

## ЗМІНА ШИРИНИ РОЗКРИТТЯ ПОХИЛИХ ТРІЩИН У ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПРИ ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

© Корнійчук О.І., Масюк Г.Х., 2010

Розглянуто результати експериментальних досліджень тріщиностійкості похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень. Запропонована вдосконалена методика розрахунку ширини розкриття похилих тріщин за дії зазначених навантажень.

**Ключові слова:** залізобетон, згинальні елементи, малоциклові знакозмінні навантаження, похилий переріз, тріщиностійкість.

The article is devoted to the experimental research results of the fracture strength of oblique sections of reinforced-concrete bending elements under the action of the alternating low-cycle loadings. Improved calculation method of the opening widths of oblique crack under the action of the noted loadings was offered.

**Keywords:** reinforced-concrete, bending elements, alternating low-cycle loadings, oblique section, fracture strength.

**Вступ.** Питання тріщиностійкості є одним з головних напрямів у дослідженні залізобетону. Вивчення тріщиностійкості залізобетонних елементів ведеться одночасно з дослідженнями їх міцності та деформативності. Після появи тріщин у залізобетонних елементах порушується сумісна робота бетону та арматури, тому контроль за шириною розкриття нормальних та похилих тріщин має надзвичайно важливе значення з погляду забезпечення надійної роботи конструкцій загалом, забезпечення корозійної стійкості арматури та дотримання естетичних вимог.

**Постановка проблеми.** На кафедрі інженерних конструкцій НУВГП протягом 2005–2008 рр. велись дослідження впливу малоциклових знакозмінних навантажень на міцність та тріщиностійкість похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів. Об'єктом досліджень були залізобетонні балки з номінальними розмірами 100x160x2000 мм, що випробовувались за статичною схемою однопролітної вільно опертої балки, завантаженої двома зосередженими силами. Поздовжня арматура всіх зразків прийнята діаметром 14 мм класу А500С (армування – подвійне, симетричне).

У процесі експериментальних досліджень змінювали такі параметри: клас бетону дослідних зразків (В30, В25 та В15); характер поперечного армування дослідних зразків (хомути Ø4 мм класу Вр-І з кроком 75 мм, хомути Ø3 мм класу Вр-І з кроком 45 мм); проліт зрізу  $c$  (600, 450 та 300 мм); рівень знакозмінного навантаження  $\eta$  (знакозмінне навантаження рівня 0,65 від руйнівного з довантаженням на п'ятому циклі до рівня 0,8; знакозмінне навантаження рівня 0,5 з довантаженням до рівня 0,8 від руйнівного, інші види завантаження). Балки завантажувались до десяти циклів знакозмінним навантаженням (у напівциклах "а" і "б").

Методика експериментальних досліджень, режими завантажень та номенклатура дослідних зразків наведені в роботі [1].

Одним із завдань експериментальних досліджень було вивчення характеру утворення, розвитку та ширини розкриття нормальних та похилих тріщин у згинальних елементах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналізуючи результати експериментальних досліджень, можна зробити висновок, що процеси тріщиноутворення та розвитку тріщин при одноразовому завантаженні та при дії малоциклового знакозмінного навантаження істотно

відрізняються. У статтях [2] та [3] описані характер тріщиноутворення та процеси розвитку нормальних та похилих тріщин у дослідних зразках. У цій роботі ми розглянемо питання ширини розкриття похилих тріщин.

На основі аналізу експериментальних даних можна зробити висновок, що чим вищий був рівень попереднього знакозмінного навантаження, тим більшу ширину розкриття мали тріщини за однакового навантаження на наступних циклах. Крім того, необхідно відзначити, що ширина розкриття похилих тріщин у напівциклах “б”, тобто при зміні знака навантаження, є більшою, ніж в напівциклах “а”. Різниця в ширині розкриття похилих тріщин є найбільшою в першому циклі, при подальших циклах навантаження ця різниця зменшується (окрім випадків руйнування балок при довантаженні).

Згідно з чинними в нашій країні нормами розрахунок ширини розкриття похилих тріщин слід виконувати в місці перетину з поперечною арматурою та на рівні поздовжньої розтягнутої арматури.

Ширину розкриття похилих тріщин на рівні поперечної арматури при армуванні балки хомутами обчислюють за формулою:

$$a_{crc} = \varphi_l \cdot \eta \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \frac{\sigma_{sw}}{E_s} \cdot d_w, \quad (1)$$

де  $d_w$  – діаметр хомутів;  $\sigma_{sw} = \frac{Q - Q_{b1}}{\varphi_{sw} \cdot A_{sw} \cdot h_0} \cdot s \leq R_{s,ser}$  – напруження у хомутах.

Формула (1) може використовуватись для визначення ширини розкриття похилих тріщин у напівциклі “1-а”.

Похилі перерізи при дії на балку знакозмінних навантажень постійно перебувають у складному напружено-деформованому стані: при зміні знака навантаження змінюється знак головних стискаючих та розтягуючих напружень в бетоні. Такий характер роботи призводить до зниження опору бетону розтягу, і як наслідок, при зміні знака навантаження (в напівциклах “б”) вже на першому циклі збільшується ширина розкриття похилих тріщин. Це необхідно враховувати, тому ширину розкриття похилої тріщини в напівциклі “1-б” пропонується знаходити за виразом:

$$a_{crc,1}^b = a_{crc,1}^a \cdot \beta, \quad (2)$$

де  $a_{crc,1}^a$  – ширина похилої тріщини в напівциклі “1-а”, визначена за формулою (1);  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує збільшення ширини розкриття похилої тріщини при зміні знака навантаження.

Значення коефіцієнта  $\beta$  прийнято на основі статистичної обробки експериментальних даних:

- $\beta = 1,5$  для балок з відносним прольотом зрізу  $c/h \leq 2$  ( $c = 300$  мм);
- $\beta = 2,0$  для балок з відносним прольотом зрізу  $c/h > 2$  ( $c = 450$  та  $600$  мм).

Оскільки на підставі аналізу експериментальних даних встановлено, що малоциклове знакозмінне навантаження зменшує жорсткість згинальних залізобетонних елементів порівняно з одноразовим завантаженням, тим самим збільшуючи ширину розкриття тріщин залежно від кількості циклів та рівня навантаження, то необхідно враховувати зміну в розкритті похилих тріщин від указаних параметрів.

Ширину розкриття похилих тріщин у напівциклах “а” знакозмінного навантаження з урахуванням можливого довантаження зразків, за умови, що кількість циклів  $n \leq 10$ , пропонується визначати за таким виразом:

$$a_{crc,n}^a = a_{crc,1}^a + \Delta a_{crc}, \quad (3)$$

де  $a_{crc,1}^a$  – ширина похилої тріщини в напівциклі “1-а”, визначена за формулою (1);  $\Delta a_{crc}$  – приріст ширини розкриття тріщин внаслідок дії знакозмінного навантаження:

$$\Delta a_{crc} = \alpha \cdot \frac{\sigma_{sw,n}}{E_s} \cdot d_w \cdot \ln n, \quad (4)$$

де  $\sigma_{sw,n}$  – напруження в хомутах на цьому циклі навантаження, що визначається згідно з прийнятою методикою;  $n$  – кількість циклів знакозмінного навантаження ( $n \leq 10$ );  $\alpha$  – безрозмірний коефіцієнт, попередньо його можна прийняти  $\alpha = 4,1$ .

**Експериментальні та теоретичні значення ширини розкриття похилих тріщин у дослідних зразках**

№	Назва балки	Ширина похилих тріщин на циклах навантаження, мм															
		1а		1б		3а		3б		5а		5б		9а		9б	
		Екс. Т.	Т./ Екс.	Екс. Т.	Т./ Екс.	Екс. Т.	Т./ Екс.	Екс. Т.	Т./ Екс.	Екс. Т.	Т./ Екс.	Екс. Т.	Т./ Екс.	Екс. Т.	Т./ Екс.	Екс. Т.	Т./ Екс.
1	БЗНЦВ4-6/0,65	0.08	1.12	0.20	0.89	0.12	1.14	0.22	1.24	0.18	0.88	0.30	1.06	0.16	0.93	0.22	1.35
		0.09		0.18		0.14		0.27		0.16		0.32		0.30			
2	БЗНЦН4-6/0,65	0.10	1.20	0.20	1.20	0.12	1.37	0.30	1.09	0.40	0.47	>1					
		0.12		0.24		0.16		0.33		0.19		0.38					
3	БЗНЦН3-6/0,5	0.06	1.20	0.10	1.43	0.08	1.22	0.13	1.50	0.20	0.62	>1					
		0.07		0.14		0.10		0.20		0.12		0.25					
4	БЗНЦН3-6/0,65 _БД	0.09	1.11	0.18	1.11	0.12	1.13	0.30	0.90								
		0.10		0.20		0.14		0.27									
5	БЗНЦВ4-4,5/0,65	0.07	1.27	0.16	1.12	0.12	1.14	0.20	1.37	0.16	0.99	0.28	1.13	0.14	1.06	0.27	1.10
		0.09		0.18		0.14		0.27		0.16		0.32		0.15		0.30	
6	БЗНЦВ4-4,5/0,5	0.06	1.18	0.10	1.42	0.08	1.35	0.12	1.81	0.14	1.00	0.20	1.40	0.12	1.10	0.18	1.46
		0.07		0.14		0.11		0.22		0.14		0.28		0.13		0.26	
7	БЗНЦ3-4,5/0,65	0.10	0.76	0.30	0.51	0.18	0.62	0.35	0.64	0.28	0.46	0.50	0.51	0.30	0.40	0.50	0.48
		0.08		0.15		0.11		0.22		0.13		0.26		0.12		0.24	
8	БЗНЦ3-4,5/0,5	0.07	1.08	0.13	1.17	0.10	1.12	0.16	1.40	0.20	0.64	0.40	0.64	0.18	0.67	0.38	0.64
		0.08		0.15		0.11		0.22		0.13		0.26		0.12		0.24	
9	БЗНЦ4-4,5/0,65	0.10	0.74	0.30	0.50	0.20	0.55	0.45	0.49	0.30	0.42	>1					
		0.07		0.15		0.11		0.22		0.13		0.25					
10	БЗНЦВ4-3/0,65	0.10	0.89	0.14	0.96	0.12	1.14	0.16	1.28	0.18	0.88	0.20	1.19	0.16	0.93	0.20	1.11
		0.09		0.13		0.14		0.20		0.16		0.24		0.15		0.22	
11	БЗНЦВ4-3/0,5	0.08	0.88	0.12	0.88	0.10	1.08	0.14	1.16	0.16	0.87	0.22	0.95	0.12	1.10	0.19	1.04
		0.07		0.11		0.11		0.16		0.14		0.21		0.13		0.20	
12	БЗНЦ3-3/0,65	0.10	0.76	0.15	0.76	0.12	0.93	0.18	0.93	0.16	0.80	0.28	0.69	0.14	0.86	0.25	0.72
		0.08		0.11		0.11		0.17		0.13		0.19		0.12		0.18	
Серед. арифм. відношення		0.98	1.03		0.98		0.99		1.09		0.71		0.90		0.80		0.93
Серед. квадр. відхилення		0.30	0.19		0.31		0.28		0.38		0.20		0.29		0.28		0.33
Коефіцієнт мінливості, %		30.3	18.5		31.7		27.7		34.6		27.7		31.8		35.2		35.1

У разі збільшення рівня навантаження на  $n$ -му циклі приріст ширини розкриття похилих тріщин визначаємо за виразом (4). Якщо ж після довантаження балки зазнають навантаження попереднього меншого рівня, то значення приросту  $\Delta a_{crc}$ , що входить у формулу (3), необхідно визначати за виразом:

$$\Delta a_{crc} = \alpha \cdot \frac{\sigma_{sw, дов}}{E_s} \cdot d_w \cdot \ln n_{дов} - \frac{\sigma_{sw, n}}{E_s} \cdot d_w, \quad (5)$$

де  $\sigma_{sw, дов}$  – напруження в хомутах під час довантаження на відповідному циклі  $n_{дов}$ ;  $\sigma_{sw, n}$  – напруження в хомутах на цьому циклі навантаження (після довантаження), що визначається згідно з прийнятою методикою.

Для визначення ширини розкриття похилих тріщин у напівциклах “б” знакозмінного навантаження до виразу (3) необхідно ввести вже згаданий коефіцієнт  $\beta$ , що враховує збільшення ширини розкриття тріщин при зміні знака навантаження:

$$a_{crc, n}^b = a_{crc, 1}^b + \Delta a_{crc} \cdot \beta. \quad (6)$$

Відзначимо, що формули (4) та (5) безпосередньо пов’язані з рівнем знакозмінного навантаження  $\eta$  (через напруження в поперечній арматурі  $\sigma_{sw}$ ) та кількістю циклів знакозмінного навантаження  $n$ . Але, з огляду на розвиток тріщин у дослідних зразках, необхідно зазначити, що:

- за рівня навантаження  $\eta=0,5$  та  $0,65$  від руйнівного ширина розкриття похилих тріщин стабілізується до п’ятого циклу навантаження;
- після довантаження зразків до рівня  $\eta=0,8 \cdot F_u$  та подальшого завантаження попереднім рівнем  $\eta=(0,5 \dots 0,65) \cdot F_u$  ширина похилих тріщин у напівциклах майже не збільшувалась.

Експериментальні значення ширини розкриття похилих тріщин дослідних зразків, які під час випробування зазнавали дії малоциклових знакозмінних навантажень, та їх теоретичні значення, розраховані за запропонованими формулами, наведені в табл. 1.

Запропонована методика розрахунку дає задовільну збіжність результатів із експериментальними даними (середньоарифметичне відношення  $0,98$ , коефіцієнт мінливості  $30,3\%$ ), що свідчить про прийнятність її застосування. Проте необхідно продовжувати дослідження для накопичення експериментальних даних, їх подальшої статистичної обробки та уточнення введених коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$ .

Розрахунок ширини розкриття похилих тріщин на рівні поздовжньої арматури в згинальних елементах, які зазнають дії малоциклових знакозмінних навантажень, необхідно виконувати згідно з чинними нормами, але з урахуванням наведеної методики.

1. Масюк Г.Х. *Задачі та методика експериментальних досліджень міцності та тріщиностійкості похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів, що зазнають впливу малоциклового знакозмінного навантаження* / Г.Х. Масюк, О.І. Корнійчук // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції будівлі та споруди. Збірник наукових праць.* – Рівне. – 2006. – Вип. 14. – С. 246–252.
2. Масюк Г.Х. *Експериментальні дослідження тріщиностійкості похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень* / Г.Х. Масюк, О.І. Корнійчук // *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: збірник наукових праць.* – Львів, 2007. – Вип. 7. – С. 289–296.
3. Масюк Г.Х. *Експериментально-теоретичні дослідження тріщиностійкості похилих перерізів залізобетонних елементів, що згинаються за дії малоциклового знакозмінного навантаження* / Г.Х. Масюк, О.І. Корнійчук // *Вісник ОДАБА. Наукове видання.* – Одеса: Зовнішнєрекламсервіс. – 2009. – Вип. № 33. – С. 99–104.