

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.072.2.012.45-027.45

В. С. ДОРОФЄЄВ<sup>1</sup>, В. М. КАРПЮК<sup>2</sup>, К. І. АЛБУ<sup>3</sup>, Ю. А. СЬОМІНА<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (048) 729 86 20, ел. пошта dorvs@ukr.net

<sup>2</sup> Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (067) 486 56 74, ел. пошта v.karpiuk@ukr.net

<sup>3</sup> Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (67) 188 82 43, ел. пошта alby\_katj@mail.ru

<sup>4\*</sup> Кафедра «Залізобетонні та кам'яні конструкції», Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (093) 551 32 80, ел. пошта syomina3091@mail.ru

### МІЦНІСТЬ ТА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ ЗНАКОПОСТІЙНИХ І ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИСОКИХ РІВНІВ

**Мета.** Дослідити та проаналізувати поведінку приопорних ділянок прогінних залізобетонних балкових елементів за дії малоциклових знакопостійних і знакозмінних навантажень з урахуванням конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії задля подальшого використання отриманих результатів при вдосконаленні інженерної методики їх розрахунку. **Методика.** Для вивчення зазначеної проблеми виконано 3 серії експериментальних досліджень. Дослідні зразки – це залізобетонні балки прямокутного перерізу з розмірами 200×100 мм, довжиною 1975 мм, армовані двома плоскими зварними каркасами з симетрично розташованою поздовжньою нижньою та верхньою арматурою 2 Ø 14 A500C і поперечною 2 Ø 3, 4, 5 ВрІ з відносними прольотами зрізу  $a/h_0 = 1, 2, 3$ , виготовлені з важкого бетону класів  $C 16/20, C 30/35, C 40/50$  та випробувані короткочасним статичним, малоцикловим знакозмінним ( $\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$ ) та циклічним знакопостійним ( $\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$ ) навантаженнями. **Результати.** Введеному матеріалі розглядаються та аналізуються отримані та оброблені експериментальні дані, які розкривають вплив малоциклових знакопостійних та знакозмінних навантажень високих рівнів на основні показники тріщиностійкості та міцності похилих і нормальних перерізів приопорних ділянок прогінних залізобетонних конструкцій, урахуваючи зміну обраних при плануванні експерименту конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії. **Наукова новизна.** В статті приведені систематизовані дослідні дані, які відображають нові особливості роботи залізобетонних балкових елементів за дії навантажень вказаних видів. **Практична значимість.** Результати досліджень за обраною тематикою впроваджуються в практику проектування та розрахунків приопорних ділянок прогінних залізобетонних елементів, які зазнають дії малоциклових навантажень, а також можуть бути використані у навчальному процесі ВНЗ технічного профілю.

*Ключові слова:* малоциклове знакозмінне навантаження; циклічне знакопостійне навантаження; міцність; тріщиностійкість; математична модель; залізобетонна балка

#### Вступ

У зв'язку з тим, що малоциклові знакопостійні та знакозмінні навантаження виникають доволі часто та діють на елементи залізобетонних конструкцій специфічним чином – їхній вплив на механічні та деформативні параметри зразків потребує детального і ґрунтовного вивчення та аналізу. Адже процеси, які проходять в елементі за дії вказаного виду навантаження

зумовлені нелінійністю деформування, мікротріщиноутворенням, накопиченням залишкових деформацій, малоцикловою втомленістю, розшліщенням бетону та ін.

#### Постановка проблеми

Потрібно зауважити, що у національних вітчизняних і закордонних нормативних документах повною мірою особливості дії циклічних

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

знакопостійних, а особливо, знакозмінних навантажень не враховуються, не дивлячись на певні відмінності дії вказаних навантажень від дії короткочасних одноразових. Тому є доцільним проведення досліджень у цьому напрямку та поповнення банку експериментальних даних заради вдосконалення інженерних методик розрахунку приопорних ділянок залізобетонних балкових елементів при вказаних умовах.

**Аналіз останніх досліджень**

Достатньо багато вітчизняних та закордонних вчених проводили дослідження стосовно вказаного питання. Ще з 1961 року проблемою опору залізобетону дії циклічного навантаження займався Л. П. Макаренко та його учні: Є. М. Бабич, Н. М. Бітько, А. В. Гергель, В. В. Масліченко, Г. Х. Масюк, В. Н. Рубель, І. Д. Свиначенко, Г. А. Фенко та ін.

У питанні побудови діаграм деформування бетону за дії малоциклових навантажень значних успіхів досягли М. І. Карпенко [14], Т. М. Пецольд, В. В. Тур [23], Ю. Г. Болошенко [3] та ін.

Відомі роботи Є. М. Бабича [1], Г. Х. Масюка [21], Й. Й. Лучка [20], В. С. Дорофєєва [6, 7, 26], В. М. Карпюка [15-17], П. С. Гомона [5], О. О. Заречанського [10], М. С. Зінчука [11], С. Х. Карапетяна [13], О. І. Корнійчука [19], П. І. Герба [4], С. Я. Дробишинця [8], В. Є. Бабича [2], Я. І. Ковальчика [18], В. Ю. Каравана [12], О. Н. Кухнюка, Ю. М. Панчука, І. Т. Мирсаяпова [22] та ін. по вивченню працездатності складнонапружених залізобетонних конструкцій в умовах одноразових, повторних малоциклових та інших навантажень, звичайних, підсиленних, при підвищених температурах тощо.

Серед робіт іноземних науковців можна відмітити роботи Р. С. Fenwick, А. Fong, J. A. O. Barros, F. Aslani, R. Jowkarmeimandi [24], W. Трапко, Т. Трапко [25] та ін.

Не дивлячись на достатньо великий доробок вчених стосовно обраного питання, поки що не існує загальноприйнятого методу розрахунку залізобетонних конструкцій в умовах малоциклових навантажень.

**Мета**

Мета роботи – встановити вплив конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на показники міцності, тріщиностійкості та дефо-

рмативності залізобетонних балкових конструкцій за дії малоциклових знакопостійних і знакозмінних навантажень.

**Методика досліджень**

Для вирішення означеного питання згідно з прийнятою методологією [17] було заплановано та виконано 3 серії експериментальних випробувань на дію статичного короткочасного, малоциклового знакозмінного, та циклічного знакопостійного навантажень. В якості змінних факторів були обрані наступні: величина відносного прольоту зрізу  $a/h_0$ , яка змінювалась на трьох рівнях:  $a = h_0$ ,  $2h_0$  і  $3h_0$ ; клас важкого бетону трьох видів  $C 16/20$ ,  $C 30/35$ ,  $C 40/50$ ; кількість поперечного армування на приопорних ділянках  $\rho_{sw} = 0,0016$ ;  $0,0029$ ;  $0,0044$  ( $2\emptyset 3$ ,  $4$  і  $5$  ВрІ); рівень знакозмінного:  $\eta = \pm 0,50$ ;  $\pm 0,65$ ;  $\pm 0,80$  та знакопостійного:  $\eta = 0 \dots 0,50$ ;  $0 \dots 0,65$ ;  $0 \dots 0,85$  навантажень від фактичної міцності балок, тобто величини поперечного навантаження напередодні їх руйнування, при якому ширина розкриття похилих тріщин  $w_k$  перевищувала  $0,4$  мм, а стріла прогинів  $f \geq l/150$ .

Спочатку почергово випробовували за планом В<sub>4</sub> 25 дослідних балок першої серії на дію одноразового короткочасного ступенево зростаючого навантаження, практично, до руйнівного стану за вказаними вище ознаками. Надалі випробували аналогічні дослідні балки другої та третьої серій на дію, відповідно, знакозмінного та знакопостійного небагатоповторного поперечного навантаження згідно плану експерименту. Кількість циклів знакозмінного і знакопостійного навантажень складала не менше 10, якщо зразки не руйнувалися при меншому числі циклів.

**Результати**

В результаті обробки отриманих експериментальних даних, вилучення незначимих та перерахунку тих коефіцієнтів, що залишилися, за допомогою ефективної комп'ютерної програми COMPEX, розробленої проф. В. А. Вознесенським, отримали адекватні математичні моделі міцності, тобто руйнуючої поперечної сили  $V_u$ :

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$\hat{Y}(V_{u,1}) = 98 - 41X_1 + 12X_2 + 6X_3 + 16X_1^2 - 7X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{ кН}; \quad (1)$$

$$\hat{Y}(V_{u,1} / bh_0) = 5,60 - 2,34X_1 + 0,69X_2 + 0,34X_3 + 0,91X_1^2 - 0,40X_2^2 - 0,29X_3^2 - 0,40X_1X_2, \text{ МПа}; \quad (1, a)$$

$$\hat{Y}(V_{u,2}) = 80 - 33X_1 + 13X_2 + 6X_3 - 2X_4 + 21X_1^2 - 12X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{ кН}; \quad (2)$$

$$\hat{Y}(V_{u,2} / bh_0) = 4,57 - 1,89X_1 + 0,74X_2 + 0,34X_3 - 0,11X_4 + 1,20X_1^2 - 0,69X_2^2 - 0,29X_3^2 - 0,40X_1X_2, \text{ МПа}; \quad (2, a)$$

$$\hat{Y}(V_{u,3}) = 90 - 36X_1 + 10X_2 + 7X_3 - 3X_4 + 18X_1^2 - 6X_2^2 - 6X_3^2 - 2X_4^2 - 8X_1X_2 + 2X_1X_4, \text{ кН}; \quad (3)$$

$$\hat{Y}(V_{u,3} / bh_0) = 5,14 - 2,06X_1 + 0,57X_2 + 0,40X_3 - 0,17X_4 + 1,03X_1^2 - 0,34X_2^2 - 0,34X_3^2 - 0,11X_4^2 - 0,46X_1X_2 + 0,11X_1X_4, \text{ МПа}. \quad (3, a)$$

Геометрична інтерпретація приведеної несучої здатності приопорних ділянок дослідних зразків-балок частково може бути представлена на рис. 1.

Серед конструктивних чинників найбільший вплив на несучу здатність приопорних ділянок дослідних елементів має прольот зрізу (див. рис. 1, а). В цілому, підтверджується виявлена О. С. Залесовим, Ю. А. Климовим [9] та іншими дослідниками [4-8, 10-13, 14-22] закономірність нелінійного (затухаючого) зменшення міцності похилих перерізів балок зі збільшенням прольоту зрізу.

З підвищенням класу бетону від C16/20 до C40/50 відбувається нелінійне затухаюче (непропорційне) збільшення міцності вказаних ділянок у всіх серіях (див. рис. 1, б).

Аналогічна картина спостерігається з підвищенням коефіцієнту поперечного армування  $\rho_{sw}$  від 0,0016 до 0,0044 (див. рис. 1, в).

Фактори зовнішнього впливу, насамперед, характер циклічного навантаження, має суттєвий вплив на вихідний параметр, що розглядається. Так, якщо при знакопостійному малоци-

кловому навантаженні середнє значення міцності приопорних ділянок дослідних зразків зменшується на 8,2 % порівняно з несучою здатністю балок першої серії, випробуваних без повторного навантаження, то при знакозмінному циклічному навантаженні – на 18,4 %. Така тенденція зберігається у всіх діапазонах зміни дослідних факторів (див. рис. 1, а, б, в, г). При цьому, величина рівнів знакозмінного та знакопостійного навантаження ( $\eta = \pm 0,50 \dots \pm 0,80$ ;  $0 \dots 0,80$ ) мало впливає на кінцевий результат (див. рис. 1, г).

Під час випробувань дослідних зразків-балок на дію короткочасного одноразового та малоциклового навантаження слідкували за утворенням, розвитком та шириною розкриття тріщин на їхній поверхні.

Максимальна ширина розкриття нормальних тріщин на рівні розтягнутої арматури в зоні чистого згину при заданих планом рівнях навантаження майже не залежить від його виду і може бути охарактеризована наступною математичною моделлю (4) геометрична інтерпретація якої може бути представлена на рис. 2.

$$\hat{Y}(w_{cr,1,2,3}^{\perp, \eta Fu}) = 0,14 + 0,02X_1 + 0,03X_2 + 0,01X_3 + 0,05X_4 + 0,01X_1^2 - 0,03X_2^2 + 0,02X_4^2 + 0,01X_1X_3 + 0,01X_1X_4 + 0,02X_2X_4 + 0,01X_3X_4, \text{ мм}. \quad (4)$$

Аналіз математичної моделі (4) показує, що максимальна ширина розкриття нормальних тріщин в зоні чистого згину в зазначених серіях збільшується порівняно з середнім значенням 0,14 мм при середніх значеннях дослідних факторів:

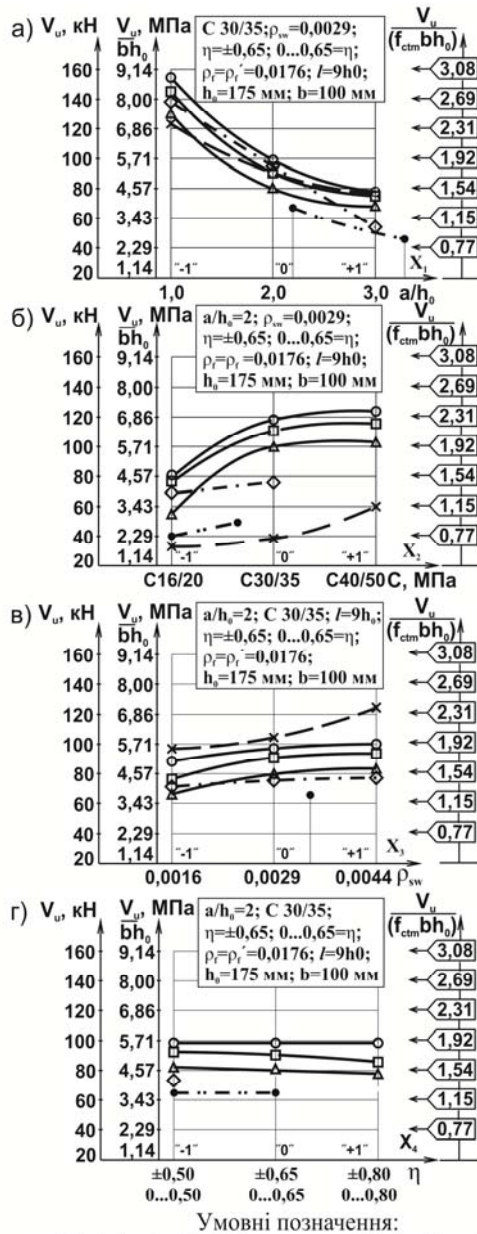
- зі збільшенням величини відносного прольоту зрізу  $a/h_0$  від 1 до 3 на 29 %;
- зі збільшенням класу бетону від C 16/20 до C 40/50 (власне, до C 30/35) на 43 %;
- зі збільшенням кількості поперечного армування  $\rho_{sw}$  від 0,0016 до 0,0044 на 14 %;

- з підвищенням рівня навантаження  $\eta$  від 0,5 до 0,8  $F_u$  на 71 %;

- одночасним збільшенням:

- величини відносного прольоту зрізу і кількості поперечного армування в зазначених межах на 7 %;
- величини відносного прольоту зрізу і рівня навантаження на 7 %;
- класу бетону внаслідок збільшення несучої здатності і рівня навантаження на 14 %;
- кількості поперечного армування за тією ж причиною і рівня навантаження на 7 %.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА



- Умовні позначення:
- - дані К. І. Албу, Д. С. Даниленка, Ю. А. Сьоміної при короточасному статичному навантаженні (1 серія);
  - ▲ - дані К. І. Албу при знакозмінному малоцикловому навантаженні (2 серія);
  - - дані Ю. А. Сьоміної при знакопостійному небагато повторному навантаженні (3 серія);
  - × - дані О. С. Залесо́ва та Ю. А. Климова;
  - ◇ - дані Н. М. Ярошевич;
  - - дані А. І. Корнійчука.

Рис. 1. Вплив конструктивних чинників (прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на міцність приопорних ділянок випробуваних балок

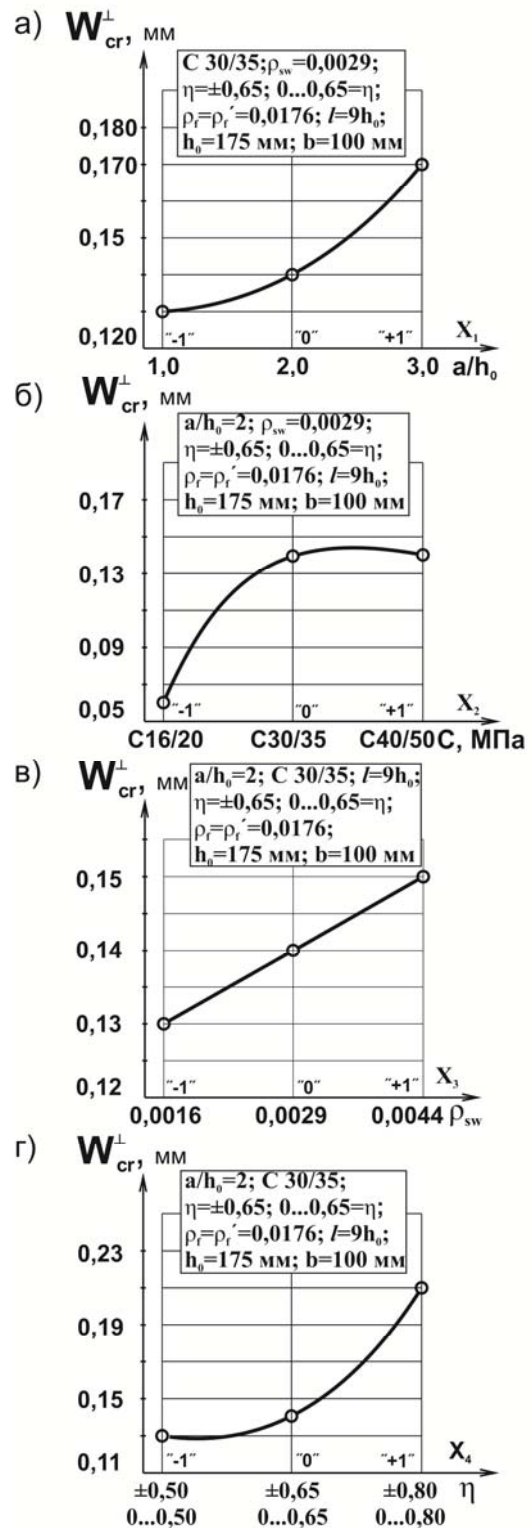


Рис. 2. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), міцності бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на максимальну ширину розкриття нормальних тріщин в зоні чистого згину при заданих планом рівнях навантаження

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Максимальна ширина розкриття похилих тріщин посередині висоти припорних ділянок при заданих планом рівнях навантаження у серіях, що розглядаються, може бути охарактери-

зована трьома подібними за структурою математичними моделями (5)-(7) геометрична інтерпретація яких відображена на рис. 3.

$$\widehat{Y}(w_{cr,1}^{\prime, \eta Fu}) = 0,35 - 0,06X_1 - 0,03X_2 - 0,01X_3 - 0,14X_4 - 0,01X_1X_3 - 0,03X_2X_4 - 0,02X_3X_4, \text{ мм}; \quad (5)$$

$$\widehat{Y}(w_{cr,2}^{\prime, \eta Fu}) = 0,63 + 0,05X_1 + 0,05X_2 - 0,06X_3 + 0,24X_4 - 0,02X_2^2 + 0,02X_3^2 + 0,02X_4^2 + 0,11X_1X_2 - 0,03X_1X_3 - 0,06X_3X_4, \text{ мм}; \quad (6)$$

$$\widehat{Y}(w_{cr,2}^{\prime, \eta Fu}) = 0,40 - 0,05X_1 - 0,03X_2 + 0,16X_4 - 0,03X_1X_3, \text{ мм}. \quad (7)$$

Для можливості порівняння отриманих експериментальних даних з результатами досліджень інших авторів доцільно представити максимальні довжини проєкцій та кути нахилу

небезпечних похилих тріщин до поздовжньої осі дослідних елементів у вигляді приведених до робочої висоти перерізу лінійних моделей по серіях:

$$\widehat{Y}(\max l'_{cr,1} / h_0) = 1,15 + 0,30X_1 - 0,11X_3 - 0,02X_1X_2 - 0,13X_1X_3; \quad (8)$$

$$\widehat{Y}(\max l'_{cr,2} / h_0) = 0,99 + 0,23X_1 - 0,09X_3 + 0,11X_4 + 0,09X_1X_2 - 0,04X_1X_3; \quad (9)$$

$$\widehat{Y}(\max l'_{cr,3} / h_0) = 0,89 + 0,07X_1 + 0,19X_4 + 0,16X_1X_4, \quad (10)$$

графічне відображення яких представлено на рис. 4.

Аналіз представлених моделей показує, що середні значення небезпечної похилої тріщини при малоцикловому знакозмінному навантаженні зменшуються на 14 %, а при знакопостійному – на 23 %.

Небезпечні похилі тріщини збільшуються по відношенню до своїх середніх значень у 1, 2 і 3 серіях:

- зі збільшенням відносного прольоту зрізу  $a / h_0$  від 1 до 3 на 52, 46 і 16 %, відповідно, у 1, 2 і 3 серіях;

- зі збільшенням кількості поперечного армування  $\rho_{sw}$  від 0,0016 до 0,0044 на 19 і 18 % у 1 і 2 серіях;

- зі збільшенням рівня малоциклового знакозмінного і знакопостійного навантаження від 0,5 до 0,8, відповідно, на 22 і 43 %;

- при одночасному збільшенні прольоту зрізу і класу бетону у 2 серії на 9 %;

- при одночасному збільшенні прольоту зрізу і зменшенні кількості поперечної арматури у 1 серії на 11 %, а у 2 серії – на 4 %;

- при одночасному збільшенні прольоту зрізу і рівнів знакозмінного на 8 % і знакопостійного на 18 % навантаження;

- при одночасному зменшенні кількості поперечної арматури і збільшенні рівня знакозмінного навантаження на 6 %.

Обробка експериментальних значень кутів нахилу небезпечної похилої тріщини до поздовжньої осі елемента у дослідних серіях дозволила отримати наступні математичні моделі:

$$\widehat{Y}(\alpha_{cr,1}^{\circ}) = 41,2 - 6,8X_1 + 1,6X_2 + 2X_3, \text{ град.}; \quad (11)$$

$$\widehat{Y}(\alpha_{cr,2}^{\circ}) = 43,0 - 5,3X_1 - 2,9X_4, \text{ град.}; \quad (12)$$

$$\widehat{Y}(\alpha_{cr,3}^{\circ}) = 46,5 - 2,1X_1 - 5,2X_4, \text{ град.}, \quad (13)$$

геометрична інтерпретація яких наведена на рис. 5.

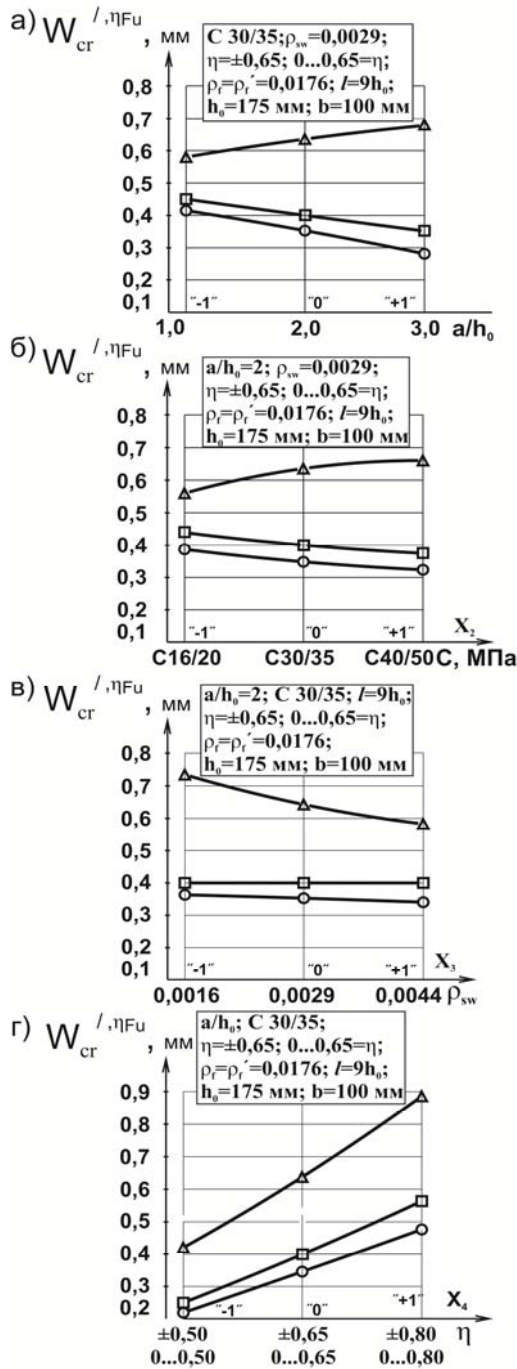
Аналіз досить простих лінійних моделей (11)...(13) показує, що кути нахилу небезпечних похилих тріщин зменшуються по відношенню до своїх середніх значень 41,2°; 43,0°; 46,5°, відповідно, у 1, 2 і 3 серіях дослідів:

- при збільшенні відносного прольоту зрізу  $a / h_0$  від 1 до 3 на 33, 25 і 9 %;

- при збільшенні рівнів малоциклового знакозмінного і знакопостійного навантажень від 0,5 до 0,8, відповідно, на 13 і 22 %;

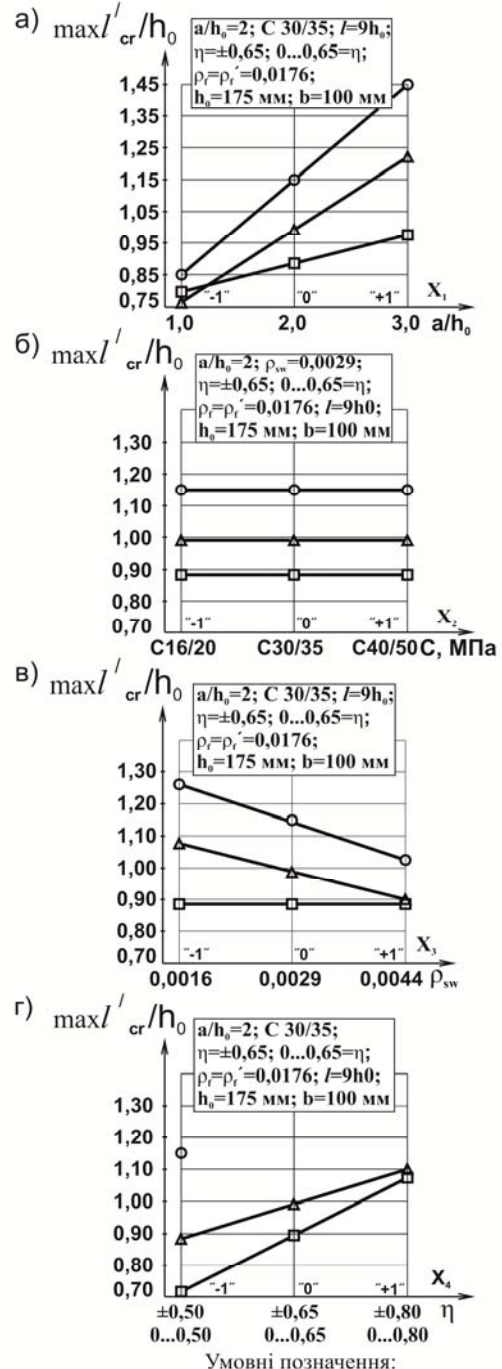
- при зменшенні класу бетону від C 40/50 до C 16/20 на 8 % і кількості поперечної арматури  $\rho_{sw}$  від 0,0044 до 0,0016 на 10 % у серії дослідів при однократному статичному ступенево зростаючому навантаженні.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА



Умовні позначення:  
 ○ — дані К. І. Албу, Д. С. Даниленка, Ю. А. Сьоміної при одноразовому статичному навантаженні (1 серія);  
 ▲ — дані К. І. Албу при знакозмінному малоцикловому навантаженні (2 серія);  
 □ — дані Ю. А. Сьоміної при знакопостійному небагато повторному навантаженні (3 серія);

Рис. 3. Залежність максимальної ширини розкриття похилих тріщин на припорних ділянках при заданих планових рівнях навантаження від відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г)



Умовні позначення:  
 ○ — дані К. І. Албу, Д. С. Даниленка, Ю. А. Сьоміної при одноразовому статичному навантаженні (1 серія);  
 ▲ — дані К. І. Албу при знакозмінному малоцикловому навантаженні (2 серія);  
 □ — дані Ю. А. Сьоміної при знакопостійному небагато повторному навантаженні (3 серія).

Рис. 4. Залежність максимальної довжини проєкції небезпечної похилої тріщини на поздовжню вісь балки перед руйнуванням від величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г)



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Відносні відстані між нормальними тріщинами в зоні чистого згину в проведених дослідженнях охарактеризовані моделями:

$$\hat{Y}(l_{cr,1}^{\perp} / h_0) = 0,39 - 0,03X_1 + 0,01X_2 + 0,02X_1X_3; \quad (14)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,2}^{\perp} / h_0) = 0,41 - 0,014X_1 + 0,011X_2 - 0,01X_3; \quad (15)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,3}^{\perp} / h_0) = 0,38 - 0,02X_1 + 0,01X_2 - 0,01X_3 - 0,03X_4 - 0,01X_1X_2, \quad (16)$$

графічне зображення яких показане на рис. 6.

Як видно з моделей (14)...(16), приведені до  $h_0$  середні відстані між вказаними тріщинами є досить близькими по серіях і коливаються у межах 0,38...0,41. Окрім того, характер впливу

дослідних факторів по серіях, як видно з рисунку (див. рис. 6, а, б, в), є однотипним.

Аналогічні математичні моделі відносних віддалей між похилими тріщинами на приопорних ділянках елементів мають вигляд:

$$\hat{Y}(l_{cr,1}^{\prime} / h_0) = 0,55 + 0,15X_1 + 0,01X_2 - 0,02X_3; \quad (17)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,2}^{\prime} / h_0) = 0,56 + 0,13X_1 - 0,03X_3 + 0,04X_1X_2 - 0,02X_1X_3 - 0,03X_2X_3; \quad (18)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,3}^{\prime} / h_0) = 0,38 + 0,07X_1 + 0,01X_2 - 0,01X_3 - 0,02X_1X_3, \quad (19)$$

графічна інтерпретація яких наведена на рис. 7.

Характерним для означених моделей є те, що рівень як одноразового статичного (1 серія), так і малоциклових повторних навантажень (2 і 3 серія) виявився малозначимим при визначенні цього параметру. При цьому, якщо середні віддалі між похилими тріщинами у 1 і 2 серіях є, практично, однакові (0,55 і 0,56), то при малоцикловому знакопостійному навантаженні у 3 серії цей параметр зменшується на 32 % у зв'язку з більшою концентрацією силового потоку стискаючих і розтягуючих напружень.

хунку їх несучої здатності, вдосконалення чинних нормативних документів.

### Висновки

В ході аналізу викладеного матеріалу можна відмітити наступні положення.

1. Стосовно несучої здатності зразків встановлено, що при знакопостійному малоцикловому навантаженні середнє значення міцності приопорних ділянок дослідних зразків зменшується на 8,2 % порівняно з несучою здатністю балок першої серії, випробуваних без повторного навантаження, а при знаковмінному циклічному навантаженні – на 18,4 %.

2. Практичне значення математичних моделей (8)...(10) полягає у більш-менш точному визначенні довжини проєкції небезпечної похилої тріщини, яка перетинається зі стержнями поперечної арматури і яка приймає безпосередню участь у сприйнятті поперечної сили, що знайде своє відображення в уточненій авторами інженерній методиці розрахунку міцності приопорних ділянок дослідних елементів.

3. Представлені в моделях (11)...(13) дані про кути нахилу небезпечних похилих тріщин мають практичне значення при вдосконаленні інженерних методів розрахунку міцності похилих перерізів прогінних залізобетонних конструкцій, зокрема тих, що базуються на фермовій аналогії.

4. Представлені моделі (14)...(16) разом з виразом (4) можна використати для уточнення деформацій розтягнутої арматури і бетону, а також коефіцієнта  $\psi_s$ , який ураховує сумісну роботу розтягнутої арматури і бетону.

### Наукова новизна та практична значимість

Проведені експериментальні дослідження та аналіз їхніх результатів дозволили розкрити нові особливості характеру деформування, тріщиноутворення та руйнування дослідних зразків-балок, що зазнають дії циклічних знаковмінних та знакопостійних навантажень, виявити механізм та нові схеми руйнування цих елементів, а також встановити їх залежність від відповідного співвідношення дослідних факторів.

Результатом досліджень у вказаному напрямку стане вдосконалений авторами загальний інженерний метод розрахунку міцності похилих і нормальних перерізів залізобетонних конструкцій при малоцикловому знаковмінному і знакопостійному навантаженні високих рівнів, який базуватиметься на виборі найбільш імовірних схем руйнування у залежності від реального співвідношення дослідних факторів, а також розвиток деформаційної моделі розра-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

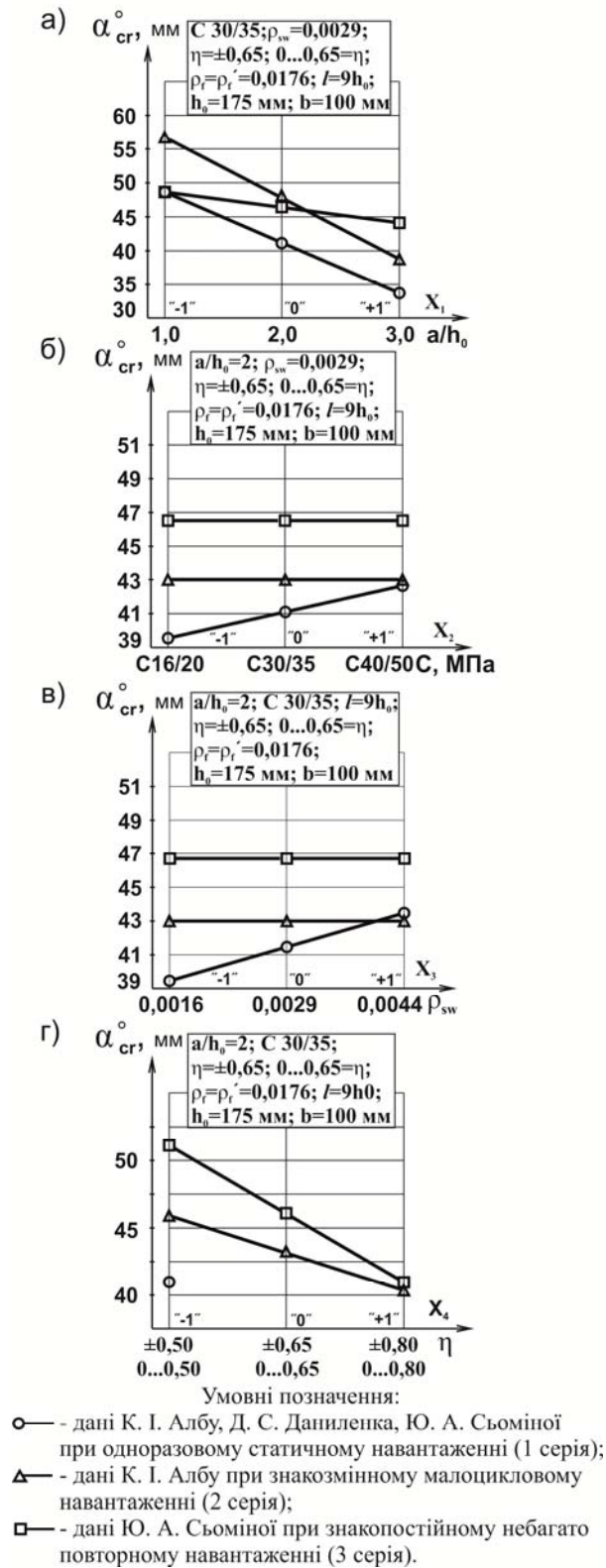


Рис. 5. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на кут нахилу небезпечної похилої тріщини до поздовжньої осі елемента

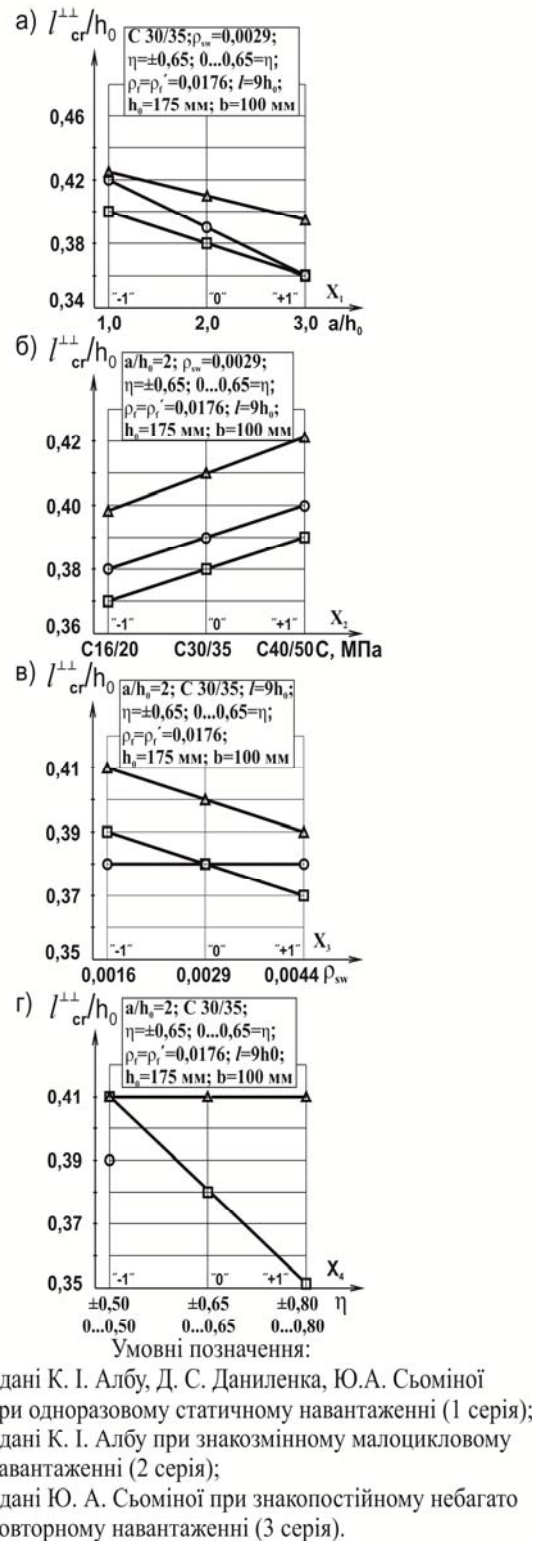
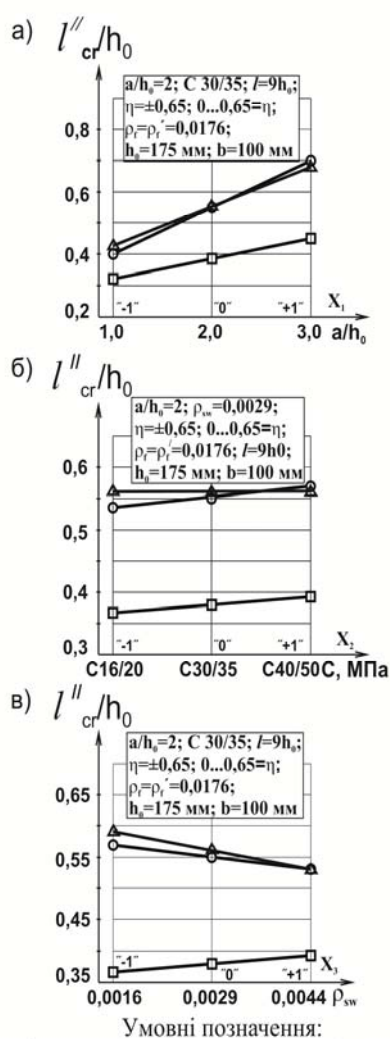


Рис. 6. Залежність відносної відстані між нормальними тріщинами в зоні чистого згину від величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г)



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА



- - дані К. І. Албу, Д. С. Даниленка, Ю. А. Сьоміної при одноразовому статичному навантаженні (1 серія);
- ▲ - дані К. І. Албу при знакозмінному малоцикловому навантаженні (2 серія);
- - дані Ю. А. Сьоміної при знакопостійному небагато повторному навантаженні (3 серія).

Рис. 7. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в) на величину відносної віддалі між похилими тріщинами на приопрних ділянках дослідних зразків

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабич, Є. М. Робота і розрахунок несучої здатності згинальних залізобетонних елементів таврового профілю при дії повторних навантажень [Текст] / Є. М. Бабич, П. С. Гомон, С. В. Філіпчук. – Рівне : НУВГП, – 2012. – 108 с.
2. Бабич, В. Є. Особливості роботи нерозрізних залізобетонних балок при повторних навантаженнях [Текст] / В. Є. Бабич // Будівельні конструкції : зб. наук. праць. – Київ : НДІБК, 2003. – Вип. 58. – С. 8-13.

3. Болошенко, Ю. Г. Расчёт прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, на основе трансформированных диаграмм деформирования бетона [Текст] / Ю. Г. Болошенко // Науково-технічне та організаційно-економічне сприяння реформам у будівництві та житлово-комунальному господарстві : збірник III Міжнародної конференції. – Макіївка : ДонНАСА, 2012. – Ч. 1. – С. 16-18.
4. Герб, П. І. Вплив повторних навантажень на міцність, деформативність та тріщиностійкість підсиленних у розтягнутій зоні залізобетонних балок із бетонів на відходах збагачення залізних руд [Текст] / П. І. Герб, О. І. Валоной // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. пр. – Кривий Ріг : КТУ, 2010. – Вип. 25. – С. 87-92.
5. Гомон, П. С. Робота згинальних залізобетонних елементів таврового перерізу за дії повторного навантаження [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Гомон Петро Святославович ; НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – 20 с.
6. Дорофеев, В. С. Прочность, трещиностойкость и деформативность предварительно напряжённых тавровых железобетонных элементов [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Ф. Р. Карпюк. – Одесса : Эвен, 2010. – 223 с. : ил. – ISBN 978-966-8169-43-4.
7. Дорофеев, В. С. Прочность, деформативность и трещиностойкость приопрных участков внецентренно растянутых и сжатых железобетонных балок [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Н. Н. Петров. – Одесса : Эвен, 2011. – 183 с. : граф. – ISBN 978-966-8169-49-9.
8. Дробишинець, С. Я. Робота сталевібробетонних та сталевіброзалізобетонних балок при одноразовому та повторних малоциклових навантаженнях [Текст] / С. Я. Дробишинець, Є. М. Бабич // Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація : зб. наук. праць – Кривий Ріг : КТУ, 2004. – Вип. 6. – С. 65-71.
9. Залесов, А. С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил [Текст] / А. С. Залесов, Ю. А. Климов. – Киев : Будівельник, 1989. – 104 с.
10. Заречанський, О. О. Особливості роботи стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів при одноразових і повторних малоциклових навантаженнях [Текст] : атореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Заречанський Олег Олегович ; НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – 20 с.
11. Зінчук, М. С. Міцність та деформативність залізобетонних згинальних елементів за малоциклових навантажень в умовах підвищених тем-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- ператур [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Зінчук Микола Степанович ; НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – 18 с.
12. Караван, В. В. Результати експериментальних досліджень тріщиностійкості і деформативності згинальних залізобетонних елементів під дією малоциклових знакозмінних навантажень [Текст] / В. В. Караван // Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація : зб. наук. праць – Кривий Ріг : КТУ, 2002. – Вип. 5. – С. 168-172.
  13. Карапетян, С. Х. Міцність і стійкість позацентрово стиснутих залізобетонних стержнів в умовах небагаторазово повторних навантажень [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Карапетян Смбат Хачатурович ; ДП НДІБК. – Київ, 2009. – 20 с.
  14. Карпенко, Н. И. Методика расчёта параметров деформирования бетона при разгрузке с напряжений сжатия [Текст] / Н. И. Карпенко, В. А. Ерышев, Е. В. Латышева // Вестник МГСУ. – Москва, 2014. – Вып. №3. – С. 168-178.
  15. Карпюк, В. М. Розрахункові моделі прогінних залізобетонних конструкцій при складному напружено-деформованому стані приопорних ділянок [Текст] : дис. д-ра техн. наук : 05.23.01 / Карпюк Василь Михайлович ; Одеська держ. ак. буд-ва та арх.-ри. – Одеса, 2012. – 365 с. – Бібліогр. : С. 284-326.
  16. Карпюк, В. М. Розрахункові моделі силового опору прогінних залізобетонних конструкцій у загальному випадку напруженого стану (монографія) [Текст] / В. М. Карпюк – Одеса: ОДАБА, 2014. – 352 с. зіл. – ISBN № 978-617-7195-08-4.
  17. Карпюк, В. М. Методика експериментальних досліджень напружено-деформованого стану приопорних частин залізобетонних балок при малоцикловому навантаженні [Текст] / В. М. Карпюк, Е. И. Албу, Ю. А. Сєміна, А. К. Кицак // (28.11.2013) Сб. мат-в V Республ. научно-техн. конф. – Бендери : Бендерский ПФ ГОУ «ПГУ им. Т. Г. Шевченка». – С. 3-10.
  18. Ковальчик, І. Я. Дослідження тріщиностійкості попередньо напружених залізобетонних балок при дії малоциклових навантажень [Текст] / І. Я. Ковальчик, П. М. Коваль // Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей : наук. нотатки. – Луцьк, 2014. – № 45. – С. 282-287.
  19. Корнійчук, О. І. Міцність та тріщиностійкість похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Корнійчук Олександр Іванович ; Полт. НТУ імені Юрія Кондратюка. – Полтава, 2009. – 21 с.
  20. Лучко, Й. Й. Температурні поля та напружений стан залізобетонних балкових конструкцій мостів [Текст] / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса, 2013. Вип. № 49. – С. 221-236.
  21. Масюк, Г. Х. Напружено-деформований стан похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів, що зазнають дії малоциклових знакозмінних навантажень [Текст] / Г. Х. Масюк, О. І. Корнійчук // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2008. – Вип. 17. – С. 204-211.
  22. Мирсаяпов, И. Т. Выносливость железобетонных конструкций при действии поперечных сил [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Мирсаяпов Илшлат Талгатович ; – Казань : КГАСУ, 2009. – 38 с.
  23. Пецольд, Т. М. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчёта и конструирования [Текст] / Т. М. Пецольд, В. В. Тур – Брест : БГТУ, 2003. – 379 с.
  24. Aslani F. Stress-strain model for concrete under cyclic loading / F. Aslani, R. Jowkarmeimandi // Magazine of Concrete Research. – Wollongong, Australia, 2012. – Vol. 64, Issue 8. – Pp. 673-685.
  25. Trapko W. The bearing capacity of reinforced concrete elements under repeated compressive load, reinforced with carbon strips / W. Trapko, T. Trapko // Civil engineering and management: scientific magazine. – Wrocław, Poland, 2012. – Vol. 4. – Pp. – 590-597.
  26. Dorofeev V. Their capacity steel cross-section eccentrically shrink or stretch beams / V. Dorofeev, V. Karpyuk, N. Petrov // Materials of 18 Conference «Theoretical Foundations of Civil Engineering», Polish – Ukrainian – Lithuanian Transactions – Warsaw, September, 2010. – P. 345-352.

В. С. ДОРОФЕЕВ<sup>1</sup>, В. М. КАРПЮК<sup>2</sup>, Е. И. АЛБУ<sup>3</sup>, Ю. А. СЄМИНА<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (048) 729 86 20, эл. почта dorvs@ukr.net

<sup>2</sup> Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (067) 486 56 74, эл. почта v.karpiuk@ukr.net

<sup>3</sup> Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (67) 188 82 43, эл. почта albu\_katj@mail.ru

<sup>4\*</sup> Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (093) 551 32 80, эл. почта syomina3091@mail.ru

## ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАЛОЦИКЛОВЫХ ЗНАКОПОСТОЯННЫХ И ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЖЕНИЙ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ

**Цель.** Исследовать и проанализировать поведение приопорных участков железобетонных балочных элементов при воздействии малоцикловых знакопостоянных и знакопеременных нагрузжений с учётом конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия для дальнейшего использования полученных результатов при усовершенствовании инженерной методики их расчёта. **Методика.** Для изучения данной проблемы выполнено 3 серии экспериментальных исследований. Опытные образцы – это железобетонные балки прямоугольного сечения с размерами 200×100 мм, длиной 1975 мм, армированные двумя плоскими сварными каркасами с симметрично расположенной нижней и верхней арматурой 2Ø14A500С и поперечной 2Ø3, 4, 5ВрІ с относительными пролётами среза  $a/h_0 = 1, 2, 3$ , изготовленные из тяжелого бетона классов С 16/20, С 30/35, С 40/50 и испытанные кратковременным статическим, малоцикловым знакопеременным ( $\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$ ) и циклическим знакопостоянным ( $\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$ ) нагружениями.

**Результаты.** В приведенном материале рассматриваются и анализируются полученные и обработанные экспериментальные данные, которые раскрывают влияние малоцикловых знакопостоянных и знакопеременных нагрузок высоких уровней на основные показатели трещиностойкости и прочности наклонных и нормальных сечений приопорных участков пролетных железобетонных конструкций, учитывая изменение принятых при планировании эксперимента конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия.

**Научная новизна.** В статье приведены систематизированные опытные данные, которые отражают новые особенности работы железобетонных балочных элементов при воздействии нагрузок указанных видов.

**Практическая значимость.** Результаты исследований по выбранной теме внедряются в практику проектирования и расчётов приопорных участков пролетных железобетонных элементов, которые подвергаются воздействию малоцикловых нагрузжений, а также могут быть использованы в учебном процессе ВУЗов технического профиля.

**Ключевые слова:** малоцикловая знакопеременная нагрузка; циклическое знакопостоянное нагружение; прочность; трещиностойкость; математическая модель; железобетонная балка

V. S. DOROFEEV<sup>1</sup>, V. M. KARPIUK<sup>2</sup>, E. I. ALBU<sup>3</sup>, YU. A. SOMINA<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Odessa State Academy of Building and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (048) 729 86 20, e-mail dorvs@ukr.net

<sup>2</sup> Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Odessa State Academy of Building and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (067) 486 56 74, e-mail v.karpiuk@ukr.net

<sup>3</sup> Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Odessa State Academy of Building and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (67) 188 82 43, e-mail alby\_katj@mail.ru

<sup>4\*</sup> Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Odessa State Academy of Building and Architecture, 4 Didrihson st., Odessa, Ukraine, 65029, tel. +38 (093) 551 32 80, e-mail syomina3091@mail.ru

## STRENGTH AND CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAM STRUCTURES UNDER THE ACTION OF LOW-CYCLE LOADS OF CONSTANT SIGN AND CYCLIC ALTERNATING LOADINGS OF HIGH LEVELS

**Purpose.** To investigate and to analyze the behavior of the areas near supports of reinforced concrete beam elements under the action of low-cycle loads of constant sign and repeated alternating loadings taking into account the influence of constructive factors and factors of external action for the future using of obtained results for improvement of calculated engineering technique. **Methodology.** Three series of experiments were performed to research this problem. Test specimens are reinforced concrete beams of rectangular cross section with sizes 200×100 mm,

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

with length 1975 mm, that were reinforced with two flat welded framework with symmetrically located top and bottom longitudinal reinforcement 2Ø14A500C and transverse reinforcement 2Ø3, 4, 5BpI with relative shear span  $a/h_0 = 1, 2, 3$ , that were made from concrete C 16/20, C 30/35, C 40/50, and that were tested by monotonic load, low-cycle alternating loading ( $\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$ ) and repeated load of constant sign ( $\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$ ). **Findings.** This material considers and analyses obtained and processed experimental data, that discover the influence of low-cycle loads of constant sign and repeated alternating loadings of high levels on the main proofs of crack resistance and strength of inclined and vertical sections of areas near supports of reinforced concrete structures tacking into account the change of selected by planning of an experiment constructive factors and factors of external action. **Originality.** In this paper the systematized experimental data are given, that reflect new features of reinforced concrete beam elements work under the action of mentioned loads. **Practical value.** The research results are being introduced to the practice of design and calculations of areas near supports of reinforced concrete elements that are subjected to the action of low-cycle loads, and also the results can be used in educational process of technical academies.

*Keywords:* low-cycle alternating load; repeated loading of constant sign; strength; crack resistance; mathematical model; reinforced concrete beam

## REFERENCES

1. Babych Ye. M., Gomon P.S., Filipchuk S.V. *Robota i rozrakhunok nesuchoi zdatnosti zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv tavrovoho profilu pry dii povtornykh navantazhen* [Work and calculation of the bearing capacity of bending T-sections reinforced concrete elements under the influence of repeated loads]. Rivne, NUWMNR, 2012. 108 p.
2. Babych V. Ye. Osoblyvosti roboty nerozriznykh zalizobetonnykh balok pry povtornykh navantazhenniakh [Features of the work of continuous reinforced concrete beams under repeated loads]. *Zbirnyk naukovykh prats "Budivelni konstruktsii"* [Collection of scientific works "Building structures"], 2003, issue 58, pp. 8-13.
3. Boloshenko Ju. G. Raschjot prochnosti normal'nyh sechenij izgibaemyh zhelezobetonnykh jelementov, usilennyh narashhivaniem szhatoj zony, na osnove transformirovannykh diagramm deformirovanija betona [Strength calculation of vertical sections of bending reinforced concrete elements reinforced by increasing of compression area on the base of transformed diagrams of concrete deformation]. *Zbirnyk III Mizhnarodnoi konferentsii "Naukovo-tekhniczne ta orhanizatsiino-ekonomichne spryannia reformam u budivnytstvi ta zhytlovo-komunalnomu hospodarstvi"* [Collection of the III International Conf. "Scientific and technical, organizational and economic assistance to the reforms in building and utilities]. Makiivka, DonNASA Publ., 2012, Part 1, pp. 16-18.
4. Herb P. I. Vplyv povtornykh navantazhen na mitsnist, deformatyvnist ta trishchynostiikist pidsylenykh u roztrahnutii zoni zalizobetonnykh balok iz betoniv na vidkhodakh zbahachennia zaliznykh rud [The influence of repeated loads on the strength, deformability and crack resistance of reinforced concrete beams reinforced in tensile area from concretes with wastes of iron ores enrichment]. *Visnyk Kryvorizkoho tekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Technical University of Krivoy Rog], 2010, issue 25, pp. 87-92.
5. Homon P. S. *Robota zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv tavrovoho pererizu za dii povtornoho navantazhennia*. Avtoreferat Diss. [Work of flexible T-section reinforced concrete elements under the influence of repeated loading. Author's abstract.]. Lviv, 2013. 20 p.
6. Dorofeev V. S., Karpiuk V. M., Karpiuk F. R. *Prochnost, treshhinostojkost i deformativnost predvaritelno naprjazhjonnykh tavrovyyh zhelezobetonnykh elementov* [The strength, crack resistance and deformability of prestressed T-sections reinforced concrete elements]. Odessa, Jeven Publ., 2010. 223 p.
7. Dorofeev V. S., Karpiuk V. M., Petrov N. N. *Prochnost, deformativnost i treshhinostojkost priopornykh uchastkov vncentrenno rastjanutyh i szhatykh zhelezobetonnykh balok* [The strength, deformability and crack resistance of an areas near supports of eccentrically tensioned and eccentrically compressed reinforced concrete beams]. Odessa, Jeven Publ., 2011. 183 p.
8. Drobysnyets S. Ya., Babych Ye. M. *Robota stalefibrobetonnykh ta stalefibrozalizobetonnykh balok pry odnorazovomu ta povtornykh malotsyk-lovykh navantazhenniakh* [The work of steel fiber concrete and steel fiber reinforced concrete beams under monotonic loadings and repeated low-cycle loads]. *Zb. nauk. pr. "Stalezalizobetonni konstruktsii: doslidzhennia, proektuvannia, budivnytstvo, ekspluatatsiia"* [Proc. "Steel reinforced concrete structures: research, design, building, exploitation], 2004, issue 6, pp. 65-71.
9. Zalesov A. S., Klimov Yu. A. *Prochnost zhelezobetonnykh konstrukcij pri dejstvii poperechnih sil* [The strength of reinforced concrete structures under the action of shear forces]. Kiev, Budivelnik Publ., 1989. 104 p.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

10. Zarechanskyi O. O. *Osoblyvosti roboty stysnuto-zihnutykh zalizobetonnykh elementiv pry odnorazovykh i povtornykh malotsyklovykh navantazhenniakh*. Atoreferat Diss. [Features of compressed-bent reinforced concrete elements under single and repeated low-cycle loads. Author's abstract.]. Liviv, 2008. 20 p.
11. Zinchuk M. S. Mitsnist ta deformatyvniest zalizobetonnykh zghynalnykh elementiv za malotsyklovykh navantazhen v umovakh pidvyshchennykh temperature. Atoreferat Diss. [The strength and deformability of reinforced concrete bent elements under low-cycle loads at elevated temperatures. Author's abstract.]. Liviv, 2008. 18 p.
12. Karavan V. V. Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen trishchynostiikosti i deformatyvnosti zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv pid diieiu malotsyklovykh znakovminnykh navantazhen [The results of the researches of crack resistance and deformability of bending reinforced concrete elements under the action of low-cycle alternating loadings]. *Zb. nauk. pr. "Stalezalizobetonni konstruksii: doslidzhennia, proektuvannia, budivnytstvo, ekspluatatsiia"* [Proc. "Steel reinforced concrete structures: research, design, building, exploitation"], 2002, issue 5, pp. 168-172.
13. Karapetian S. Kh. *Mitsnist i stiikist pozatsentrovo stysnutykh zalizobetonnykh sterzhniv v umovakh nebahatorazovo povtornykh navantazhen*. Atoreferat Diss. [The strength and fixity of eccentrically compressed bars under repeated loads. Author's abstract.]. Kyiv, 2009. 20 p.
14. Karpenko N. I., Eryshev V. A., Latysheva E. V. Metodika raschjota parametrov deformirovanija betona pri razgruzke s naprjazhenij szhatija [Calculation methods of parameters of concrete deformation at reloading from compression stress]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State Building University], 2014, issue 3, pp. 168-178.
15. Karpiuk V. M. *Rozrakhunkovi modeli prohinnykh zalizobetonnykh konstruksii pry skladnomu napruzhenodeformovanomu stani pryopornykh dilianok*. Dokt. Diss. [Calculation models of span reinforced concrete structures at complex stress-strain state of areas near supports. Dokt. Diss.]. Odesa, 2012. 365 p.
16. Karpiuk V. M. *Rozrakhunkovi modeli sylovoho oporu prohinnykh zalizobetonnykh konstruksii u zahalnomu vypadku napruzhenoho stanu* [Calculation models of power resistance of span reinforced concrete constructions in general case of stress state]. Odesa, ODABA Publ., 2014. 352 p.
17. Karpiuk V. M., Albu E. I., Somina Yu. A., A. K. Kitsak Metodika eksperimentalnykh issledovanij naprjazhenodeformirovannogo sostojanija priopornykh uchastkov zhelezobetonnykh balok pri malociklovom nagruchenii [Methodology of research of stress-strain state of areas near support of reinforced concrete beams under low-cycle load]. *Tezisy V Respubl. nauchno-tehn. konf. "Stroitelstvo - kak faktor formirovanija komfortnoj sredy zhiznedejatelnosti"* [Proc. of the V Republican Scientific and Technical Conf. "Building is a factor of comfortable environment and life activity formation"]. Bendery, 2013, pp. 3-10.
18. Kovalchuk I. Ya., Koval P. M. Doslidzhennia trishchynostiikosti poperedno napruzhenykh zalizobetonnykh balok pry dii malotsyklovykh navantazhenniakh [The research of crack resistance of prestressed reinforced concrete beams under the action of low-cycle loads]. *Nauk. notatky "Naukovo-prykładni aspekty avtomobilnoi i transportno-dorozhnoi haluzei"* [Scientific notations "Scientific and Practical aspects of automobile, transport and traffic branches"], 2014, issue 45, p. 282-287.
19. Korniiichuk O. I. Mitsnist ta trishchynostiikist pokhylykh pereriziv zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv pry dii malotsyklovykh znakovminnykh navantazhen. Avtoreferat Diss. [Strength and crack resistance of inclined sections of flexible reinforced concrete elements under the influence of low-cycle alternating loads. Author's abstract.]. Poltava, 2009. 21 p.
20. Luchko Y. Y., Kovalchuk V. V. Temperaturni polia ta napruzheni stan zalizobetonnykh balkovykh konstruksii mostiv [Temperature fields and stress state of reinforced concrete beam structures of bridges]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Odessa State Academy of Building and Architecture], 2013, issue 49, p. 221-236.
21. Masiuk H. Kh., Korniiichuk O. I. Napruzhenodeformovanyi stan pokhylykh pereriziv zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv, shcho zaznaiut dii malotsyklovykh znakovminnykh navantazhen [Stress - strain state of incline sections of bending concrete elements that are exposed to the action of low-cycle alternating loads]. *Zb. nauk. prats "Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy"* [Proc. "Resource saving materials, constructions, buildings and structured"], 2008, issue 17, pp. 204-211.
22. Mirsajapov I. T. *Vynoslivost zhelezobetonnykh konstrukcij pri dejstvii poperechnykh sil*. Dokt. Diss. [Endurance of reinforced concrete structures under the action of share forces. Doct. Diss.]. Kazan, 2009. 38 p.
23. Pecold T. M., Tur V. V. *Zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovy teorii, raschjota i konstruirovaniia* [Reinforced concrete structures. The basic of theory, calculations and design]. Brest, BGTU Publ., 2003. 379 p.
24. Aslani F., Jowkarmeimandi R. Stress-strain model for concrete under cyclic loading. *Magazine of Concrete Research of Wollongong (Australia)*, 2012, issue 8, pp. 673-685.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

---

25. Trapko W., Trapko T. The bearing capacity of reinforced concrete elements under repeated compressive load, reinforced with carbon strips. *Scientific magazine "Civil engineering and management"*, Wroclaw, Poland, 2012, issue 4, pp. 590-597.
26. Dorofeev V., Karpyuk V., Petrov N. Their capacity steel cross-section eccentrically shrink or stretch beams. *Materials of 18 Conference "Theoretical Foundations of Civil Engineering"*, Polish – Ukrainian – Lithuanian Transactions – Warsaw, September, 2010, pp. 345-352.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. К. В. Єгуповим (Україна), д.т.н., проф. А. В. Радкевичем (Україна).*

Надійшла до редколегії 11.08.2016.

Прийнята до друку 26.12.2016.