

АВТОРСЬКА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЇ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ¹**Сьоміна Ю.А.**, к.т.н.,

syomina3091@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6330-0137

¹**Карпюк В.М.**, д.т.н., професор,

v.karpiuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4088-6489

¹**Костюк А.І.**, к.т.н., професор,

isi@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-5642-2443

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Аналіз результатів, як власних випробувань, так і досліджень інших учених показує, що руйнування конструкцій під впливом повторних навантажень відбувається при менших напруженнях, ніж руйнування конструкцій під впливом короточасних статичних навантажень. Зокрема, несуча здатність балок при дії циклічних навантажень у середньому на 10% нижче порівняно з несучою здатністю їхніх «близнюків», що працюють в умовах статичних впливів, що має бути враховано при розрахунку та проектуванні конструкцій.

У зв'язку з цим у роботі представлений авторський метод розрахунку похилих перерізів залізобетонних балкових конструкцій, що працюють в умовах малоциклових, а також багатоциклових навантажень. Повторні навантаження пропонується враховувати шляхом підрахунку втомних міцностей матеріалів балок, а саме стиснутої зони бетону над критичною похилою тріщиною, поздовжньої арматури в місці перетину з похилою тріщиною, а також анкерування поздовжньої арматури. Зокрема, розглянуто розрахункові лінії витривалості бетону та арматури. У практичних розрахунках зміна напруження, що відбувається внаслідок розвитку деформацій віброповзучості стиснутого бетону в умовах складного напруженого стану, враховується функціями накопичення напружень у бетоні, поздовжній та поперечній арматурі. Ці функції деформацій віброповзучості бетону обчислюються за теорією віброповзучості.

За результатами досліджень виведені та представлені відповідні авторські вирази та залежності, що дозволяють визначити граничні зусилля, які може витримати конструктивний елемент із заданим прольотом зрізу. Крім того, запропоновано введення до розрахунку коефіцієнта $k_{сус}$, що враховує більш деструктивний вплив багатоциклового навантаження порівняно з малоцикловим повторним. Таким чином, $k_{сус}$ – це відношення руйнуючої поперечної сили до мінімального розрахункового граничного зусилля витривалості приопорних ділянок дослідних зразків-балок, обчисленого з використанням характеристичних значень міцності бетону та арматури, тобто міцності бетону і межі текучості арматури.

Ключові слова: залізобетон, балка, похилий переріз, повторне навантаження, втомна міцність, витривалість, напруження, деформації.

Вступ. Досвід проектування, будівництва та експлуатації прогінних залізобетонних конструкцій показує, що практично всі вони працюють у складному напружено-деформованому стані. При цьому значно більше уваги дослідники приділяють розрахунку міцності, деформаційності та тріщиностійкості елементів у нормальних перерізах, ніж розрахунку їх перерізів біля опор, у тому числі й похилих. Крім того, багато прогінних залізобетонних елементів піддаються дії малоциклових та багатоциклових навантажень. Вони призводять до таких особливостей роботи бетону, як нелінійність деформування, мікротріщини, накопичення залишкових деформацій, малоциклова втома (втомне пошкодження), декомпресія бетону тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Результати численних досліджень Карпюка В.М. та ін. [1], Aslani F. та Jowkarmeimandi R. [2], Sakr M.A. [3], Yoshitake I. та ін. [4], Trapko W. та Trapko T. [5], Gopinath S. та ін. [6], Naghibdehi M. та ін. [7], Гомона П.С. [8], Кухнюка О.М. [9], Бабича Є.М. [10], Мирсаяпова І.Т. [11] показують, що руйнування конструкцій під дією малоциклових навантажень відбувається при менших напруженнях, ніж руйнування конструкцій під дією короткочасних статичних навантажень. А саме, несуча здатність балок за дії повторних навантажень в середньому на 10% нижча порівняно з несучою здатністю їх «близнюків», що працюють в умовах статичних впливів. На думку авторів, наведені особливості певним чином повинні бути враховані при розрахунку та проектуванні конструкцій, адже нехтування даних умов може призвести до непрогнозованих та неконтрольованих наслідків.

Виходячи з цього, **метою авторських досліджень** є створення інженерної методики розрахунку похилих перерізів залізобетонних балкових конструкцій під дією циклічних навантажень, що враховує втрату міцності бетону та арматури.

Методи досліджень. Відомо, що зміна міцності матеріалів при циклічному навантаженні в напівлогарифмічних координатах $f_{cd} = \lg N$ описується лінійною залежністю. Лінія витривалості характеризується похилими і горизонтальними ділянками. Тому характерними точками лінії витривалості є початок і точка її перегину.

Для бетону початок лінії витривалості – це точка на осі напружень (рис. 1) при $N = 1$, яка відповідає його динамічній міцності при одноразовому навантаженні зі швидкістю, яка дорівнює швидкості прикладання циклічного навантаження. При цьому, чим більша його частота, тим більша міцність при одноразовому динамічному навантаженні.

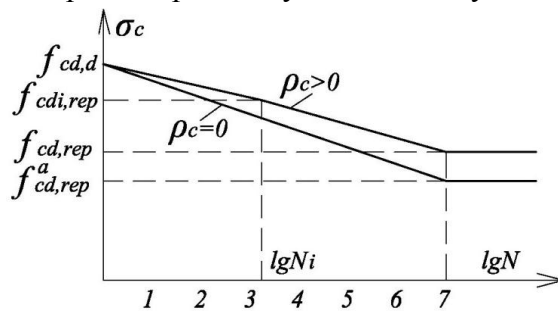


Рис. 1. Розрахункові лінії витривалості бетону

В практичних розрахунках приймаємо:

$$f_{cd,d} = k_d \cdot f_{cd}, \quad (1)$$

де k_d , f_{cd} – відповідно, коефіцієнт динамічного зміцнення бетону і його міцність при статичному навантаженні.

Згідно з пропозицією [12] коефіцієнт динамічного зміцнення бетону визначаємо як навантаженого вперше за формулою:

$$k_d = 1 + 0,6 \cdot \frac{0,27 + 0,8 [\text{th}(0,15 \lg v) - 0,358]}{1 - 0,358 \text{tg}(\lg v)}, \quad (2)$$

а з урахуванням пластичного ресурсу на попередніх етапах навантаження:

$$k_d = 1 + 0,085 \lg v \left\{ \lg \left[\frac{c_{\infty}(t, \tau) - \frac{c_{\infty}(t, \tau) \sigma_{c1}^{\max} (1 - \rho_{c1}) [1 - (1 - a)^N] 10^5}{f_{cd}}}{\sum_{i=2}^k \Delta \sigma_{ci} c_{\infty}(t, \tau) (1 - \rho_{bi}) [1 - (1 - a)^N] 10^5} + 1 \right] \right\}, \quad (3)$$

де v – швидкість навантаження в $\left[\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}} \right]$.

Для бетону абсолютна межа витривалості при $\rho_c = 0$ за [12] коливається в межах $(0,47 \dots 0,55)f_{cd}$ і збігається з нижньою межею мікротріщиноутворення f_{cr}^0 . Тому в практичних розрахунках абсолютну межу витривалості $f_{cd,rep}^a$ при $\rho_c = 0$ приймаємо рівною $0,5f_{cd}$, а відносна межа витривалості в такому випадку дорівнює:

$$k_{c,rep}^a = f_{cd,rep}^a / f_{cd} = 0,5. \quad (4)$$

Відносне значення витривалості бетону при розтязі, зсуві та крученні приймаємо таким же. Оскільки нижня межа мікротріщиноутворення залежить лише від рівня діючого напруження і виду напруженого стану, то для будь-яких ρ_c межа витривалості буде однаковою, а її величина матиме вплив на довговічність конструкції, тобто на кількість циклів, при яких настане перегин ліній витривалості. Перегин цих ліній починається при $N \geq 10^7$. Для $\rho_c = 0$ можна прийняти $N = 10^7$, що створює деякий запас. Для більших значень ρ_c ця точка пересувається вправо по осі $\lg N$ тим більше, чим більший ρ_c [12]:

$$k_{c,rep} = \frac{f_{cd,rep}}{f_{cd}} = \frac{k_{c,rep}^a}{1 - \rho_c \left(1 - \frac{k_{c,rep}^a}{k_d} \right)}, \quad (5)$$

а втомна міцність при $N < 10^7$:

$$f_{cdi,rep} = f_{cd,d} - \frac{\lg N_i}{7} (f_{cd,d} - f_{cd,rep}) \quad (6)$$

або у відносних величинах з урахуванням (1) і (6), приймаючи $k_d = 1,3$ і ураховуючи (4):

$$k_{ci,rep} = 1,3 - \frac{\lg N_i}{7} \left(1,3 - \frac{0,5}{1 - 0,616\rho_c} \right). \quad (7)$$

Для арматури А.П. Кириллов [12] рекомендує приймати за початок лінії витривалості значення:

$$f_{yd,d} = \eta \cdot \sigma_u, \quad (8)$$

а перегин лінії витривалості (рис. 2) в точці з координатами:

$$f_{yd,rep} = \sigma_u \frac{k_0 \cdot k_c \cdot k_r}{1 - \rho_s \left(1 - \frac{k_0 \cdot k_c \cdot k_r}{\eta} \right)}, \quad \lg N = 6,3, \quad (9)$$

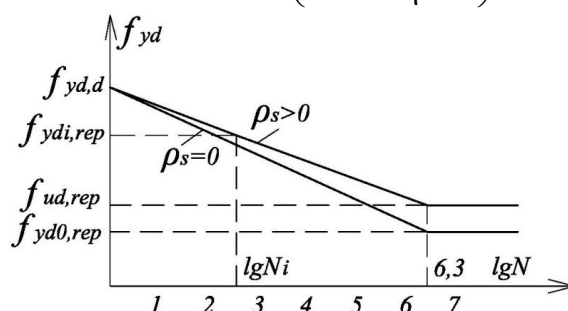


Рис. 2. Розрахункові лінії витривалості арматури

де $k_0 = \frac{f_{yd0,rep}}{\sigma_u}$ – відносна межа витривалості арматури при $\rho_s = 0$;

k_c – коефіцієнт, який урахує наявність концентратора напружень; k_r – коефіцієнт, що урахує діаметр арматури;

σ_u – тимчасовий опір арматури розриву; $\eta = 1,8$ – емпіричний коефіцієнт.

Втомна міцність елемента для кількості циклів $N < 2 \cdot 10^6$ складає:

$$f_{ydi,rep} = f_{yd,d} - \frac{\lg N_i}{\lg(2 \cdot 10^6)} (f_{yd,d} - f_{yd,rep}), \quad (10)$$

а з урахуванням (8) і (9) у відносних величинах вона має вид:

$$k_{y_{di,rep}} = \eta - \frac{\lg N_i}{6,3} \left[\eta - \frac{k_0 \cdot k_c \cdot k_r}{1 - \rho_s \left(1 - \frac{k_0 \cdot k_c \cdot k_r}{\eta} \right)} \right]. \quad (11)$$

У практичних розрахунках зміна напружень, яка відбувається внаслідок розвитку деформацій віброповзучості стиснутого бетону в умовах складного напруженого стану урахується функціями накопичення напружень в бетоні H_{σ_c} , поздовжній H_{σ_s} і поперечній H_{σ_w} арматурі. Це функції деформацій віброповзучості бетону, що обчислюються за теорією віброповзучості [13]. Поточні напруження в бетоні, поздовжній та поперечній арматурі на момент часу t у розрахунках представляються у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_c^{\max}(t) &= \sigma_c^{\max}(t_0) \cdot H_{\sigma_c}; \quad \sigma_s^{\max}(t) = \sigma_s^{\max}(t_0) \cdot H_{\sigma_s}; \\ \sigma_{sw}^{\max}(t) &= \sigma_{sw}^{\max}(t_0) \cdot H_{\sigma_{sw}}, \end{aligned} \quad (12)$$

де $\sigma_c^{\max}(t)$; $\sigma_s^{\max}(t)$; $\sigma_{sw}^{\max}(t)$ – початкові напруження, відповідно, в бетоні, поздовжній та поперечній арматурі.

В рамках даної статті розглядаємо елементи з середнім прольотом зрізу. Отже, в бетонних і залізобетонних елементах при середніх прольотах зрізу з урахуванням (1) умови витривалості перетворюються наступним чином:

$$\begin{aligned} \sigma_{lc}^{\max}(t_0) &\leq f_{cdc,rep}(t)/H_{\sigma_c}, \quad \sigma_{sw,\alpha}^{\max}(t_0) \leq f_{yds,rep}(t)/H_{\sigma_{sw}}, \\ \sigma_{sb}^{\max}(t_0) &\leq f_{yds,rep}(t)/H_{\sigma_s}, \quad \sigma_s^{\max}(t_0) \leq f_{ydan,rep}(t)/H_{\sigma_s}. \end{aligned} \quad (13)$$

Межі витривалості стиснутої зони над критичною похилою тріщиною в залізобетонних елементах після урахування спрощуючих передумов визначаються, відповідно:

$$f_{cd,rep} = \frac{f_{y_{di,rep}} \cdot A_{sw} \cdot \cos \beta \cdot \left(\frac{h \cdot \operatorname{ctg} \varphi}{l_{sup} \sin^2 \beta} - \operatorname{ctg} \varphi \cdot \operatorname{ctg} \beta - \cos^2 \varphi \right)}{H_{\sigma_{sw\beta}} \cdot b \cdot s \cdot \left\langle 1 - L_\varepsilon \cdot \left[\frac{G_c}{\sin^2 \varphi} + \frac{6E_s I_s \cdot n \cdot \cos(\varphi - \beta) \sin \beta}{b \left(d_s \cdot 4 \sqrt{\frac{E_s}{E_c}} \cdot \left(1,4 + 1,254 \sqrt{\frac{a_s}{d_s}} \right)^3 \right) \sin \varphi} \right] \cdot \left(\frac{1}{E_c} + H_\varepsilon \right) \right\rangle} \quad (14)$$

де $f_{cdi,rep}$; $f_{y_{di,rep}}$ – межі витривалості бетону при розтязі і арматури;

H_ε – функція накопичення деформацій в бетоні при повторному навантаженні;

E_s , E_c , G_c – модулі пружності арматури і бетону, а також зсуву бетону.

Межа витривалості поздовжньої арматури в місці перетину з похилою тріщиною в умовах плоского напруженого стану визначається так:

$$f_{y_{dq,rep}}(t) = \frac{\sigma_u \left\langle k_{ds} - \left\{ k_{ds} - k_0 k_c k_r / [1 - \rho_s (k_0 k_c k_r / k_{ds})] \right\} \cdot \lg N_i / 6,3 \right\rangle}{\sqrt{1 + 3 \left(\tau_s^{\max} / \sigma_{sb}^{\max} \right)^2}}, \quad (15)$$

Межа витривалості анкерування поздовжньої арматури має вид:

$$f_{y_{d,an}}(t, \tau) = f_{cdi,rep} B_0 (d + 2c_r) L / f_{cd} \cdot d^2, \quad (16)$$

де B_0 – еталонний параметр зчеплення.

Результати дослідження. Виходячи з умов витривалості бетону над небезпечною похилою тріщиною, поздовжньої та поперечної арматури визначено граничні зусилля, які може витримати конструктивний елемент з середнім прольотом зрізу:

$$P_{\lim, 2h_0}^{\min} \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{w\beta, \text{rep}} \cdot \sigma_u \cdot A_{sw} \cdot \cos \beta \cdot \left(\frac{h \cdot \text{ctg} \varphi}{l_{\text{sup}} \cdot \sin^2 \beta} - \text{ctg} \varphi \cdot \text{ctg} \beta - \cos^2 \varphi \right) l_{\text{sup}} \cdot \sin^2 \beta}{H_{w\beta} \cdot s \left\langle 1 - L_\varepsilon \left\{ \frac{G_c}{\sin^2 \varphi} + \frac{6E_s \cdot I_s \cdot n \cdot \cos(\varphi - \beta) \sin \beta}{b \left[d_s \cdot \sqrt[4]{\frac{E_s}{E_c}} \cdot \left(1, 1 + 1, 254 \sqrt{\frac{a_s}{d_s}} \right)^3 \right] \sin \varphi} \right\} \cdot \left(\frac{1}{E_c} + H_\varepsilon \right) \right\rangle} \right. \\ \text{або} \\ \frac{k_{wi, \text{rep}} \cdot \sigma_u \cdot \omega_{sw}^1 \cdot b \cdot h_0}{H_{w\alpha} \cdot E_{sw} \cdot \text{ctg} \alpha \left\{ \frac{1}{G_c} + \frac{2(c_0 - x_1 \text{ctg} \alpha - 0, 5l_{\text{sup}})}{E_c \cdot h_0 \left[(1 + \lambda) - 0, 33\xi_1 (1 + \lambda + \lambda^2) \right]} \cdot \frac{h_0 - x}{x} \text{tg} \varphi \right\}}, \\ \text{або} \\ \frac{k_{si, \text{rep}} \cdot \sigma_u \cdot A_s}{H_{\sigma_s} \cdot j_l}, \text{ або } \frac{k_{ci, \text{rep}} \cdot B_0 (d + 2c_r) L \cdot A_s}{H_{\sigma_s} \cdot d^2 \cdot j_l} \end{array} \right. \quad (17)$$

Відносна втомна міцність бетону при обмеженій кількості циклів ($N < 10^7$) $k_{ci, \text{rep}}$ визначається за (7), а відносна втомна міцність арматури $k_{si, \text{rep}}$ – за (11).

Порівняння розрахункових і фактичних значень несучої здатності похилих перерізів дослідних зразків-балок у роботі [1] показало, що не дивлячись на повний збіг фізичних моделей і дійсних картин руйнування їхніх приопорних ділянок, руйнуюча довантажуюча поперечна сила V_{uz} в 1,91...7,92 рази є більшою від прогнозованого поперечного зусилля витривалості бетону над небезпечною похилою тріщиною та поперечної арматури. Причиною такої розбіжності, очевидно, є більш деструктивний вплив багаторазового циклічного навантаження порівняно з малоцикловим повторним поперечним навантаженням, недооцінка реального впливу різних конструктивних чинників в зазначених роботах, а також те, що при вказаних рівнях навантаження руйнування балок ще не відбулося.

Для вирішення цієї проблеми граничні зусилля рекомендується помножити на коефіцієнт $k_{\text{сyc}}$. Тобто, опір приопорних ділянок прогінних залізобетонних конструкцій, зокрема розрахункові значення поперечної сили, які зможе сприйняти похилий переріз такої конструкції з поперечною арматурою чи без неї, з малим, середнім чи великим прольотом зрізу доцільно визначати з урахуванням її витривалості за малоциклової дії повторного навантаження за виразом:

$$V_{Rd} = k_{\text{сyc}} \left\{ \begin{array}{l} P_{\lim, h_0}^{\min} \\ P_{\lim, 2h_0}^{\min} \\ P_{\lim, 3h_0}^{\min} \end{array} \right\}, \quad (18)$$

де $k_{\text{сyc}}$ – це відношення руйнуючих поперечних сил до мінімального розрахункового граничного зусилля витривалості приопорних ділянок дослідних зразків-балок, обчисленого за (17) з використанням характеристичних значень міцності бетону та арматури, тобто призмової міцності бетону і границі текучості арматури.

Математична модель даного коефіцієнта має вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{Y}(k_{\text{сyc}}) = & 3,84 + 0,44X_1 - 0,69X_2 - 1,68X_3 - 0,12X_4 + 0,11X_1^2 + 0,06X_2^2 + \\ & + 0,31X_3^2 - 0,08X_4^2 - 0,34X_1X_2 + 0,25X_2X_3, \quad v = 5,1\%. \end{aligned} \quad (19)$$

Найбільший вплив на величину коефіцієнта $k_{\text{сус}}$ має кількість поперечної арматури (фактор X_3), потім – клас бетону (X_2), далі – величина відносного прольоту зрізу (X_1) і нарешті, – рівень малоциклового повторного навантаження (X_4).

Для зручності практичного застосування коефіцієнта $k_{\text{сус}}$ залежність (19) доцільно видозмінити, замінивши кодовані значення дослідних факторів на натуральні:

$$k_{\text{сус}} = 3,84 + 0,44 \left(\frac{a/h_0 - 2}{1} \right) - 0,69 \left(\frac{C - 35 \text{ МПа}}{15} \right) - 1,68 \left(\frac{\rho_{\text{sw}} - 0,0029}{0,0014} \right) - \\ - 0,12 \left(\frac{\eta - 0,65}{0,15} \right) + 0,11 \left(\frac{a/h_0 - 2}{1} \right)^2 + 0,06 \left(\frac{C - 35 \text{ МПа}}{15} \right)^2 + 0,31 \left(\frac{\rho_{\text{sw}} - 0,0029}{0,0014} \right)^2 - \\ - 0,08 \left(\frac{\eta - 0,65}{0,15} \right)^2 - 0,34 \left(\frac{a/h_0 - 2}{1} \right) \left(\frac{C - 35 \text{ МПа}}{15} \right) + \\ + 0,25 \left(\frac{C - 35 \text{ МПа}}{15} \right) \left(\frac{\rho_{\text{sw}} - 0,0029}{0,0014} \right). \quad (20)$$

Залежність (20) є справедливою не тільки в межах зміни дослідних факторів, а й можливою її екстраполяцією на величину до 25% від величин їхніх інтервалів.

Висновки:

1. Представлена інженерна методика ураховує як зміну напружено-деформованого стану прогінних залізобетонних конструкцій в процесі повторного навантаження, так і зміну міцнісних властивостей бетону, арматури та їхнього зчеплення на момент часу t і може бути застосована на всьому діапазоні зміни міцнісних характеристик матеріалів від малоциклового до багатоциклового повторного навантаження.

2. Запропонована інженерна методика розрахунку міцності приопорних ділянок балкових залізобетонних конструкцій передбачає всі можливі схеми їх руйнування і дозволяє спрогнозувати втрату міцності бетону над небезпечною похилою тріщиною і наявної поперечної арматури, поздовжньої робочої арматури на розрив або проковзування за цією тріщиною через недостатню її кількість (обрив) або неналежне анкерування.

3. Для зближення дослідних і розрахункових значень руйнуючої довантажуючої поперечної сили за стабілізованого малоциклового повторного навантаження розрахункові граничні зусилля витривалості бетону, поперечної і поздовжньої арматури, обчислені з урахуванням циклічного поперечного навантаження доцільно збільшити шляхом введення коефіцієнта $k_{\text{сус}}$, який комплексно ураховує вплив найбільш важливих конструктивних чинників та рівня повторного малоциклового навантаження як зокрема, так і у взаємодії один з одним.

Досить актуальним питанням на сьогодні є використання екологічних та енергоефективних матеріалів для елементів конструкцій будівель та споруд таких як деревина, комбінації деревини та бетону тощо. Окрім того, тенденція гібридного застосування сталі, бетону та деревини починає широко запроваджуватися не тільки за кордоном, а й в Україні. Виходячи з цього, перспективою подальших досліджень є адаптація представленої авторської методики для розрахунку конструкцій, виготовлених з вказаних матеріалів, що працюють в умовах повторних навантажень.

Література

1. Карпюк В.М., Сьоміна Ю.А., Костюк А.І., Майстренко О.Ф. Особливості напружено-деформованого стану і розрахунку залізобетонних конструкцій за дії циклічного навантаження високих рівнів. Одеса: ОДАБА, 2018. 237 с.
2. Aslani F. & Jowkarmeimandi R. Stress-Strain Model for Concrete under Cyclic Loading. *Magazine of Concrete Research*. 2012. 64(8). pp. 673-685.

3. Sakr M.A. Effect of Cyclic Loadings on the Shear Strength and RFT Slip of R.C. Beams. *ICE Proceedings Civil Engineering*. 2017. 3(2). pp. 111-123.
4. Yoshitake I., Hasegawa H., Shimos K. Monotonic and Cyclic Loading Tests of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Bond-improved Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Rods of Ultra-high Modulus. *Engineering Structures*. 2020. Volume 206. pp. 110-175.
5. Trapko W. & Trapko T. Load-Bearing Capacity of Compressed Concrete Elements Subjected to Repeated Load Strengthened with CFRP Materials. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2012. 18(4). pp. 590-596.
6. Gopinath S., Murthy R., Relyer N., Prabha M. Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Basalt Textile Reinforced Concrete. *Journal of Industrial Textiles*. 2015. 44(6). pp. 924-931.
7. Naghibdehi M., Naghipour M., Rabiee M. Behaviour of Functionally Graded Reinforced Concrete Beams under Cyclic Loading. *Gradevinar*. 2015. 67(5). pp. 427-439.
8. Гомон П.С. Работа железобетонных балок таврового сечения при действии повторного нагружения. *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности. Мат-лы международной конференции молодых ученых*. 2009. С. 90.
9. Кухнюк О.М. Вплив малоциклових навантажень на механічні характеристики бетону та роботу згинальних залізобетонних елементів. Автореферат дис. на здобуття наукового ступеня к.т.н. за спец-тю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. Львів, 2001. 16 с.
10. Бабич Є.М., Крусь Ю.О. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень. Рівне: РДТУ, 1999. 119 с.
11. Мирсаяпов И.Т. Выносливость железобетонных конструкций в зоне совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил при многократно повторяющихся нагрузках. Автореферат дис. на соискание научной степени д.т.н. по спец-ти 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. Казань, 2009. 39 с.
12. Кириллов А.П. Выносливость гидротехнического железобетона. Москва: Энергия, 1978. 272 с.
13. Бондаренко В.М. О деформациях виброползучести бетона. *Структура, прочность и деформации бетонов*. 1966. С. 344-351.

References

- [1] V.M. Karpiuk, Yu.A. Somina, A.I. Kostiuk, O.F. Maistrenko, *Osoblyvosti napruzhenodeformovanoho stanu i rozrakhunku zalizobetonnykh konstruksii za dii tsyklichnoho navantazhennia vysokykh rivniv*, Odesa, ODABA, 2018.
- [2] F. Aslani & R. Jowkarmeimandi, "Stress-Strain Model for Concrete under Cyclic Loading", *Magazine of Concrete Research*, 2012, 64(8), pp. 673-685.
- [3] M.A. Sakr, "Effect of Cyclic Loadings on the Shear Strength and RFT Slip of R.C. Beams", *ICE Proceedings Civil Engineering*, 2017, 3(2), pp. 111-123.
- [4] I. Yoshitake, H. Hasegawa, K. Shimos, "Monotonic and Cyclic Loading Tests of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Bond-improved Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Rods of Ultra-high Modulus", *Engineering Structures*, 2020, vol. 206, pp. 110-175.
- [5] W. Trapko & T. Trapko, "Load-Bearing Capacity of Compressed Concrete Elements Subjected to Repeated Load Strengthened with CFRP Materials", *Journal of Civil Engineering and Management*, 2012, 18(4), pp. 590-596.
- [6] S. Gopinath, R. Murthy, N. Relyer, M. Prabha, "Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Basalt Textile Reinforced Concrete", *Journal of Industrial Textiles*, 2015, 44(6), pp. 924-931.
- [7] M. Naghibdehi, M. Naghipour, M. Rabiee, "Behaviour of Functionally Graded Reinforced Concrete Beams under Cyclic Loading", *Gradevinar*, 2015, 67(5), pp. 427-439.

- [8] P.S. Gomon, "Rabota zhelezobetonnykh balok tavrovogo secheniya pri dejstvii povtornogo nagruzhennii", *Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti. Mat-ly mezhd. konf. mol. uch.*, 2009, p. 90.
- [9] O.M. Kukhniuk, "Vplyv malotsyklovykh navantazhen na mekhanichni kharakterystyky betonu ta robotu zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv", avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya k-ta tekhn. nauk: 05.23.01, Natsionalnyi universytet "Lvivska Politekhnik", Lviv, 2001.
- [10] Ye.M. Babych, Yu.O. Krus, *Betonni ta zalizobetonni elementy v umovakh malotsyklovykh navantazhen*, Rivne, RDTU, 1999.
- [11] I.T. Mirsayapov, "Vyinoslivost zhelezobetonnykh konstruktсий v zone sovmestnogo deystviya izgibayuschiy momentov i poperechnykh sil pri mnogokratno povtoryayuschihsya nagruzkah", avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya d-ra tekhn. nauk: 05.23.01, Kazanskiy gosudarstvenniy arhitekturno-stroitelnyi universitet, Kazan, 2009.
- [12] A.P. Kirillov, *Vynoslivost gidrotehnicheskogo zhelezobetona*, Moskva, Energiya, 1978.
- [13] V.M. Bondarenko, "O deformatsiyah vibropolzuchesti betona", *Struktura, prochnost i deformatsii betonov*, 1966, pp. 344-351.

АВТОРСКАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОВТОРНЫХ НАГРУЗОК

¹Сёмина Ю.А., к.т.н.,

syomina3091@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6330-0137

¹Карпюк В.М., д.т.н., профессор,

v.karpiuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4088-6489

¹Костюк А.И., к.т.н., профессор,

isi@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-5642-2443

¹Одесская государственная академия строительства и архитектуры
ул. Дидрихсона, 4, г. Одесса, 65029, Украина

Аннотация. Анализ результатов, как собственных испытаний, так и исследований других ученых показывает, что разрушение конструкций под действием повторных нагрузжений происходит при меньших напряжениях, чем разрушение конструкций под действием кратковременных статических нагрузок. А именно, несущая способность балок при действии циклических нагрузок в среднем на 10% ниже по сравнению с несущей способностью их «близнецов», работающих в условиях статических воздействий, что должно быть учтено при расчете и проектировании конструкций.

В связи с этим, в работе представлен авторский метод расчета наклонных сечений железобетонных балочных конструкций, работающих в условиях малоцикловых, а также многоцикловых нагрузок. Повторные нагрузки предлагается учитывать путем подсчета усталостных прочностей материалов балок, а именно сжатой зоны бетона над критической наклонной трещиной, продольной арматуры в месте пересечения с наклонной трещиной, а также анкеровки продольной арматуры. В частности, рассмотрены расчетные линии выносливости бетона и арматуры. В практических расчетах изменение напряжений, которое происходит вследствие развития деформаций виброползучести сжатого бетона в условиях сложного напряженного состояния, учитывается функциями накопления напряжений в бетоне, продольной и поперечной арматуре. Эти функции деформаций виброползучести бетона вычисляется по теории виброползучести.

По результатам исследований выведены и представлены соответствующие авторские выражения и зависимости, позволяющие определить предельные усилия, которые может

выдержать конструктивный элемент с заданным пролетом среза. Кроме того, предложено введение в расчет коэффициента $k_{\text{сyc}}$, учитывающего более деструктивное влияние многоциклового нагружения по сравнению с малоциклового повторного. Таким образом, $k_{\text{сyc}}$ – это отношение разрушающей поперечной силы к минимальному расчетному предельному усилию выносливости приопорных участков опытных образцов-балок, вычисленного с использованием характеристических значений прочности бетона и арматуры, то есть призмочной прочности бетона и предела текучести арматуры.

Ключевые слова: железобетон, балка, наклонное сечение, повторное нагружение, усталостная прочность, выносливость, напряжение, деформации.

AUTHOR'S METHOD FOR DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF INCLINED SECTIONS OF BEAM STRUCTURES UNDER REPEATED LOADS

¹Somina Yu.A., PhD,

syomina3091@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6330-0137

¹Karpiuk V.M., ScD, Professor,

v.karpiuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4088-6489

¹Kostiuk A.I., PhD, Professor,

isi@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-5642-2443

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
4, Didrichson street, Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. Analysis of the results of both our own tests and studies of other scientists shows that the destruction of structures under the action of repeated loading occurs at lower stresses than the destruction of structures under the action of short-term static loads. Namely, the bearing capacity of beams under the action of cyclic loads is on average 10% lower compared to the bearing capacity of their "twins" under static forces, that must be taken into account when calculating and designing structures.

In this regard, the author's method for calculating inclined sections of reinforced concrete beam structures under low-cycle and multi-cycle loads is presented in the paper. Repeated loads are proposed to be taken into account by calculating the fatigue strengths of the beam's materials, namely the compressed zone of concrete above the critical inclined crack, the longitudinal reinforcement at the intersection with the inclined crack, as well as the anchoring of the longitudinal reinforcement. In particular, the design lines of endurance of concrete and reinforcement are considered. In practical calculations, the change in stresses that occurs due to the development of vibrocreep deformations of compressed concrete at complex stress state is taken into account by the functions of stress accumulation in concrete, longitudinal and transverse reinforcement. These functions of deformations of concrete vibrocreep are calculated according to the theory of vibrocreep.

According to the results of the research, the corresponding author's expressions and dependencies are derived and presented, which allow determining the limit forces of structural element with a given shear span. In addition, it is proposed to introduce the coefficient $k_{\text{сyc}}$ into the calculation, which takes into account the more destructive effect of a multi-cycle load compared to a low-cycle repeated one. Thus, $k_{\text{сyc}}$ is the ratio of the breaking shear force to the minimum design ultimate endurance force of the near support sections of the specimens-beams, calculated using the characteristic values of the strength of concrete and reinforcement, that is, the prismatic strength of concrete and the yield strength of reinforcement.

Keywords: reinforced concrete, beam, inclined section, repeated loading, fatigue strength, endurance, stress, strain.

Стаття надійшла до редакції 7.03.2022