

**ПАРАМЕТРИ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ БАЛКОВИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ПРИ ДІЇ ЗНАКОЗМІННОГО ТА ЗНАКОПОСТІЙНОГО ЦИКЛІЧНИХ
НАВАНТАЖЕНЬ**

Карпюк В.М., д.т.н., професор,
Албу К.І.,
Даниленко Д.С.,
Сьоміна Ю.А.,
Петров М.М., к.т.н., доцент
Одеська державна академія будівництва та архітектури
v.karpiuk@ukr.net

Анотація. Стаття присвячена вивченню впливу знакозмінних та знакопостійних малоциклових повторних навантажень на параметри тріщиностійкості балкових залізобетонних елементів, що згинаються. На основі отриманих та опрацьованих експериментальних даних виведені та проаналізовані представлені в роботі адекватні математичні моделі основних параметрів, що характерні при процесах тріщиноутворення та розвитку тріщин за дії вказаних видів навантаження.

Ключові слова: тріщиностійкість, малоциклове знакозмінне навантаження, знакопостійне повторне навантаження, математична модель, нормальні і похилі тріщини.

**ПАРАМЕТРЫ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ БАЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО И
ЗНАКОПОСТОЯННОГО ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ**

Карпюк В.М., д.т.н., профессор,
Албу Е.И.,
Даниленко Д.С.,
Сёмина Ю.А.,
Петров Н.Н., к.т.н., доцент
Одесская государственная академия строительства и архитектуры
v.karpiuk@ukr.net

Аннотация. Статья посвящена изучению влияния знакопеременных и знакопостоянных малоцикловых повторных нагрузжений на параметры трещиностойкости балочных железобетонных изгибаемых элементов. На основе полученных и обработанных экспериментальных данных выведены и проанализированы представленные в работе адекватные математические модели основных параметров, характерных при процессах трещинообразования и развития трещин при воздействии указанных видов нагрузок.

Ключевые слова: трещиностойкость, малоцикловое знакопеременное нагружение, знакопостоянная повторная нагрузка, математическая модель, нормальные и наклонные трещины.

**PARAMETERS OF CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAM
ELEMENTS UNDER THE ACTION OF ALTERNATING LOW-CYCLE LOADING AND
CYCLIC LOAD OF CONSTANT SIGN**

Karpiuk V.M., D.Sc., Professor,

Abstract. The paper spotlights the relations and regularities of crack formation and crack propagation processes of reinforced concrete beam elements under the action of repeated alternating loading and low cycle load of constant sign. Three series of experimental tests under the action of mentioned kinds of loads were conducted. The article acquaints the readers with mathematical models that were derived based on the obtained experimental data. An analysis of these models allows to estimate the dependence of investigated parameters value on the action of cyclic loads really. Besides, obtained models have practical value for engineering calculations. There are the next parameters considers in the paper: width of vertical cracks and inclined cracks, the maximum length of dangerous inclined crack projection, slope angles of dangerous inclined crack to longitudinal axis of element, relative distances between vertical cracks in pure bending areas and relative distances between inclined cracks on the areas near the supports. The work is supplied with graphics that illustrates given adequate mathematical models.

Keywords: crack resistance, low cycle alternating load, repeated loading of constant sign, mathematical model, vertical and inclined cracks.

Вступ. Враховуючи їхню незвичайну природну та фізичну сутність, циклічні навантаження специфічним чином впливають на залізобетонні конструкції, викликаючи зміни механічних та деформативних характеристик матеріалів, впливаючи на процеси тріщиноутворення та деформативність елементів.

Постановка проблеми. Для забезпечення надійності залізобетонних конструкцій необхідно знати режими навантаження, закономірності зміни міцності і деформативності матеріалів, процесів тріщиноутворення та розвитку тріщин за дії малоциклових знакозмінних та знакопостійних повторних навантажень. Зміна знаку навантаження, його рівня в процесі експлуатації елементів може призвести до наслідків, якісно відмінних від отриманих при розрахунку на постійні навантаження одного знаку. Тому актуальним є вивчення роботи залізобетонних балкових елементів на дію циклічних навантажень різних рівнів та удосконалення методів їхнього розрахунку.

Короткий аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню впливу малоциклових повторних навантажень на залізобетонні елементи приділяли увагу такі відомі дослідники як Немировський В.Я., Макаренко Л.П., Бабич Є.М., Карпенко М.І., Гомон С.С., Масюк Г.Х., Корнійчук О.І., Мельник С.В., Валовой М.О., Караван В.В., Заречанський О.О. та багато інших.

Практично всі науковці, що працюють у напрямку даної тематики відмічають тенденцію негативного впливу на залізобетонні конструкції повторних навантажень, а саме на процеси тріщиноутворення та розвитку тріщин [1-10]. В середньому при дії вказаного виду навантаження ширина розкриття тріщин в згинальних елементах збільшується до 15% порівняно з одноразовим навантаженням.

Деякі вчені у своїх роботах [7-10] виконують розрахунок ширини розкриття нормальних та похилих тріщин або інших фізичних параметрів залізобетонних елементів, що піддаються дії повторних навантажень за допомогою введення в розрахунок відповідних коефіцієнтів або функцій. Але загальної достовірної думки щодо врахування умов дії циклічних навантажень на залізобетонні згинальні елементи досі немає. Тому питання вдосконалення інженерної методики їх розрахунку залишається важливим і актуальним.

Мета роботи – дослідити вплив малоциклового знакозмінного та знакопостійного повторного навантаження на параметри тріщиноустійкості залізобетонних балкових

згинальних елементів.

Виклад основного матеріалу. Згідно з прийнятою методологією [11] були виконані 3 серії натурних експериментів. 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 С 16/20, С 30/35, С40/50; кількість поперечного армування на припорних ділянках $\rho_{sw} = 0,0016; 0,0029; 0,0044$ (2Ø3, 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 руйнування, при якому ширина розкриття похилих тріщин w_k перевищувала 0,4 мм, а стріла прогинів $f \geq l/150$.

Спочатку почергово випробували 25 дослідних балок першої серії на дію одноразового короточасного ступеневого 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 навантаження складала не менше 10, якщо зразки не зруйнувалися при меншому числі циклів.

Під час випробувань дослідних зразків-балок на дію короточасного 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:

$$\hat{Y}(w_{cr, 1,2,3}^\perp, \eta Fu) = 0,14 + 0,02x_1 + 0,03x_2 + 0,01x_3 + 0,05x_4 + 0,01x_1^2 - 0,03x_2^2 + 0,02x_4^2 + 0,01x_1x_3 + 0,01x_1x_4 + 0,02x_2x_4 + 0,01x_3x_4, \text{ мм} \quad v = 6,2\% \quad (1)$$

геометрична інтерпретація якої може бути представлена рис. 1.

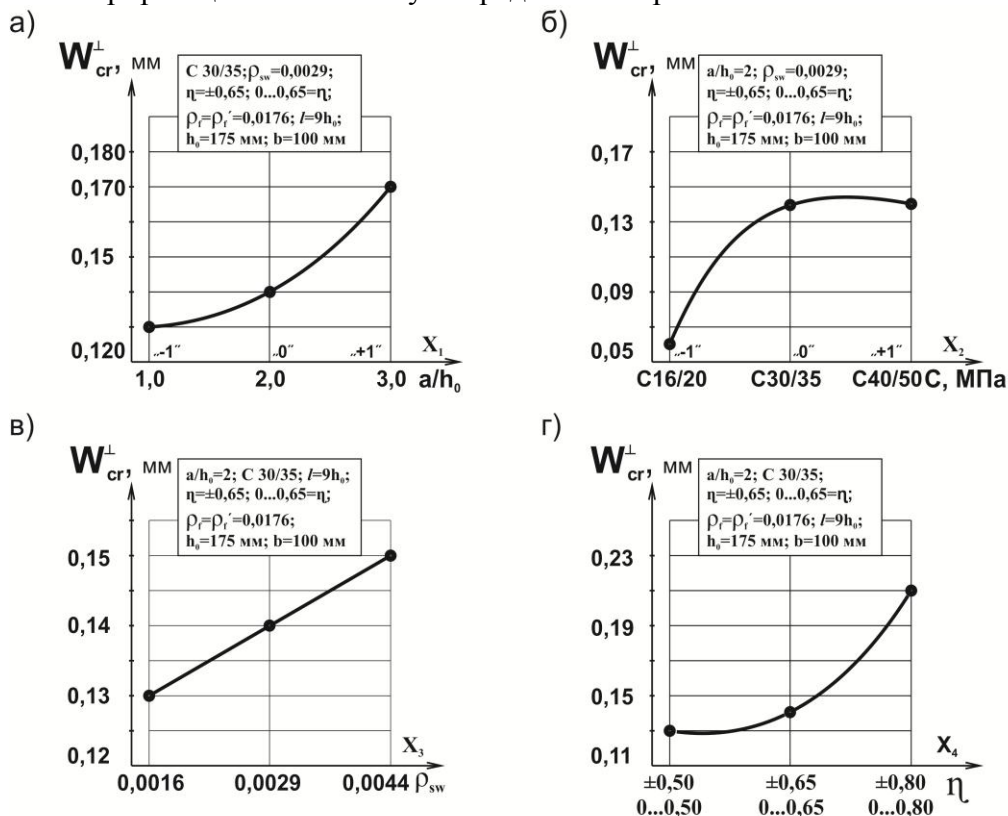


Рис. 1. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), міцності бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження на максимальну ширину розкриття нормальних тріщин в зоні чистого згину при заданих планом рівнях навантаження

Аналіз математичної моделі (1) показує, що максимальна ширина розкриття нормальних тріщин в зоні чистого згину в зазначених серіях збільшується порівняно з середнім значенням 0,14мм при середніх значеннях дослідних факторів: - зі збільшенням величини відносного прогону зрізу a/h_0 від 1 до 3 на 29%; - зі збільшенням класу бетону від С 16/20 до С 40/50 (власне, до С 30/35) на 43%; - зі збільшенням кількості поперечного армування ρ_{sw} від 0,0016 до 0,0044 на 14%; - з підвищенням рівня навантаження η від 0,5 до 0,8 F_u на 71%; - одночасним збільшенням: - величини відносного прогону зрізу і кількості поперечного армування в зазначених межах на 7%; - величини відносного прогону 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%.

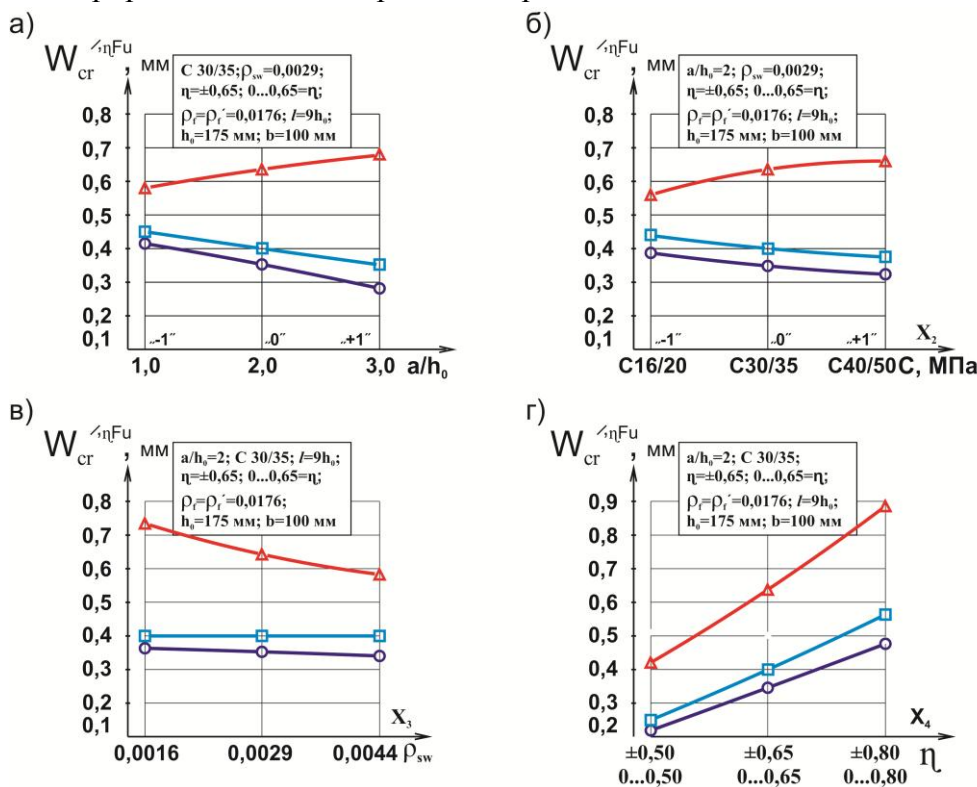
Максимальна ширина розкриття похилих тріщин посередині висоти припорних ділянок при заданих планом рівнях навантаження у серіях, що розглядаються, може бути охарактеризована трьома подібними за структурою математичними моделями:

$$\hat{Y}(w_{cr,1}^{/, \eta F_u}) = 0,35 - 0,06x_1 - 0,03x_2 - 0,01x_3 - 0,14x_4 - 0,01x_1x_3 - 0,03x_2x_4 - 0,02x_3x_4, \text{ мм} \quad v=10,4\% \quad (2)$$

$$\hat{Y}(w_{cr,2}^{/, \eta F_u}) = 0,63 + 0,05x_1 + 0,05x_2 - 0,06x_3 + 0,24x_4 - 0,02x_2^2 + 0,02x_3^2 + 0,02x_4^2 + 0,11x_1x_2 - 0,03x_1x_3 - 0,06x_3x_4, \text{ мм} \quad v=6,0\% \quad (3)$$

$$\hat{Y}(w_{cr,3}^{/, \eta F_u}) = 0,40 - 0,05x_1 - 0,03x_2 + 0,16x_4 - 0,03x_1x_3, \text{ мм} \quad v=6,0\% \quad (4)$$

геометрична інтерпретація яких відображена на рис. 2.



Умовні позначення:

- — дані К. І. Албу, Д.С. Даниленка, Ю.А. Сьоміної при однократному статичному навантаженні (1 серія);
- △ — дані К. І. Албу при знакозмінному малоцикловому навантаженні (2 серія);
- — дані Ю.А. Сьоміної при знакопостійному небагатократно повторному навантаженні (3 серія).

Рис. 2. Залежність максимальної ширини розкриття похилих тріщин на припорних ділянках при заданих планом рівнях навантаження від відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження

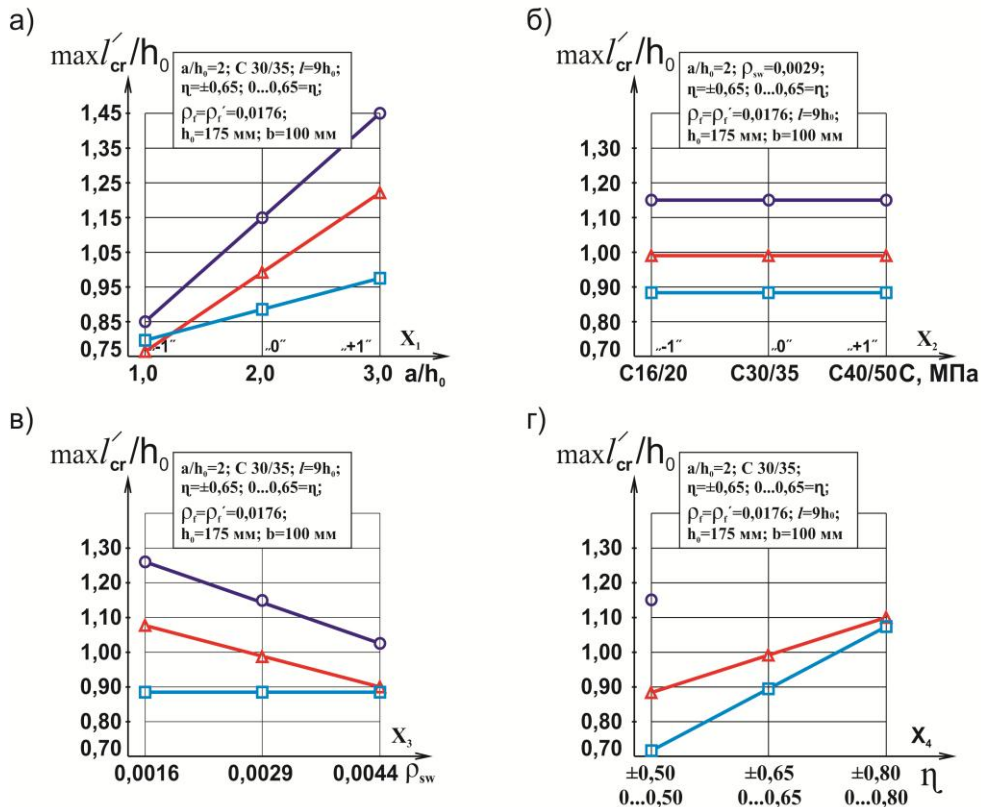
Для можливості порівняння отриманих експериментальних даних з результатами досліджень інших авторів абсолютно представити максимальні довжини проєкцій та кути нахилу небезпечних похилих тріщин до поздовжньої осі дослідних елементів у вигляді приведених до робочої висоти перерізу лінійних моделей по серіях:

$$\hat{Y}(\max l'_{cr,1}/h_0) = 1,15 + 0,30x_1 - 0,11x_3 - 0,02x_1x_2 - 0,13x_1x_3 \quad (5)$$

$$\hat{Y}(\max l'_{cr,2}/h_0) = 0,99 + 0,23x_1 - 0,09x_3 + 0,11x_4 + 0,09x_1x_2 - 0,04x_1x_3 \quad (6)$$

$$\hat{Y}(\max l'_{cr,3}/h_0) = 0,89 + 0,07x_1 + 0,19x_4 + 0,16x_1x_4 \quad (7)$$

графічне відображення яких представлено на рис 3.



Умовні позначення:

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

Рис. 3. 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)

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

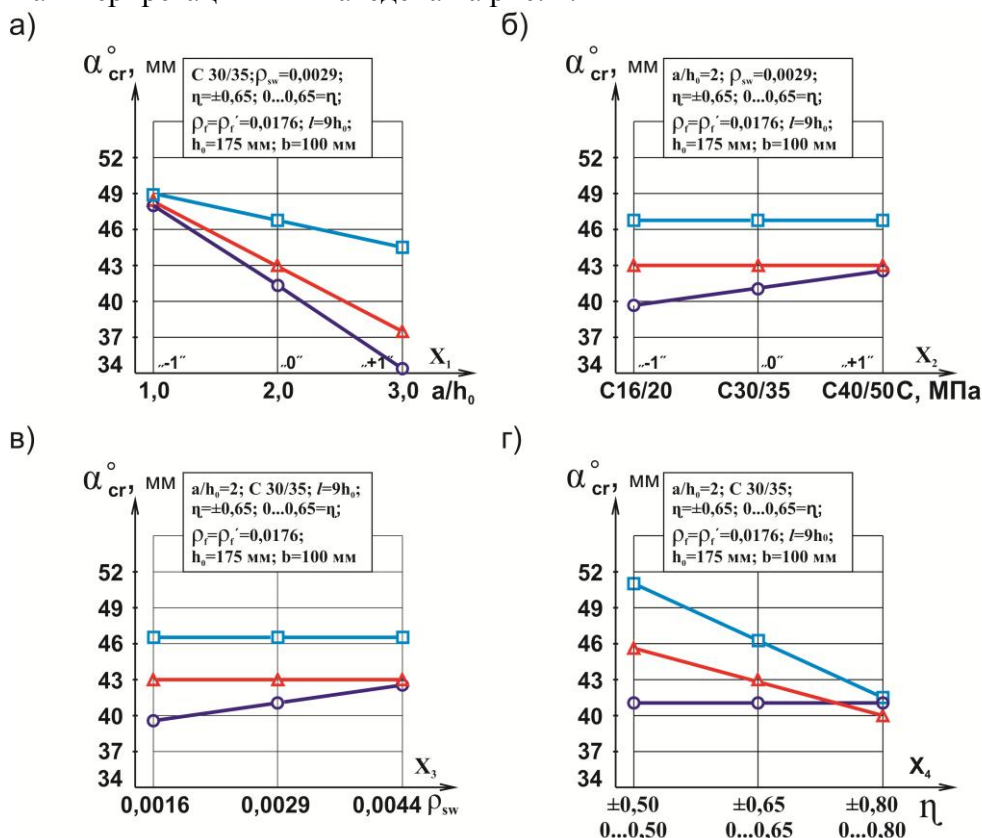
Обробка експериментальних значень кутів нахилу небезпечної похилої тріщини до поздовжньої осі елемента у дослідних серіях дозволила отримати наступні математичні моделі:

$$\hat{Y}(\alpha_{cr,1}) = 41,2 - 6,8x_1 + 1,6x_2 + 2x_3, \text{ град.}, v=3,4\% \quad (8)$$

$$\hat{Y}(\alpha_{cr,2}) = 43,0 - 5,3x_1 - 2,9x_4, \text{ град.}, v = 5,1\% \quad (9)$$

$$\hat{Y}(\alpha_{cr,3}^{\circ}) = 46,5 - 2,1x_1 - 5,2x_4, \text{ град.}, \nu = 6,7\% \quad (10)$$

геометрична інтерпретація яких наведена на рис. 4.



Умовні позначення:

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

Рис. 4. 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

Аналіз досить простих лінійних моделей (8)...(10) показує, що кути нахилу небезпечних похилих тріщин зменшуються по відношенню до своїх середніх значень $41,2^{\circ}$; $43,0^{\circ}$; $46,5^{\circ}$, відповідно, у 1, 2 і 3 серіях дослідів:

- при збільшенні відносного прогону 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 C40/50 до C16/20 на 8% і кількості поперечної арматури ρ_{sw} від 0,0044 до 0,0016 на 10% у серії дослідів при однократному статичному ступеневому зростаючому навантаженні.

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

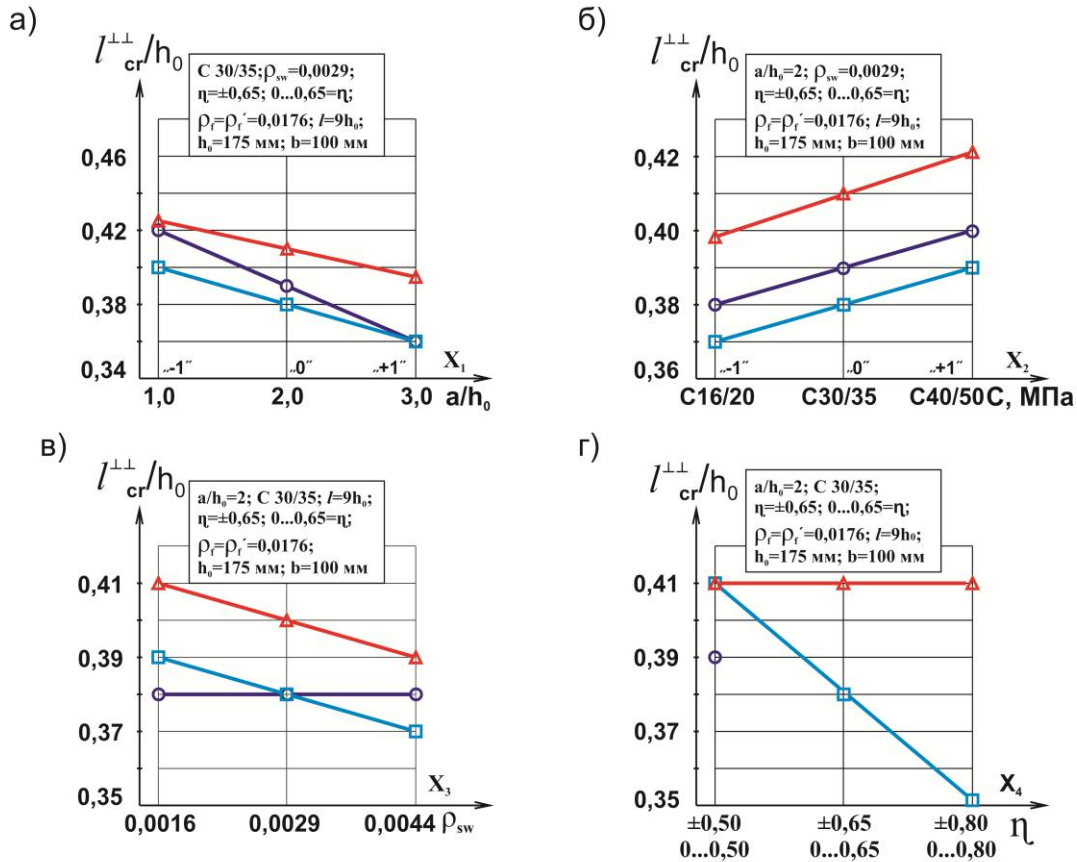
$$\hat{Y}(l_{cr,1}^{\perp} / h_0) = 0,39 - 0,03x_1 + 0,01x_2 + 0,02x_1x_3 \quad \nu = 5,1\% \quad (11)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,2}^{\perp} / h_0) = 0,41 - 0,014x_1 + 0,011x_2 - 0,01x_3 \quad \nu = 4,7\% \quad (12)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,3}^{\perp} / h_0) = 0,38 - 0,02x_1 + 0,01x_2 - 0,01x_3 - 0,03x_4 - 0,01x_1x_2 \quad \nu = 4,7\% \quad (13)$$

геометричне відображення яких представлено на рис. 5.

Як видно з моделей (11)...(13), 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 рис. 5, а, б, в, є однотипним.



Умовні позначення:

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

Рис. 5. 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)

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

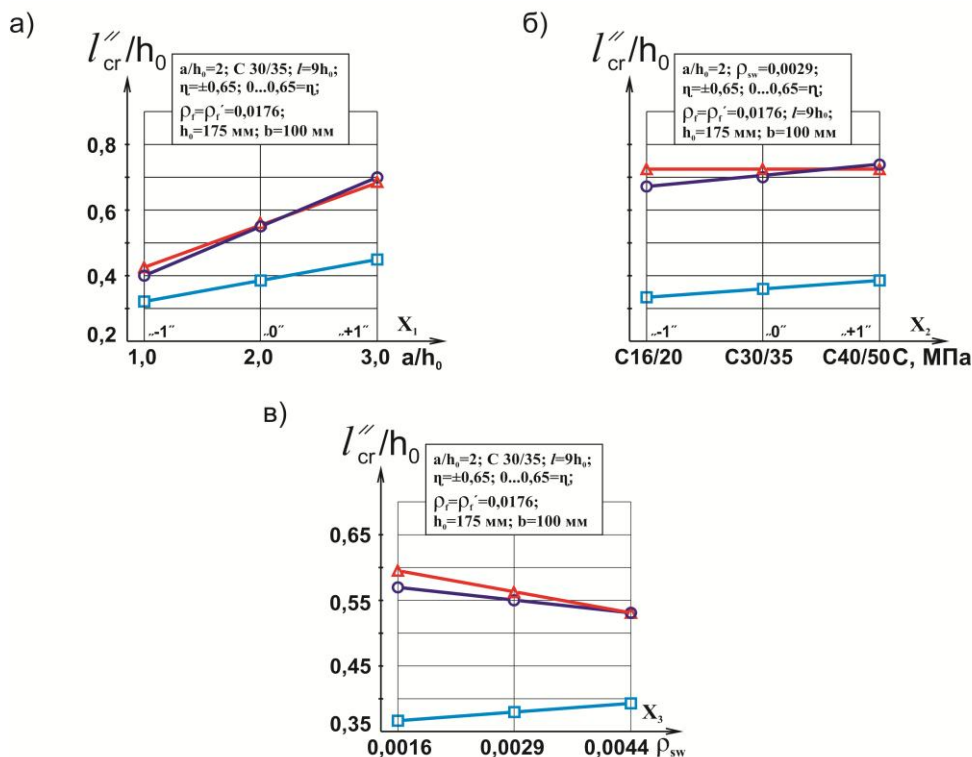
$$\hat{Y}(l_{cr,1}''/h_0) = 0,55 + 0,15x_1 + 0,01x_2 - 0,02x_3 \quad v = 8,0\% \quad (14)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,2}''/h_0) = 0,56 + 0,13x_1 - 0,03x_3 + 0,04x_1x_2 - 0,02x_1x_3 - 0,03x_2x_3 \quad v = 8,0\% \quad (15)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,3}''/h_0) = 0,38 + 0,07x_1 + 0,01x_2 - 0,01x_3 - 0,02x_1x_3 \quad v = 8,0\% \quad (16)$$

геометрична інтерпретація яких відображена на рис. 6.

Характерним для означених моделей є те, що рівень як однократного 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 розтягуючи напружень.



Умовні позначення:

- - дані К. І. Албу, Д.С. Даниленка, Ю.А. Сьоміної при однократному статичному навантаженні (1 серія);
- △— - дані К. І. Албу при знаковмінному малоцикловому навантаженні (2 серія);
- - дані Ю.А. Сьоміної при знаковпостійному небагатократно повторному навантаженні (3 серія).

Рис. 6. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на величину відносної віддалі між похилими тріщинами на приопронних ділянках дослідних зразків-балок

Висновки. Практичне значення математичних моделей (5)...(7) полягає у більш-менш точному визначенні довжини проекції 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;

Представлені в моделях (8)...(10) 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;

Представлені моделі (11)...(13) разом з виразом (1) можна використати для уточнення деформацій розтягнутої арматури і бетону, а також коефіцієнта ψ_s , який ураховує сумісну роботу розтягнутої арматури і бетону.

Література

1. Масюк Г.Х. Результати експериментальних досліджень тріщиностійкості і деформативності згинальних залізобетонних елементів під дією малоциклових знаковмінних навантажень / Х.Г. Масюк, В.В. Караван // Сталезалізобетонні конструкції. Дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. ст. – Кривий Ріг, 2002. – Вип. 5. – С. 168-172.

2. Борисюк О.П. Дослідження роботи підсилених залізобетонних балок при дії малоциклових навантажень / О.П. Борисюк, С.В. Мельник, О.П. Конончук, В.М. Петришин // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 17. – С. 404-410.
3. Коваль П.М. Дослідження тріщиностійкості попередньо напружених залізобетонних балок при дії малоциклових навантажень / П.М. Коваль, Я.І. Ковальчик // Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей: наук. нотатки. – Луцьк, 2014. – №45. – С. 282-287.
4. Бабич В.Є. Вплив повторних навантажень на ширину розкриття тріщин в нерозрізних залізобетонних балках / В.Є. Бабич // Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування. – Рівне: УДУВГП, 2002. – Вип. 5(18). – Частина 3. – С. 3-10.
5. Гомон П.С. Работа железобетонных балок таврового сечения при действии повторного нагружения / П.С. Гомон // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной конференции молодых ученых. – Могилев, 2009. – С. 90.
6. Дробишинець С.Я. Експериментальні дослідження сталевібробетонних та сталевіброзалізобетонних балок при одноразовому та малоцикловому навантаженні / С.Я. Дробишинець // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне, 2003. – Вип. 9. – С. 218-224.
7. Валовой М.О. Міцність, тріщиностійкість та деформативність підсилених згинальних елементів при повторних навантаженнях: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Валовой Максим Олександрович. Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2011. – 20 с.
8. Герб П.І. Робота підсилених балок на відходах ГЗК при малоциклових навантаженнях високих рівнів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Герб Павло Іванович. Криворізький технічний університет (КТУ). – Київ, 2011. – 20 с.
9. Корнійчук О.І. Міцність та тріщиностійкість похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Корнійчук Олександр Іванович. Полт НТУ імені Юрія Кондратюка. - Полтава, 2009. -21 с.
10. Савицький В.В. Вплив короточасних малоциклових навантажень на напружено-деформований стан і міцність нерозрізних збірно-монолітних залізобетонних балок: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Савицький Валентин Вікторович. Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2007. – 20 с.
11. Карпюк В.М. Методика експериментальних досліджень напружено-деформованого стану приопорних участків залізобетонних балок при малоцикловому навантаженні / В.М. Карпюк, Е.І. Албу, Ю.А. Сєміна, А.К. Кицак // (28.11.2013) Ст. мат-в V Республ. научно-техн. конф. — Бендери: Бендерский ПФ ГОУ «ПГУ им. Т. Г. Шевченка». – С. 3-10.