згинального елемента з метою збільшення опору тріщиноутворенню для їх виготовлення можна рекомендувати клас бетону С25/30, довжину фібри 60 мм при коефіцієнті об'ємного армування 0,018 (1,8 %).

Визначення параметрів комбінованого армування залізобетонних конструкцій можна виконувати в такій послідовності:

- визначаються розміри поперечного перерізу елементів;
- розрахунком за граничними станами першої групи призначається поздовжня стержнева арматура та її захисний шар бетону;
- у розтягнутій зоні згинальних елементів визначається товщина шару для дисперсного армування;

- призначаються з урахуванням конструктивних та економічних вимог фактори впливу, їх інтервали варіювання;
- формуються умови для планованого експерименту;
- виконується математично планований експеримент та будуються математичні

моделі для визначення зусиль опору тріщиноутворенню в бетоні;

- на основі математичних моделей визначаються параметри дисперсного армування з урахуванням того, щоб за такого армування зусилля тріщиноутворення перевищували зусилля від зовнішнього навантаження.

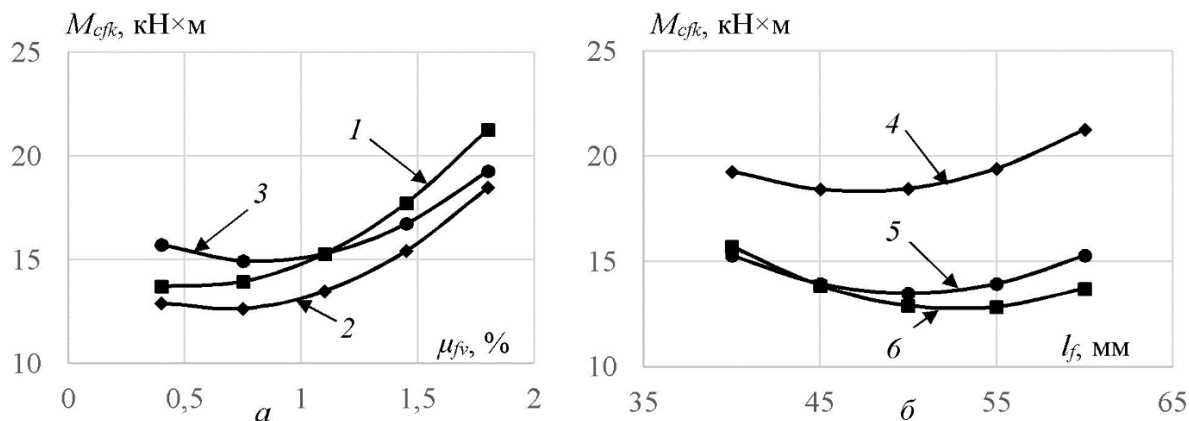


Рис. 4. Залежність моменту тріщиноутворення в згинальному елементі M_{cft} від відсотка об'ємного дисперсного армування μ_{fv} (а) та довжини фібри l_f (б): 1, 2, 3 – відповідно довжина фібри 60, 50, 40 мм; 4, 5, 6 – коефіцієнт об'ємного армування 0,018; 0,011; 0,004

Висновки

1. Розроблено узагальнену методику визначення параметрів комбінованого армування центрально розтягнутих та згинальних залізобетонних елементів, яка базується на аналізі математичних моделей внутрішніх зусиль, що чинять опір утворенню тріщин.

2. Установлено основні фактори впливу на тріщиностійкість елементів, які підлягають варіюванню при виконанні математично планованого експерименту.

3. Доведено, що при використанні дисперсного армування зусилля тріщиностійкості в елементах можуть бути збільшені у два і більше разів.

Список використаних джерел:

1. Тріщиностійкість центрально розтягнутих комбіновано армованих залізобетонних елементів / О. В. Андрійчук, В. Є. Бабич, О. Є. Поляновська, І. В. Швець. *Сучасні технології та методи розрахунків в будівництві: зб. наук. праць*. Луцьк: Луцький НТУ, 2020. Вип. 14. С. 13–25.

2. Бабич В. Є., Поляновська О. Є., Швець І. В. Вплив дисперсного армування розтягнутої зони залізобетонних балок на їхню тріщиностійкість. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: Волинські обереги, 2019. Вип. 37. С. 118–128.

3. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Л. Й. Дворкін, Є. М. Бабич, В. В. Житковський та ін. Рівне: НУВГП, 2017. 331 с.

4. Determination of stresses in thin-walled steel fiber reinforced concrete roofs in the form of hyperbolic paraboloid / Ye. M. Babych, O. V. Andriichuk, S. O. Uzhehov, R. V. Pasichnyk, D. Y. Kysliuk. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering–MSE, 2019. Vol. 708, N 1, 012042, P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012042>.

5. ДСТУ–Н Б В.2.6-218:2016. Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Чинний з 2017-04-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 49 с.

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

Бабич Володимир Євгенійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів і тунелів, будівельної механіки та опору матеріалів Національного університету водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0003-2811-2423. E-mail: v.e.babich@nuwm.edu.ua.

Полянська Олена Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів і тунелів, будівельної механіки та опору матеріалів Національного університету водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0001-8334-8827. E-mail: o.le.polianovska@nuwm.edu.ua.

Швець Ігор Вікторович, аспірант кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0001-5208-2667. E-mail: 43206@ukr.net.

Babich Volodymyr, PhD (Tech), docent of the department of bridges, tunnels, strength of materials and structural mechanics in National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0003-2811-2423. E-mail: v.e.babich@nuwm.edu.ua.

Polianovska Olnf, PhD (Tech), docent of the department of bridges, tunnels, strength of materials and structural mechanics in National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0001-8334-8827. E-mail: o.le.polianovska@nuwm.edu.ua.

Shvets Igor, postgraduate student, department of industrial, civil engineering and engineering structures in National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0001-5208-2667. E-mail: 43206@ukr.net.

Статтю прийнято 28.10.2021 р.