

**ЗМІНА ШИРИНИ РОЗКРИТТЯ НОРМАЛЬНИХ ТРІЩИН В
ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПРИ ДІЇ
МАЛОЦИКЛОВИХ ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

**CHANGE OF NORMAL CRACK WIDTH IN THE REINFORCED-
CONCRETE BENDING ELEMENTS UNDER THE ACTION OF
ALTERNATING LOW-CYCLE LOADINGS**

Корнійчук О.І., к.т.н. доцент, [ORCID:0000-0002-5678-8314](https://orcid.org/0000-0002-5678-8314), **Масюк Г.Х.**, к.т.н. професор, [ORCID:0000-0001-5207-3111](https://orcid.org/0000-0001-5207-3111), **Алексієвець І.І.**, к.т.н. доцент, [ORCID:0000-0002-5784-3119](https://orcid.org/0000-0002-5784-3119), **Алексієвець В.І.**, к.т.н. доцент, [ORCID:0000-0002-1274-888X](https://orcid.org/0000-0002-1274-888X), **Іванюк А.М.**, к.т.н. доцент, [ORCID: 0000-0002-2314-4061](https://orcid.org/0000-0002-2314-4061) (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Korniichuk O.I., candidate of technical sciences associate professor, **Masjuk G.Ch.**, candidate of technical sciences professor, **Aleksiiievets I.I.**, candidate of technical sciences associate professor, **Aleksiiievets V.I.**, candidate of technical sciences associate professor, **Ivaniuk A.M.**, candidate of technical sciences professor (National university of water management and nature resources use, Rivne)

В статті розглянуті результати експериментальних досліджень тріщиностійкості згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень. Запропонована вдосконалена методика розрахунку ширини розкриття нормальних тріщин за дії зазначених навантажень.

One of the main tasks of the reinforced concrete structures calculation is to limit the cracks width in order to ensure corrosion resistance of the reinforcement, protect the reinforcement from extreme heat during fires, withstand aesthetic requirements and ensure the overall integrity of the structure. In order to guarantee the reliability of reinforced concrete structures it is necessary to know the patterns of changes in structures load-bearing capacity and deformability of materials under the action not only one-time static load, as provided in current regulations, but also in other loading modes.

The article is devoted to the results of experimental researches of the fracture strength of reinforced-concrete bending elements under the action of the alternating low-cycle loadings. During operation a large number of reinforced

concrete structures are exposed to low-cycle repeated and alternating loads, which may occur within the operating level or exceed it. Such loads include wind, process, seismic, temperature and humidity and others. Alternating loads and deformations occur in continuous beams, edge columns of industrial buildings, silos and prestressed structures and so on. Improved calculation method of the opening widths of normal crack under the action of the noted loadings was offered. The proposed calculation method gives a satisfactory agreement with the experimental data.

Ключові слова:

Згин, залізобетон, тріщина, знакозмінний.
Bending, reinforced concrete, crack, alternating.

Вступ. Як відомо при експлуатації більшості залізобетонних конструкцій в них виникають тріщини і це звичайне явище. Однією з основних задач розрахунку залізобетонних конструкцій є обмеження ширини розкриття цих тріщин для того, щоб забезпечити корозійну стійкість арматури, захистити арматуру від екстремального нагрівання під час пожеж, а також витримати естетичні вимоги та забезпечити загальну цілісність конструкції.

Для того щоб гарантувати надійність залізобетонних конструкцій потрібно знати закономірності зміни несучої здатності конструкцій і деформативності матеріалів за дії на конструкцію не лише одноразового статичного навантаження, як це передбачено в діючих нормативних документах, але і при інших режимах завантаження.

При експлуатації велика кількість залізобетонних конструкцій зазнає дії малоциклових повторних та знакозмінних навантажень, які можуть виникати в межах експлуатаційного рівня або перевищувати його. До таких навантажень можна віднести вітрові, технологічні, сейсмічні, температурно-вологісні та інші. Знакозмінні навантаження і деформації виникають в нерозрізних балках, колонах крайнього ряду промислових будівель, силосних та попередньо напружених конструкціях тощо.

Чинні норми розрахунку не враховують вплив таких завантажень на зміну фізико-механічних властивостей бетонів та напружено-деформованого стану, оскільки дане питання вивчено недостатньо.

Результати досліджень. На кафедрі промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП систематично проводяться дослідження впливу малоциклових повторних та знакозмінних навантажень на роботу залізобетонних елементів, в тому числі на прикладі залізобетонних балок з номінальними розмірами 100x160x2000 мм (див. рис. 1.а). Балки випробовувались за статичною схемою однопролітної вільно опертої балки, завантаженої двома зосередженими силами (рис. 1.б). В процесі експериментальних досліджень змінювали наступні параметри: клас бетону

дослідних зразків (С30, С25 та С15); проліт зрізу с (600, 450 та 300 мм); рівень знакозмінного навантаження η (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).

На початку експериментів випробовували балки на дію одноразового короткочасного ступеневого навантаження до руйнування, визначивши руйнівне навантаження для заданого прольоту зрізу. Балки завантажувались до десяти циклів знакозмінним навантаженням (в напівциклах «а» і «б»). Методика експериментальних досліджень, режими завантажень та номенклатура дослідних зразків наведені в роботі [1].

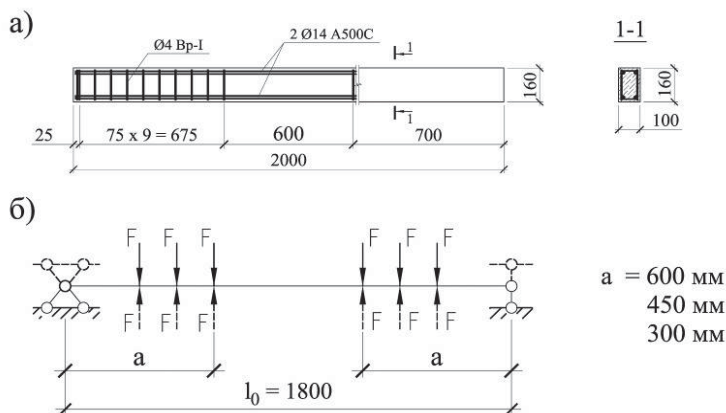


Рис. 1. Конструкція дослідних зразків (а) та схеми завантаження (б)

Дослідні зразки маркували наступним чином: БЗНЦ[б]-Y/Z — балки, що знаходились під дією малоциклового короткочасного знакозмінного навантаження рівня Z від руйнівного з довантаженням зразків на п'ятому циклі до рівня $\eta=0,8 \cdot F_u$; [б] – індекс, що позначає клас бетону балки (“В” – бетон кл. С30, “Н” – кл. С15, відсутність індексу – кл. С25); Y – проліт зрізу, при якому випробовувалась балка (в дм).

Під час експериментальних досліджень дослідні дані отримували за допомогою механічних та тензометричних приладів

В ході випробувань згинальних елементів на дію малоциклового короткочасного знакозмінного навантаження слідкували за утворенням, розвитком і шириною розкриття нормальних тріщин в дослідних зразках на кожному ступені завантаження.

Перші тріщини в балках були зафіксовані в зоні чистого згину за рівня навантаження $\eta=0,15-0,22$ від руйнівного, а в балках, що були виготовлені з високоміцного бетону кл. С30 – за рівня $\eta=0,22-0,30$. Після зміни знаку навантаження, незалежно від його попереднього рівня, нормальні тріщини

утворювались вже при менших навантаженнях. Для балок з бетону С30 це зниження складало 10-25%, а для решти дослідних зразків – 35-60%.

Якщо загалом проаналізувати як проходив процес розвитку тріщин в балках, що зазнавали впливу малоциклового знакозмінного навантаження, то на першому циклі відбулось інтенсивне утворення та розвиток тріщин. Другий і третій цикли навантаження характеризувались утворенням нових та розвитком вже існуючих тріщин. На четвертому циклі в балках, що зазнавали впливу знакозмінного навантаження рівня $\eta=0,5 \cdot F_u$, нові тріщини не утворювались, спостерігався лише незначний розвиток вже існуючих тріщин. Що стосується зразків, які до п'ятого циклу зазнавали дії знакозмінного навантаження рівня $\eta=0,65 \cdot F_u$, то можна говорити про незначне утворення та розвиток нормальних та похилих тріщин на даному циклі навантаження. Після зняття навантаження в дослідних зразках нормальні тріщини закриваються повністю.

Довантаження балок на п'ятому циклі до рівня $\eta=0,8 \cdot F_u$ викликало утворення нових та подальший розвиток вже існуючих тріщин. В балках, виготовлених з бетону кл. С15, довантаження призводило до надмірного розкриття нормальних та похилих тріщин (більше 1,0 мм) та руйнування зразків. Після розвантаження балок на п'ятому циклі нормальні, а особливо похилі тріщини повністю не закривались. При подальшому навантаженні зразків до попереднього рівня процес розвитку тріщин можна охарактеризувати як незначний, що не впливає на роботу зразків в цілому.

На основі аналізу експериментальних даних тріщиностійкості дослідних зразків 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 слід зазначити, що знакозмінне навантаження збільшує кількість як нормальних, так і похилих тріщин в порівнянні з балками-еталонами, що зазнавали впливу однозначного навантаження. Зі збільшенням циклу та рівня навантаження відстань між тріщинами постійно зменшувалась внаслідок утворення на ділянці між двома існуючими тріщинами третьої. При цьому найбільшу кількість тріщин, і відповідно найменшу відстань між ними, мали зразки з високим рівнем завантаження ($\eta=0,65/0,8 \cdot F_u$).

Появу третьої тріщини між двома існуючими пояснюється наявністю вузьких податливих ділянок в верхній частині стиснутого бетону (піки деформацій), які створюють умови для перегину балки в цьому перерізі, що призводить до збільшення розтягуючих напруг в бетоні між тріщинами.

Якщо говорити про вплив попереднього розтягу або стиску на розвиток нормальних тріщин в верхній та нижній зонах дослідних зразків на протязі експерименту, то якоїсь чіткої залежності відмітити не можна. Як правило, в напівциклі «б» нормальні тріщини в 1,2–1,5 рази більші за відповідні

тріщини в напівциклі «а», проте з повторенням циклів навантаження-розвантаження ця різниця зникає.

Появі тріщин у попередньо стиснутій зоні при переміні знаку навантаження сприяли раніше утворені тріщини на протилежній грані зразка. Місце утворення цих тріщин відповідало положенню тріщин попередньо розтягнутої зони. Уже при перших циклах знакозмінного навантаження відбувалось злиття окремих тріщин, а при збільшенні рівня та кількості циклів навантаження формувалась система перехресних та нормальних тріщин розриву з мікро- та макроруйнуванням, так як при їх розкритті й закритті краї тріщин не співпадали, що викликало руйнування поверхні бетону і відповідно дроблення бетону їх берегів. Нормальні тріщини з'єднуючись утворювали наскрізні, а система нормальних та похилих тріщин розділяла згинальний елемент на блоки, з'єднанні між собою поздовжньою та поперечною арматурою.

На основі приведених даних можна зробити висновок, що тріщиноутворення та процеси розвитку тріщин при одноразовому завантаженні згинального елемента та при дії малоциклового знакозмінного навантаження суттєво відрізняються величиною навантаження, при якому розкриваються перші тріщини, а також кількістю, довжиною та шириною розкриття тріщин. Якщо за одноразового навантаження процес утворення та розвитку тріщин пов'язаний тільки із зміною напружено-деформованого стану балок, то при дії циклічного знакозмінного навантаження – головним чином із зменшенням жорсткості дослідних зразків.

Теоретичні дослідження. Очевидно, що ширина розкриття тріщини – це накопичення деформацій поздовжньої арматури і бетону в межах зони їх активного зчеплення. Згідно формули (5.8) діючих норм **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]** ширину тріщини w_k необхідно визначати за виразом:

$$w_k = s_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}). \quad (1)$$

Максимальний крок тріщин визначається за формулою (5.11) **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**:

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{\rho,eff}}, \quad (2)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує характеристики зчеплення арматури (для арматури періодичного профілю $k_1 = 0,8$); k_2 – коефіцієнт, що враховує розподіл деформацій (для згину $k_2 = 0,5$); $k_3 = 3,4$; $k_4 = 0,425$; c – захисний шар бетону; ϕ – діаметр арматури;

$$\rho_{\rho,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \frac{\rho_s}{\lambda}, \quad (3)$$

де $A_{c,eff}$ – фактична площа розтягнутого бетону, що оточує поздовжню арматуру; $\rho_s = A_s / (b \cdot h)$ – коефіцієнт поздовжнього армування; $\lambda = h_{c,eff} / h$.

Коефіцієнт λ приймають найменшим з наступних значень:

$$\lambda = \min \left[2,5(1 - \delta); \frac{1 - \xi}{3}; 0,5 \right], \quad (4)$$

де $\delta = d / h$, $\xi = x / h$.

Різниця між середніми деформаціями в арматурі та деформаціями бетону між тріщинами визначається за формулою (5.9) [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{\rho,eff}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{\rho,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (5)$$

де σ_s – напруження у розтягнутій арматурі в перерізі з тріщинами; k_t – коефіцієнт, що залежить від тривалості навантаження (0,6 – для короткотривалого, 0,4 – для довготривалого); $f_{ct,eff}$ – середня величина міцності бетону на розтяг, допускається приймати $f_{ct,eff} = f_{ctm}$; $\alpha_e = E_s / E_{cm}$.

Враховуючи вирази (2) – (5) та після деяких математичних перетворень формулу (1) для згинальних елементів можна записати у вигляді:

$$w_k = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \frac{\sigma_{s,cr}}{\sigma_s} \right] \left[3,4 \cdot c + 0,17 \frac{\phi}{\rho_s} \lambda \right], \quad (6)$$

$$\text{де} \quad \sigma_{s,cr} = k_t \cdot f_{ctm} \frac{\lambda}{\rho_s} \left[1 + \alpha_e \frac{\rho_s}{\lambda} \right]. \quad (7)$$

Вираз (6) може використовуватись для визначення ширини розкриття нормальних тріщин в напівциклі «1-а». При дії на балку знакозмінних навантажень нормальні перерізи постійно знаходяться в складному напружено-деформованому стані, що приводить до зниження опору бетону розтягу, і як наслідок, при зміні знаку навантаження (в напівциклах «б») вже на першому циклі збільшується ширина розкриття тріщин. Це необхідно враховувати, тому ширину розкриття нормальної тріщини в напівциклі «1-б» пропонується знаходити за виразом:

$$w_{k,1}^b = w_{k,1}^a \cdot \beta, \quad (8)$$

де $w_{k,1}^a$ – ширина нормальної тріщини в напівциклі «1-а», $\beta = 1,3$ – коефіцієнт, що враховує збільшення ширини розкриття похилої тріщини при зміні знаку навантаження.

Значення коефіцієнту β прийнято на основі статистичної обробки власних експериментальних даних та потребує подальший уточнень.

Ширину розкриття нормальних тріщин в напівциклах «а» знакозмінного навантаження з урахуванням можливого довантаження зразків, при умові, що кількість циклів $n \leq 10$, пропонується визначати за таким виразом:

$$w_{k,n}^a = w_{k,1}^a + \Delta w_k, \quad (9)$$

де $w_{k,1}^a$ - ширина похилої тріщини в напівциклі «1-а», визначена за (6);

Δw_k - приріст ширини розкриття тріщин внаслідок дії знакозмінного навантаження:

$$\Delta w_k = \frac{\sigma_{s,n}}{E_s} \cdot \phi \cdot \ln(n) \quad (10)$$

де $\sigma_{s,n}$ – напруження в поздовжній арматурі на даному циклі навантаження,
 n – кількість циклів знакозмінного навантаження.

У випадку збільшення рівня навантаження на n -му циклі приріст ширини розкриття нормальних тріщин визначаємо за виразом (10). Якщо ж після довантаження балки зазнають навантаження попереднього меншого рівня, то значення приросту Δw_k , що входить у формулу (9), необхідно визначати за виразом:

$$\Delta w_k = \frac{\sigma_{s,доав}}{E_s} \cdot \phi \cdot \ln(n_{доав}) - \frac{\sigma_{s,n}}{E_s} \cdot d \quad (11)$$

де $\sigma_{s,доав}$ – напруження в поздовжній арматурі під час довантаження на циклі $n_{доав}$, $\sigma_{s,n}$ – напруження в поздовжній арматурі на даному циклі навантаження.

Для визначення ширини розкриття нормальних тріщин в напівциклах «б» знакозмінного навантаження до виразу (11) необхідно ввести вже згаданий коефіцієнт β , що враховує збільшення ширини розкриття тріщин при зміні знаку навантаження:

$$w_{k,n}^b = w_{k,1}^b + \Delta w_k \quad (12)$$

Відзначимо, що формули (11) та (12) безпосередньо пов'язані з рівнем знакозмінного навантаження (через напруження в поздовжній арматурі σ_s) та кількістю циклів знакозмінного навантаження n . Але з огляду на розвиток тріщин у дослідних зразках необхідно зазначити наступне:

- за рівня навантаження $\eta=0,5$ та $0,65$ від руйнівного ширина розкриття 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 тріщин в напівциклах майже не збільшувалась.

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

Висновки. Як видно після статистичної обробки даних запропонована методика визначення ширини розкриття нормальних тріщин згинальних

залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень дає задовільну збіжність з експериментальними даними (середньо арифметичне відношення 1,15, коефіцієнт мінливості 23,8%).

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. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010. – К.: Укрархбудінформ, 2011. – 118 с.

1. Masyuk G.H. Zadachi ta metodika eksperimental'nih doslidzen' micnosti ta trishchinostijkosti pohilih pereriziv zginal'nih zalizobetonnih elementiv, shcho zaznayut' vplivu malociklovogo znakovminnogo navantazhennya./ G.H. Masyuk, O.I. Kornijchuk // Resursoekonomni materialy, konstrukcii budivli ta sporudi. Zbirnik naukovih prac'.-Rivne.-2006.-Vip. 14.-S. 246-252. 2. Betonni ta zalizobetonni konstrukcii z vazhkogo betonu. Pravila proektuvannya: DSTU B V.2.6-156:2010. – K.: Ukrarhbudinform, 2011. – 118 s.

Таблиця 1.

Експериментальні та теоретичні значення ширини розкриття нормальних тріщин в дослідних зразках на циклах малоциклового знакозмінного навантаження

№	Назва балки	Ширина тріщин, мм																	
		1а		1б		3а		3б		5а (довант.)		5б (довант.)		9а		9б			
		Екс.	Т./Екс.	Екс.	Т./Екс.	Екс.	Т./Екс.	Екс.	Т./Екс.	Екс.	Т./Екс.	Екс.	Т./Екс.	Екс.	Т./Екс.	Екс.	Т./Екс.		
1	БЗНЦВ-6/0.65	0,06	2,17	0,12	1,33	0,1	1,50	0,15	1,27	0,15	1,40	0,2	1,25	0,12	1,50	0,16	1,38		
		0,13		0,16		0,15		0,21		0,25		0,18		0,22					
2	БЗНЦВ-6/0.65	0,08	1,13	0,1	1,20	0,1	1,10	0,15	0,93	0,15	0,93	>1							
		0,09		0,12		0,11		0,14		0,17									
3	БЗНЦВ-4.5/0.65	0,09	1,11	0,13	1,00	0,12	1,00	0,13	1,15	0,16	0,94	0,24	0,79	0,14	0,93	0,18	0,94		
		0,1		0,13		0,12		0,15		0,19		0,19		0,13		0,17			
4	БЗНЦВ-4.5/0.5	0,06	1,33	0,1	1,00	0,08	1,13	0,12	1,00	0,16	0,94	0,18	1,06	0,1	1,30	0,16	1,06		
		0,08		0,1		0,09		0,12		0,19		0,19		0,13		0,17			
5	БЗНЦВ-4.5/0.65	0,1	1,10	0,18	0,78	0,14	0,93	0,2	0,85	0,16	0,94	>1							
		0,11		0,14		0,13		0,17		0,19		0,19							
6	БЗНЦВ-3/0.65	0,05	1,60	0,08	1,38	0,05	2,00	0,08	1,50	0,1	1,20	0,12	1,25	0,1	1,00	0,12	1,17		
		0,08		0,11		0,1		0,12		0,15		0,15		0,1		0,14			
7	БЗНЦВ-3/0.5	0,05	1,20	0,08	1,00	0,08	0,88	0,1	0,90	0,12	1,00	0,14	1,07	0,1	1,00	0,12	1,17		
		0,06		0,08		0,07		0,09		0,15		0,15		0,1		0,14			
Середньо арифметичне відношення																		1,15	
Середньо квадратичне відхилення																		0,27	
Коефіцієнт мінливості, %																		23,8	